

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



Posouzení houževnatosti a pevnosti v ohybu
tepelně upraveného dřeva buku s nepravým jádrem

Bakalářská práce

Autor: **Jakub Vykoukal**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Aleš Zeidler PhD.**

2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Vykoukal

Dřevařství

Název práce

Posouzení houževnatosti a pevnosti v ohybu tepelně upraveného dřeva buku s nepravým jádrem

Název anglicky

Evaluation of Impact Strength and Bending Strength of Thermally Modified Beech Wood with the False Heartwood

Cíle práce

- 1) Zhodnotit rázovou houževnatost a pevnost v ohybu tepelně upraveného dřeva.
- 2) Posoudit vliv stupně tepelné úpravy na hodnocené vlastnosti.
- 3) Posoudit barevné změny v závislosti na tepelné úpravě.

Metodika

- Zpracovat literární rešerši o zkoumané dřevině, hodnocených vlastnostech a tepelné modifikaci dřeva.
- Zajistit reprezentativní vzorky dřeva pro provedení zkoušek.
- Tepelně modifikovat dřevo v několika stupních tepelné úpravy.
- Standardizovanými postupy na zkušebních tělesech stanovit především rázovou houževnatost a pevnost v ohybu. Dále posoudit barevné změny vlivem jednotlivých tepelných režimů.
- Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

dřevo, tepelná modifikace, vlastnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu

Doporučené zdroje informací

- KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71 s.
- KOLLMANN, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe – Erste Band. Berlin: Springer-Verlag, 1951. 1050 s.
- LEXA, J.- NEČESANÝ, V.- PACLT, J.- TESAŘOVÁ, M.- ŠTOFKO, J. Technologia dreva I. – Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva. Bratislava: Práca, 1952. 436 s.
- NOVÁK, V. Dřevařská technická příručka. Praha: SNTL, 1970. 748 s.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D, KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s.
- REINPRECHT, L. VIDHOLOVÁ, Z. Termodrevo: Thermowood. ŠMÍRA-PRINT, 2011. 89 S.
- TSOUMIS G. Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall, 1991. 497 s.
- WAGENFÜHR, R. Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 2000. 707 s.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2015

Ing. Milan Gaff, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 19. 04. 2016

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Posouzení houževnatosti a pevnosti v ohybu tepelně upraveného dřeva vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Zeidlera PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne 20. 4. 2016

Poděkování

Chtěl bych poděkovat kolektivu Katedry základního zpracování dřeva, jmenovitě doc. Ing. Aleši Zeidlerovi, Ph.D. za vedení práce, Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D. za cenné rady a poskytnuté materiály a Ing. Tomáši Holečkovi za pomoc s přípravou vzorků. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu, kterou mi během celého mého studia poskytli.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem termické modifikace na bukové dřevo, s přihlédnutím na rozdíl vlastností vzorků zdravých a vzorků s nepravým jádrem. Termická modifikace probíhala ve dvou stupních (165 °C a 210 °C), které jsme spolu s neupravenou sadou zkoušeli na rázovou houževnatost, pevnost v ohybu (statický modul pružnosti) a dynamický modul pružnosti. Doplňkovými měřeními vlastnostmi byla hustota, rovnovážná vlhkost a změna barevného spektra. První stupeň úpravy lehce zvýšil mez pevnosti a statický modul pružnosti, zbytek zkoušek však prokázal negativní vliv na ostatní měřené vlastnosti tepelně upravených vzorků. Prokázalo se také, že nepravé jádro má jasně negativní vliv na měřené mechanické vlastnosti.

Klíčová slova: dřevo, tepelná modifikace, vlastnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu

Abstract

This bachelor thesis examines the influence of thermal modification on beech wood, with taking into account the difference of properties of healthy samples and samples with false heartwood. Thermal modification took place in two stages (165 ° C and 210 ° C), which are together with the untreated set tried on impact strength, bending strength (static modulus of elasticity) and the dynamic modulus of elasticity. The additional measured properties were density, equilibrium moisture and change of color spectrum. The first level of treatment slightly increased the bending strength and the static modulus of elasticity, residue tests, however, showed a negative effect on the other measured properties of the heat treated samples. It has been shown also that false heartwood has a clearly negative effect on the measured mechanical properties.

Keywords: wood, thermal modification, properties, impact strength, bending strength

Obsah

1	Úvod.....	15
2	Cíle práce.....	16
3	Charakteristika zkoušené dřeviny – buku lesního	17
3.1	Dendrologické zařazení	17
3.2	Popis rostliny	17
3.3	Ekologie a rozšíření.....	19
3.4	Hospodářský význam	20
3.5	Makroskopická struktura dřeva.....	21
3.5.1	Nepravé jádro	21
3.6	Mikroskopická struktura dřeva	22
3.7	Fyzikální a mechanické vlastnosti, chemické složení.....	23
3.7.1	Fyzikální vlastnosti.....	23
3.7.2	Mechanické vlastnosti	23
3.7.3	Chemické složení.....	24
4	Charakteristika termicky upraveného dřeva	25
4.1	Obchodní varianty termicky upraveného dřeva	26
4.1.1	ThermoWood	26
4.1.2	PlatoWood.....	27
4.1.3	RetificatdWood (RetiWood)	28
4.1.4	OHT-Wood	28
4.2	Změny ve dřevě během termické modifikace	29

4.2.1 Fyzikální změny	29
4.2.1.1 Úbytek hmotnosti.....	29
4.2.1.2 Anatomické změny	30
4.2.1.3 Rovnovážná vlhkost (hygroskopicitá)	30
4.2.1.4 Hustota	31
4.2.1.5 Rozměrová stabilita	31
4.2.1.6 Odolnost vůči biotickým činitelům.....	32
4.2.1.7 Barva a vůně	33
4.2.2 Mechanické změny	33
4.2.2.1 Rázová houževnatost	33
4.2.2.2 Ohybová pevnost	33
4.2.2.3 Tahová, tlaková a smyková pevnost	34
4.2.2.4 Tvrdost	35
4.2.2.5 Modul pružnosti.....	35
4.2.3 Chemické změny	36
4.2.3.1 Celulóza.....	36
4.2.3.2 Hemicelulóza	37
4.2.3.3 Lignin	37
4.2.3.4 Extraktivní látky	37
4.3 Využití termicky upraveného dřeva	38
4.3.1 Využití v interiérech	38
4.3.2 Využití v exteriérech.....	38

5	Zkoumané vlastnosti	39
5.1	Rázová houževnatost.....	39
5.2	Statická pevnost v ohybu	41
5.3	Moduly pružnosti	43
5.3.1	Modul pružnosti ve statickém ohybu.....	43
5.3.2	Dynamický model pružnosti	44
5.4	Hustota.....	45
5.5	Vlhkost.....	46
5.6	Barevné spektrum.....	47
6	Metodika.....	49
6.1	Zkušební vzorky.....	49
6.1.1	Vzorky pro pevnostní zkoušky.....	49
6.1.2	Vzorky pro vyhodnocení barvy.....	50
6.1.3	Tepelná úprava vzorků.....	51
6.2	Rázová houževnatost	52
6.3	Statická zkouška v ohybu	53
6.4	Dynamický modul pružnosti.....	54
6.5	Barevné spektrum.....	55
6.6	Hustota.....	55
6.7	Vlhkost.....	56
7	Výsledky a diskuse.....	57
7.1	Vlhkost.....	57

7.2	Hustota.....	58
7.3	Rázová houževnatost.....	60
7.4	Ohybová pevnost.....	63
7.5	Modul pružnosti.....	65
7.5.1	Statický modul pružnosti.....	65
7.5.2	Dynamický modul pružnosti.....	68
7.6	Porovnání neupravených vzorků s literaturou.....	71
7.7	Barevné spektrum.....	72
8	Závěr.....	76
9	Zdroje.....	77
9.1	Literatura.....	77
9.2	Internetové zdroje.....	79
9.3	Normy.....	79

Seznam tabulek, obrázků a grafů

Tabulky

Tab. 1 – Hodnoty hustot a sesychání buku různých autorů	23
Tab. 2 – Hodnoty mezí pevnosti buku při 12 % vlhkosti různých autorů	24
Tab. 3 – Procentické zastoupení chemických složek buku (Požgaj et al., 1997; Wagenführ, 2000).....	24
Tab. 4 – Faktory ovlivňující úbytek hmotnosti během tepelné modifikace dřeva (Reinprecht, 2008).....	29
Tab. 5 – Statistické údaje rovnovážné vlhkosti při různých tepelných úpravách .	58
Tab. 6 – Statistické údaje hustoty bukových vzorků	59
Tab. 7 – Statistické údaje houževnatosti při různých tepelných úpravách	60
Tab. 8 – Statistické údaje houževnatosti vzorků s nepravým jádrem.....	61
Tab. 9 – Statistické údaje houževnatosti zdravých vzorků	61
Tab. 10 – Statistické údaje ohybové pevnosti při různých tepelných úpravách....	63
Tab. 11 – Statistické údaje pevnosti vzorků s nepravým jádrem	64
Tab. 12 – Statistické údaje pevnosti zdravých vzorků.....	65
Tab. 13 – Statistické údaje statického modulu pružnosti při různých tepelných úpravách	66
Tab. 14 – Statistické údaje statického modulu pružnosti vzorků s nepravým jádrem.....	67
Tab. 15 - Statistické údaje statického modulu pružnosti zdravých vzorků.....	67
Tab. 16 – Statistické údaje dynamického modulu pružnosti.....	69

Tab. 17 – Statistické údaje dynamického modulu pružnosti vzorků s nepravým jádrem.....	70
Tab. 18 – Statistické údaje dynamického modulu pružnosti zdravých vzorků	70
Tab. 19 – Porovnání fyzikálně-mechanických vlastností s literaturou	71

Obrázky

Obr. 1 – Kmen buku (Biolib, 2014).....	18
Obr. 2 – Příčný, radiální a tangenciální řez bukového dřeva (Zeidler, 2012)	21
Obr. 3 – Příčný, radiální a tangenciální mikroskopický řez buku (Zeidler 2007).	22
Obr. 4 – Změny v chemické struktuře dřeva vlivem tepelné úpravy (Borůvka, 2015)	36
Obr. 5 – Princip fungování Charpyho kladiva (www.strojari.wz.cz)	40
Obr. 6 – Kolorimetrický prostor $L^*a^*b^*$ (Babiak)	47
Obr. 7 – Přehled zkoušených vzorků	49
Obr. 8 – Vzorky pro vyhodnocení změny barevného spektra.....	50
Obr. 9 – Rozvržení zón měření pro spektrofotometr	51
Obr. 10 – Diagramy procesu tepelné úpravy vzorků (Borůvka, 2015).....	51
Obr. 11 – Přerážecí Charpyho kladiva se stupnicí a hlavami na 50 J a 150 J.....	52
Obr. 12 – Zkušební stroj UTS 50 uzpůsobený pro ohybové zkoušky	53
Obr. 13 – Fakkopp Ultrasonic Timer (Fakkopp UT Users Guide).....	54
Obr. 14 – Spektrofotometr CM-700d/600d (www.konicaminolta.eu)	55

Grafy

Graf 1 – Průběh modifikace ThermoWoodu v závislosti na času a teplotě (ThermoWood Handbook, 2003).....	27
Graf 2 – Vliv stupně tepelné úpravy a relativní vlhkosti na úroveň rovnovážné vlhkosti smrku (ThermoWood Handbook, 2003).....	31
Graf 3 – Vliv tepelné úpravy na ohybovou pevnost borovice při průměrné hustotě 560 kg.m ⁻³ (ThermoWood Handbook, 2003).....	34
Graf 4 – Vliv tepelné úpravy na pevnost v tlaku podél vláken borovice při průměrné hustotě 420 kg.m ⁻³ (ThermoWood Handbook, 2003).....	34
Graf 5 - Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti borovice při průměrné hustotě 560 kg.m ⁻³ (ThermoWood Handbook, 2003).....	35
Graf 6 – Diagram napětí – deformace (Požgaj et al., 1997).....	42
Graf 7 – Vliv tepelné úpravy na rovnovážnou vlhkost.....	57
Graf 8 – Vliv tepelné úpravy na celkovou hustotu vzorků.....	58
Graf 9 – Vliv tepelné úpravy na hustotu vzorek zdravých a s nepravým jádrem .	59
Graf 10 – Vliv tepelné úpravy na rázovou houževnatost.....	60
Graf 11 – Vliv tepelné úpravy na houževnatost vzorků s nepravým jádrem a bez něj.....	61
Graf 12 – Porovnání hodnot houževnatosti s typem lomu.....	62
Graf 13 – Vliv tepelné úpravy na vzorky s nepravým jádrem a bez.....	64
Graf 14 – Vliv tepelné úpravy na statický modul pružnosti.....	66
Graf 15 – Vliv tepelné úpravy na statický modul pružnosti vzorků s nepravým jádrem a bez.....	67
Graf 16 – Vliv tepelné úpravy na dynamický modul pružnosti.....	68

Graf 17 – Vliv tepelné úpravy na dynamický modul pružnosti vzorků s nepravým jádrem a bez.....	69
Graf 18 – Vliv tepelné úpravy na světlost L	72
Graf 19 - Vliv tepelné úpravy na rozdíl světlosti L vzorků s nepravým jádrem a bez.....	73
Graf 20 - Vliv tepelné úpravy na parametr Δa vzorků s nepravým jádrem a bez .	74
Graf 21 - Vliv tepelné úpravy na parametr Δb vzorků s nepravým jádrem a bez .	74
Graf 22 – Vliv tepelné úpravy na změnu barevného spektra ΔE vzorků s nepravým jádrem a bez	75

1 Úvod

Bukové dřevo je dnes velmi využívaná dřevina, hlavně v nábytkářství, kde je velmi žádané pro svou ohýbatelnost, ale slouží také jako surovina pro dýhárenský průmysl, či výrobu překližek, parket nebo obložení. Hojně se využívá také pro chemické a polochemické zpracování. Tepelnou úpravou můžeme dosáhnout jednak zlepšených fyzikálních vlastností (větší rozměrová stabilita, vyšší odolnost vůči biotickým škůdcům...) a jednak dřevo dostává nový barevný odstín, což můžeme uplatnit z estetického hlediska.

Termicky upravené bukové dřevo se ale dnes příliš nevyužívá z hlediska prvků, na které je požadavek zvýšených mechanických vlastností, jako například konstrukční prvky ve dřevostavbách. Cílem této práce je zjistit, jaký vliv budou mít dva stupně tepelné úpravy (165 °C a 210 °C) na rázovou houževnatost a pevnost v ohybu (potažmo modul pružnosti), která je důležitá při využívání dřevěných prvků jako nosníků či trámů, oproti pevnostním charakteristikám vzorků neupravených. Doplňkovým cílem je zhodnotit, jaký vliv má tepelná úprava na změnu barevného spektra.

2 Cíle práce

- 1, Zhodnotit rázovou houževnatost a pevnost v ohybu tepelně upraveného dřeva.
- 2, Posoudit vliv stupně tepelné úpravy na hodnocené vlastnosti.
- 3, Posoudit barevné změny v závislosti na tepelné úpravě

3 Charakteristika zkoušené dřeviny – buku lesního

3.1 Dendrologické zařazení

Říše – *Plantae* – rostliny

Oddělení – *Magnoliophyta* – krytosemenné rostliny

Třída – *Rosopsida* – vyšší dvouděložné rostliny

Řád – *Fagales* – bukotvaré

Čeleď – *Fagaceae* – bukovité

Rod – *Fagus* - buk

(Biolib, 2014)

3.2 Popis rostliny

Buk dosahuje výšky kolem 35 až 45 metrů, průměr kmene může dosáhnout až 1,5 metru, nejrozvinutější kmeny můžou dosáhnout objemu až třiceti kubických metrů. V závislosti na stanovišti buk dosahuje věku 200 – 400 let. Nejlépe se mu daří na optimálně vlhkých, dobře provzdušněných, humózních a minerálně bohatých půdách. Hůře se usazuje na půdách těžkých, neprovzdušněných, nebo vysýchavých či kyselých (Biolib, 2014; Úradníček2001).

Kmen bývá vysoko do koruny průběžný a větve odstávají v ostrém úhlu. Zprohýbané, bělavě pýřité, později lysé, červenohnědé letorosty nesou odstávající, hnědé, dvouřadě střídavé, štíhle větvenité, ostře zašpičatělé pupeny s bělavě pýřitými šupinami. Listy jsou střídavě eliptické, 5-10 cm dlouhé, celokrajné, na okraji zvlňené, zašpičatělé, na bázi zaokrouhlené až klínovité, v paždí žilek a na okraji listů (hlavně zjara) dlouze bělavě pýřité. Plodem je jednosemenná nažka (bukvice) buď částečně, anebo zcela uzavřená ve zveličelé čišce otvírající se čtyřmi chloupky. Listy jsou ve stínu ploše rozložené, dvouřadě střídavé, řapíkaté,

s tenkou čepelí; listy vystavené slunci jsou pevné s čepelí k okraji zdviženou (Hejný, 2003; Úradníček, 2001).

Samčí květy v paždí listů v dlouze stopkatých nících svazečcích, samičí květy po dvou v červenavé číšce zevně porostlé dlouze chlupatými, později dřevnatíci výrůstky. Semena buku jsou bez endospermu, embryo se většinou vyskytuje s velkými dělohami. Jedná se o dřevinu jednodomou. Na volném prostranství začíná buk plodit mezi 20. a 40. rokem. Plodná období se vyskytují nepravidelně ve víceletých intervalech (5 až 10 let). Bukvice jsou oříškovité chuti, jedlé. Proto je hojně roznášejí ptáci a drobní hlodavci (Hejný, 2003; Úradníček, 2001).

Kořenový systém můžeme označit za srdčitý se zkráceným hlavním kořenem. Z mohutného kořenového uzlu pod povrchem vyhání buk silné kořeny všemi směry do půdy. Bývá proto v půdě velmi dobře zakotven. Na živných půdách však buk kořenuje často poměrně mělce, avšak svrchní vrstvu důkladně prokoření. Koruna bývá vysoko nasazená, kulovitá a bohatě větvená, borku má i v pokročilém věku hladkou, stříbrošedou. Výmladková schopnost buku je celkem malá (Hejný, 2003; Úradníček, 2001).



Obr. 1 – Kmen buku (Biolib, 2014)

3.3 Ekologie a rozšíření

Buk je dřevina snášející i silný zástin. Pro tuto schopnost mohou mít i čisté bučiny několik pater, protože potlačení jedinci vydrží dlouho v podrostu. Proto také na příznivých stanovištích vytlačuje buk většinu ostatních dřevin, což vede ke vzniku čistých bučin. Buk má střední nároky na vláhu v půdě. Vyžaduje dostatek srážek a zvláště v letním období musí mít dostatečnou relativní vlhkost vzduchu (Úradníček, 2001).

V oblasti optimálního rozšíření je buk celkem indiferentní ke geologickému podkladu. Roste skoro na všech druzích hornin; vynechává jen suché písky, těžké nepropustné jíly, půdy bažinaté a rašelinné. Nejlepší bučiny jsou ovšem na dobrých humózních půdách bohatých vápníkem. Tam, kde klima a jiné faktory nejsou již optimální, stoupají výrazně nároky buku na půdu. Buk svým opadem listí silně ovlivňuje půdu, je citlivý na pozdní mrazy a vyhovuje mu mírné oceánické klima (Hejný, 2003; Úradníček, 2001).

Buk v našich lesích zabírá přibližně 6,2 % lesního porostu, což představuje celkem 160 976 hektarů plochy našich lesů. Celé naše území leží uvnitř areálu buku, a proto tuto dřevinu nalezneme ve všech středohořích a horských oblastech hercynské i karpatské části státu. V České republice jsou optimální podmínky pro růst buku v nadmořských výškách 500 - 800 metrů, běžně roste ve výškách 300 - 1000 metrů nad mořem, ve zvláštních případech již ve 120 m. n. m. (inverzní rokle u Hřenska) až do 1250 m. n. m. (horské jižní svahy). Buk vytváří v našich podmínkách v nadmořských výškách cca od 400–800 metrů často nesmíšené porosty, na spodní hranici rozšíření se mísí s dubem a na horní se smrkem a jedlí. V Alpách vytváří porosty do 1500 m. n. m. Celkově je rozšířen v Evropě po jih Velké Británie a Švédska, na východ do západní Ukrajiny. V jižní Evropě se vyskytuje v horách Balkánského poloostrova, na ostrovech Korsika a Sicílie, v Pyrenejích a Apeninách (Biolib, 2014; Gandelová, 2012, Úradníček, 2001).

Kromě buku lesního – *Fagus sylvatica* existuje ještě několik dalších významných druhů buků:

- *Fagus grandifolia* – buk velkolistý (Americký)

- *Fagus orientalis* – buk východní

- *Fagus crenata* – buk japonský

V současnosti je známo celkově okolo 13 – 15 různých druhů buků, včetně uhynulých druhů (Biolib, 2014; Wagenführ, 2000; Walker, 2009).

3.4 Hospodářský význam

Buk je naší nejdůležitější hospodářskou listnatou dřevinou. Cenné sortimenty dává obvykle jen hladká část kmene; ostatek se zpracovává na palivo nebo celulózu. Bukové dřevo má všestranné použití. Využívá se hojně v nábytkářství; pro svou schopnost dobré ohýbatelnosti se používá na výrobu ohýbaného nábytku. Je důležitou surovinou pro výrobu dýk, překližek, parket, pro chemické a polochemické zpracování dřeva (buničina, výroba dřevotřískových a dřevovláknitých desek), dobře se impregnuje, paří a moří. Hojně se využívá také jako palivové dřevo. Dá se použít též jako konstrukční materiál, při výrobě dřevěných doplňků, drobných ozdobných předmětů a náradí. Z bukovic se dříve lisoval olej. V okrasném zahradnictví má buk již dávno pevné postavení. Staré buky jsou častou ozdobou zámeckých parků. Dekorativních kultivarů je větší počet, velmi známý je cv. Pendula - smuteční buk, nebo cv. Rohanii s tmavě purpurovými, nepravidelně laločnatými listy (Gandelová, 2012; Úradníček 2001; Walker, 2009).

3.5 Makroskopická struktura dřeva

Buk je dřevina bezjaderná, roztroušeně pórovitá se znatelnými pravidelnými letokruhy, dřevo je barvy bílo-růžové, až červenohnědé. Dřeňové paprsky jsou viditelné na všech řezech. Na příčném tvoří husté pásy probíhající kolmo na letokruhy, na radiálním dobře postřehnutelná zrcátka a na tangenciálním až 5 milimetrů svislé, tmavé pásy. Dřevina je charakteristická přítomností vyzrálého dřeva. V místě průchodu dřeňového paprsku hranicí letokruhů dochází často ke zvlnění letokruhu (Gandelová, 2012; Zeidler 2012).



Obr. 2 – Příčný, radiální a tangenciální řez bukového dřeva (Zeidler, 2012)

3.5.1 Nepravé jádro

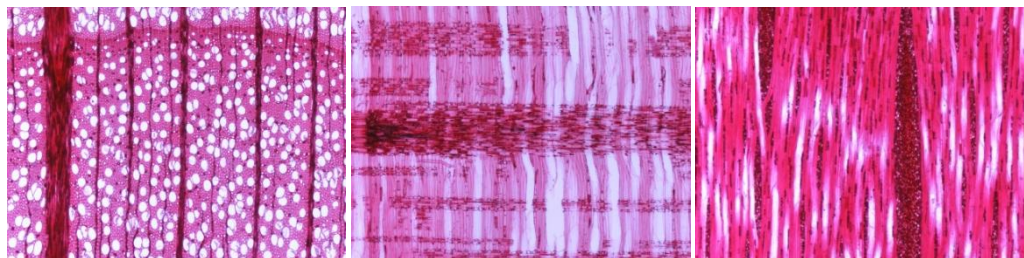
Buk je v závislosti na stanovišti, růstových podmínkách a mnoha dalších faktorech postihován mnoha různými vadami, z hlediska cílů této práce ale tato podkapitola bude obsahovat shrnutí pouze o nepravém jádru.

Nepravé jádro ve dřevě vzniká porušením fyziologických procesů ve stromě, ke kterým dochází působením biotických (houby) a abiotických (průnik vzduchu do dřeva, mraz) činitelů. Vytváří se v zóně vyzrálého dřeva nebo ve středové části kmene bělových dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva (kromě buku i bříza, olše, javor...). Nepravé jádro má nepravidelný tvar, charakteristické zbarvení a je od světlejšího dřeva obvodové části kmene zřetelně ohraničeno hraniční zónou. Podle tvaru na příčném řezu rozeznáváme okrouhlá a paprskovitá nepravá jádra (Gandelová, 2012).

Nepravé jádro se jako vada posuzuje hlavně podle toho, jestli je jádro zdravé, či nezdravé. Při tvorbě zdravého jádra dochází k odumírání parenchymatických buněk v zóně vyztřelého dřeva. Při jejich odumírání v nich oxidují třísloviny (změna barvy jádra) a thyly ucpávají cévy. Nezdravá jádra jsou způsobena dřevokaznými houbami, které svou enzymatickou činností hyf ničí buněčné stěny, a jsou zřetelně odlišena tmavou hraniční čarou. U buku nebyl zjištěn podstatnější rozdíl v hodnotách fyzikálních a mechanických vlastností u nepravého jádra ve vztahu ke zdravému dřevu, avšak nepravé jádro má na rozdíl od zdravého dřeva špatnou proimpregnovatelnost (Gandelová, 2012).

3.6 Mikroskopická struktura dřeva

Na příčném řezu můžeme vidět cévy jednotlivě anebo v radiálních skupinách. V nepravém jádru se v cévách vyskytují thyly a jádrové látky. Základní pletivo je tlustostěnné, dřevňové paprsky jsou na hranici letokruhů rozšířené. Podélný dřevní parenchym apotracheální je difuzní, až rozptýleně nakupený. Na radiálním řezu můžeme vidět jak jednoduché, tak i žebříčkové perforace, stěny cév jsou hladké. Na tangenciálu můžeme vidět mnohvrstevné dřevňové paprsky, které se skládají až z 25 vrstev. Základní pletivo tvoří libriformní vlákna, vyskytují se v něm i vláknité, révovité a vazicentrické tracheidy (Gandelová, 2012).



Obr. 3 – Příčný, radiální a tangenciální mikroskopický řez buku (Zeidler 2007)

3.7 Fyzikální a mechanické vlastnosti, chemické složení

3.7.1 Fyzikální vlastnosti

Buk se považuje za středně těžké a středně tvrdé dřevo. Není tolik trvanlivé a má malou odolnost vůči biotickým činitelům, při sušení má sklon se bortit a praskat. Patří mezi dřeva velmi sesychavá (Gandelová, 2012). Základní fyzikální hodnoty hustoty a bobtnání podle různých autorů ukazuje následující tabulka:

Tab. 1 – Hodnoty hustot a sesychání buku různých autorů

	Lexa, 1952	Kollmann, 1951	Novák, 1970	Požgaj et al. 1997	Wagenführ, 2000
Hustota ρ_0 při $w=0\%$ (g.cm^{-3})	0,68	0,68	0,68	0,684	0,68
Hustota ρ_{12} při $w=12\%$ (g.cm^{-3})	0,71	0,72	0,72	-	0,72
Bobtnání podélné (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Bobtnání radiální (%)	5	5,8	5,8	5,3	5,8
Bobtnání tangenciální (%)	11,8	11,8	11,8	12,5	11,8
Bobtnání objemové (%)	17,5	17,9	17,9	17,5	17,9

3.7.2 Mechanické vlastnosti

Bukové dřevo má střední pevnost v ohybu, tuhost a rázovou houževnatost, vysokou pevnost v tlaku a dobrou pevnost v ohybu (Walker, 2009). Následující tabulka ukazuje hodnoty mezi pevnosti buku lesního při 12 % vlhkosti:

Tab. 2 – Hodnoty mezí pevnosti buku při 12 % vlhkosti různých autorů

	Lexa, 1952	Kollmann, 1951	Novák, 1970	Požgaj et al., 1997	Gandelová, 2012	Wagenführ 2000
Mez pevnosti v tlaku podél vláken (MPa)	53	62	62	56,7	57,5	62
Modul pružnosti v tlaku (MPa)	16 000	16 000	16 000	16 837	-	16 000
Mez pevnosti v tahu podél vláken (MPa)	135	135	135	135,5	123	135
Mez pevnosti v tahu napříč vláken (MPa)	7	7	7	3,4 – 4,4	3,4 – 4,4	7 – 10,7
Mez pevnosti v ohybu (MPa)	105	123	123	124	109	123

3.7.3 Chemické složení

Následující tabulka ukazuje procentické podíly chemických složek buku:

Tab. 3 – Procentické zastoupení chemických složek buku (Požgaj et al., 1997; Wagenführ, 2000)

Celulóza	33,7 – 46,4 %	Benzol-alkoholové extrakty	1,8 – 1,9 %
Lignin	11,6 – 22,7 %	Éterové extrakty	cca 1 %
Veškeré cukry	75,7 – 85 %	Látky rozpustné ve vodě	cca 1,9 %
Acetylové skupiny	6 – 7,1 %	Popel, anorganické látky	0,3 – 1,2 %
Pentózy	17,8 – 25,5 %	Výtěž buničiny, celulózy	cca 38,5 %
Methoxyl	5,1 – 6,8 %	Hodnota pH	5,1 – 5,4
Xylany	28 %	Manany	1,5 %

4 Charakteristika termicky upraveného dřeva

Dřevo patří k těm surovinám, u které je velkou výhodou jejich obnovitelnost. Tato vlastnost se stává čím dál tím významnější, čím rychleji se vyčerpávají zdroje fosilních surovin. S ohledem na časově omezené možnosti využívání těchto zásob, je potřeba hledat další zdroje uhlíku, které by byly dostupné v dostatečném množství a které by bylo možné ekonomicky přijatelné zpracovat na požadované produkty či energeticky využít. Mezi takovéto zdroje bezpochyby dřevo patří – hmota rostlin, které vznikají v průběhu fotosyntézy, obsahuje rozličné látky, které mají široké využití (Kačíková, 2011).

Vliv termického působení na vlastnosti dřeva se zkoumají už poměrně dlouho. Na začátku 20. století se zjistilo, že sušení při vysokých teplotách snižuje rovnovážnou vlhkost dřeva a jeho následné bobtnání a sesychání. Tyto vlastnosti byly také zkoumány při ohřevu v různých plynech. Dále byl také zkoumán vliv termických úprav na rozměrovou stabilitu dřeva (Kačíková, 2011).

Zájem o termicky upravované dřevo vzrostl hlavně v poslední době, kdy je potřeba trvanlivý stavební materiál a legislativní změny omezují čím dál tím více používání toxických látek (Kačíková, 2011). V současné době je hlavním záměrem připravit termicky upravený materiál, který by co nejlépe splňoval tato kritéria:

- nižší hygroskopicitu
- vysoká rozměrová stabilita
- vysoká odolnost vůči dřevokazným, dřevozbarvujícím houbám a plísním
- vysoká odolnost vůči dřevokaznému hmyzu a mořským škůdcům
- zachování, nebo vylepšení mechanických vlastností – pevnosti, tuhosti a tvrdosti
- zachování, nebo vylepšení estetické stránky – barva, textura, lesk

(Reinprecht, 2008)

4.1 Obchodní varianty termicky upraveného dřeva

4.1.1 ThermoWood

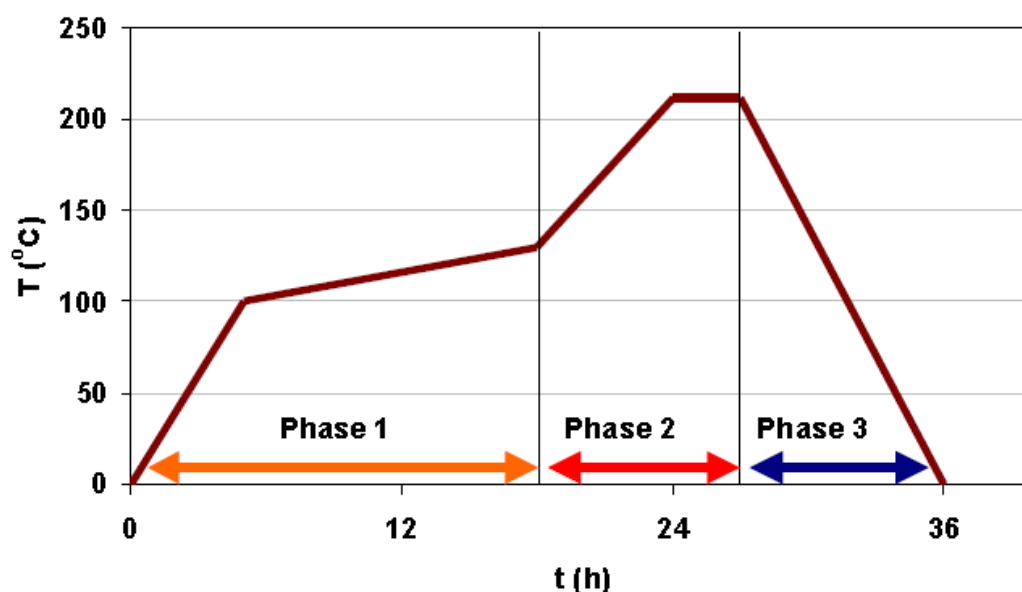
Proces ThermoWoodu pochází z Finska, a považuje za nejrozšířenější a nejúspěšnější proces termicky upraveného dřeva v Evropě. V roce 2008 tento způsob úpravy představoval 90 % produkce veškerého termicky upraveného dřeva v Evropě. Vstupní surovinou pro tento druh úpravy je nejčastěji borovice a smrk, či bříza a osika. ThermoWood se dělí podle úpravy a použití na dvě třídy:

- Thermo-S – úprava při 185°C - 190°C, disponuje zvýšenou rozměrovou stabilitou a odolností vůči povětrnostním vlivům. Používá se spíše pro interiérové účely, jako například nábytek, dřevěné prvky v saunách, interiérové dveře a okna či parkety.
- Thermo-D – úprava při 200°C - 212°C, disponuje zvýšenou rozměrovou stabilitou a velkou odolností vůči povětrnostním vlivům. Dá se využít i v exteriéru, jako obložení, na terasy, zahradní nábytek, koupelnové prvky či vchodové dveře.

Výroba ThermoWoodu probíhá ve třech fázích:

- Fáze 1 (Sušení) – nejdříve se teplota v peci nastaví na 100°C a poté se pomalu zvyšuje až na 130°C. Tato fáze trvá nejdéle, protože se při ní dřevo musí dokonale vysušit před dalším procesem.
- Fáze 2 (Tepelná úprava) – v této fázi se teplota zvýší na úroveň 185°C - 215°C (podle požadované finální úpravy) a té se dřevo vystavuje po dobu dvou až tří hodin.
- Fáze 3 (Klimatizování) – V této fázi teplota postupně klesá až na nulu a pod úrovní 100°C se vlhkostně kondicionuje, aby se finální vlhkost ThermoWoodu ustálila mezi 4 – 7 %.

Celý proces probíhá v atmosféře vzduchu nebo plynu s obsahem kyslíku od 3 do 5 %. Výsledná modifikace ThermoWoodu je závislá od velikosti teploty ve druhé fázi, na době, po kterou se dřevo této teplotě vystavuje a na druhu dřeviny a její tloušťce (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008, ThermoWood Handbook, 2003). Přibližný průběh celého procesu ukazuje následující graf:



Graf 1 – Průběh modifikace ThermoWoodu v závislosti na času a teplotě (ThermoWood Handbook, 2003)

4.1.2 PlatoWood

PlatoWood je technologie pocházející z Holandska, upravující dřeviny jako borovice, smrk, topol či bříza. Disponuje asi o 50 % větší rozměrovou stabilitou a o 30 – 40 % nižší hygroscopicitou a částečně zvýšenou odolností vůči biologickým činitelům než rostlé dřevo. Výroba PlatoWoodu se skládá ze čtyř fází:

- 1, Hydrotermolýza – dřevo se upravuje za zvýšené teploty (150°C - 190°C) a zvýšeného tlaku (0,6 – 1 MPa) po dobu 4 – 5 hodin v atmosféře vodní páry. V této fázi se vlhkost dřeva víceméně nemění a dochází ke změnám v chemické struktuře.

- 2, Sušení – materiál se poté suší v horizontu dní až týdnů na přibližnou hodnotu 8 – 10 %.
- 3, Vytvrzování – při této fázi dřevo vytvrzuje při atmosférickém tlaku po dobu 12 – 16 hodin při teplotě 150°C až 190°C za omezeného přístupu vzduchu. To má za následek síťování ligninu a vlhkost klesá pod 1 %.
- 4, Klimatizování – v konečné fázi se dřevo v sušárně zvlhčuje po dobu 3 dní na finální vlhkost 4 – 6 %.

(Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008)

4.1.3 Retificated Wood (RetiWood)

Tato modifikace pochází z Francie a upravuje se v jedné jediné fázi v inertní dusíkové atmosféře při postupném zvyšování teplot až na 200°C až 260°C. Při tom dřevo prochází mírnou pyrolýzou. Vstupní materiál musí být předsušen na 12 % vlhkost.

Ve Francii je znám ještě druhý způsob úpravy, a sice tzv. „Bois Perdure“, kdy je dřevo rychle upravováno v atmosféře par a spalin při teplotě 200°C - 240°C (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008).

4.1.4 OHT-Wood

Tato technologie pochází z Německa, a jejím principem je úprava dřeva v rostlinných olejových lázních. Dřevo se upravuje po dobu až 18 hodin ve lněném oleji při teplotě 180°C - 220°C. Během tohoto procesu je zamezen přístup kyslíku do dřeva, takže se částečně omezí nežádoucí termooxidační procesy. Vedlejším účinkem působení oleje je nárůst hmotnosti výsledného produktu o 50 – 70 % (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008).

4.2 Změny ve dřevě během termické modifikace

4.2.1 Fyzikální změny

4.2.1.1 Úbytek hmotnosti

Úbytek hmotnosti je způsoben částečným odbouráním hemicelulóz a dalšími chemickými změnami ve struktuře dřeva a považuje se za jednu z nejdůležitějších charakteristik a používá se na vyjádření kvality úpravy. Tato vlastnost závisí na mnoho faktorech, jako například čas a teplota úpravy, druh dřeviny a její počáteční vlhkost atd., existují dobré korelace mezi úbytkem hmotnosti a časem termického působení (Kačíková, 2011). Obecné faktory způsobující menší či větší úbytek hmotnosti popisuje následující tabulka:

Tab. 4 – Faktory ovlivňující úbytek hmotnosti během tepelné modifikace dřeva (Reinprecht, 2008)

Menší úbytek hmotnosti	Větší úbytek hmotnosti
v inertní atmosféře nebo ve vakuu	ve vzduchu
v otevřeném prostředí	v reaktoru
v suchém prostředí	v mokřém prostředí
jehličnany	listnáče

4.2.1.2 Anatomické změny

Termická úprava dřeva se anatomicky projevuje hlavně trhlinami ve ztenčeninách a ve stěnách buněk. Současně s tím se mění i tloušťka buněčných stěn a spolu s tím i jejich pórovitost. Při teplotách nad 300°C - 500°C buněčné stěny úplně mizí, a zůstává z nich jenom popel. Při úpravě smrkového dřeva na teplotu 150°C byly zjištěny praskliny mezi vrstvami S1 a S2 a v rozích buněk. Podobné změny byly zjištěny také u březového a bukového dřeva po hydrotermickém působení o teplotách 120°C až 160°C. Tlakové paření dřeva při teplotách 180°C - 230°C vyvolává také výrazný nárůst pórovitosti – zvětšila se četnost a rozměry mikropórů. S dalším nárůstem teploty se stěny buněk zeslabují a vznikají v nich i větší trhlinky.

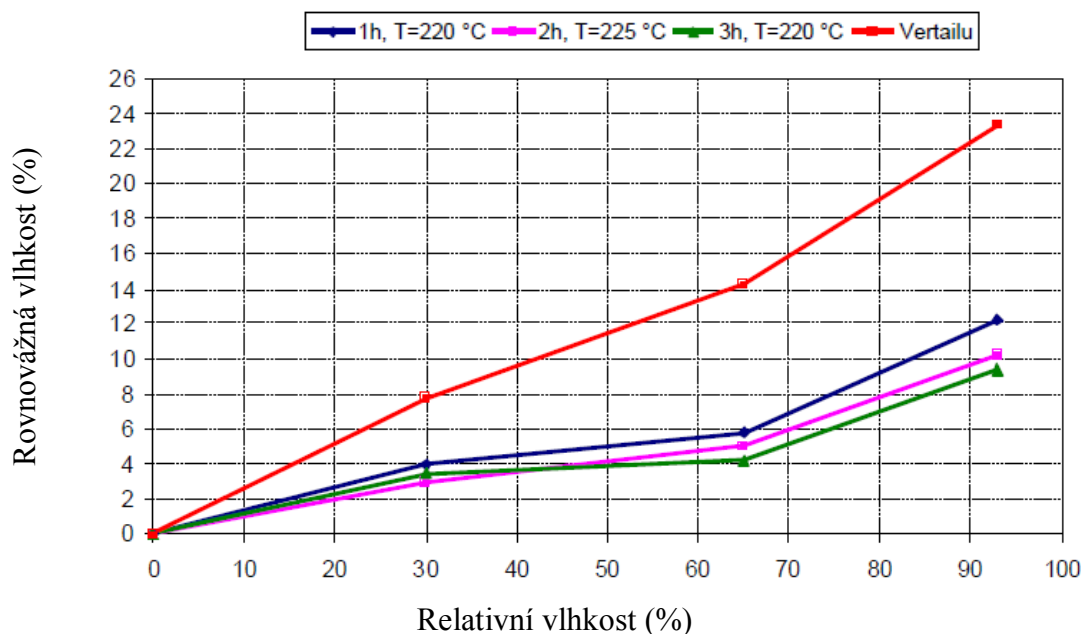
Změny v anatomické struktuře jsou ovlivněny jednak druhem upravované dřeviny, jednak typem úpravy. Jehličnaté dřeviny jsou více náchylné na praskání v tangenciálním směru v letním dřevě, a to zejména dřeviny s úzkými letokruhy nebo s náhlým přechodem jarní/letní drvo. U listnatých dřevin byly nejvíce náchylné na porušení cévy a byly zjištěny určité deformace v libriformních vlákních v blízkosti cév (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008).

4.2.1.3 Rovnovážná vlhkost (hygroscopicita)

Snížení rovnovážné vlhkosti je hlavním efektem termické úpravy, a má za následek snížení efektu bobtnání a sesychání, a také ovlivňuje rozměrovou stabilitu a odolnost vůči biologickým škůdcům. Stejně tak jako při úbytku hmotnosti, míra snížení této hodnoty závisí na mnoho faktorech. Znovu platí, že čím déle a čím větší teplotě drvo vystavujeme, tím se hladina rovnovážné vlhkosti snižuje (Reinprecht, 2008).

Důvodem poklesu hygroscopicity je skutečnost, že stěny buněk absorbují méně vody jako důsledek chemických změn, které způsobují pokles a odbourání hydrofilních hydroxylových skupin, odbourání určitého podílu hemicelulóz nebo redistribuci lipidních a jiných hydrofobních látek. Další studie zase ukazují, že při tepelné úpravě dřeva se zvyšuje krystalinita celulózy, což způsobuje horší

dostupnost hydroxylových skupin pro molekuly vody (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008). Následující graf ukazuje míru snížení rovnovážné vlhkosti v závislosti na relativní vlhkosti a stupni tepelné úpravy:



Graf 2 – Vliv stupně tepelné úpravy a relativní vlhkosti na úroveň rovnovážné vlhkosti smrku (ThermoWood Handbook, 2003)

4.2.1.4 Hustota

Při termické úpravě dřeva se odbourávají hlavně hemicelulózy a některé typy extraktivních látek, což se projevuje na úbytku hmotnosti. Objem dřeva se při úpravě sice také zmenšuje, nikoliv však stejnou měrou jako hmotnost, což vede k celkovému poklesu hustoty. Tento pokles je tím větší, čím radikálnější je termická úprava (Reinprecht, 2008).

4.2.1.5 Rozměrová stabilita

Změny rozměrové stability se odvíjí od velikosti poklesu rovnovážné vlhkosti ve dřevě – čím víc poklesne, tím se dřevo stává rozměrově stabilnějším (dřevo tolik nesesychá ani nebobtná). Na základě experimentů při teplotách 150°C - 300°C ve vzduchové či dusíkové atmosféře se zjistilo, že maximální

rozměrové stability se dosáhne při 15 – 20 % úbytku hmotnosti. Stejně jako u změn úrovně hygroskopicity si můžeme tyto změny vysvětlit částečným odbouráním hemicelulóz či zvýšeným zesíťováním ligninu (Reinprecht, 2008).

4.2.1.6 Odolnost vůči biotickým činitelům

Termicky upravené dřevo jako takové disponuje větší odolností vůči biotickým činitelům než dřevo rostlé. Tuto schopnost můžeme připsat několika vlastnostem – snížení podílu hydroxylových funkčních skupin a zvýšení hydrofóbnosti následkem kondenzačních i jiných reakcí. Při tom se snižuje sorpční kapacita dřeva a tím i jeho vlhkost nutná pro přítomnost škůdců. Další vlastností je odbourání určitého podílu hemicelulózy, která je nejvíc žádaná pro přítomnost hmyzu či hub, spolu s vytvořením látek s biocidním účinkem, jednak z původních extraktivních látek, jednak z termicky degradovaných složek dřeva. Podle dalších studií mohou některé látky přispívat k zesíťování ligninu a enzymatický systém hub takovouto strukturu nedokáže degradovat (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008).

Všeobecně můžeme konstatovat, že biologická odolnost termicky upraveného dřeva se výrazně zvyšuje hlavně vůči celulozovorným (*Coniophora putina*, *Poria placenta*, *Gloeophyllum tabeum*, apod.) a ligninovorným (*Trametes versicolor*, apod.) houbám, a to hlavně při delších a tvrdších modifikacích. Naopak odolnost vůči plísním, dřevozbarvujícím houbám a houbám měkkých hnilob nelze stanovit jednoznačně v závislosti na typu úpravy, dřeviny i houby.

Odolnost vůči dřevokaznému hmyzu můžeme definovat jako dostatečnou, neboť mnoho druhů hmyzu už nemá v termodřevu podmínky pro přežití, kvůli absenci prchavých atraktantů – terpenoidů. Vůči termitům je termodřevo naopak méně odolné, než dřevo rostlé (ThermoWood Handbook, 2003; Reinprecht, 2008).

4.2.1.7 Barva a vůně

Termodřevo je charakteristické svou vůní a barvou. Tyto vlastnosti se umocňují se zvyšujícím se stupněm tepelné úpravy. Při vyšších teplotách dřevo nabývá žluto-hnědého až temně hnědého zbarvení. Vzhled zbarvení určuje nejen teplota, ale i prostředí, ve kterém je dřevo upravováno. Například při ohřevu na vzduchu, nebo v přítomnosti agresivních chemikálií dřevo tmavne více, než např. při ohřevu v dusíkové atmosféře. Zcela specifického vzhledu nabývá dřevo při ohřevu v rostlinných olejích (Reinprecht, 2008).

Vůni můžeme charakterizovat jako podobnou karamelu, spíše by se dala popsat jako zcela jedinečné „pečené dřevo“.

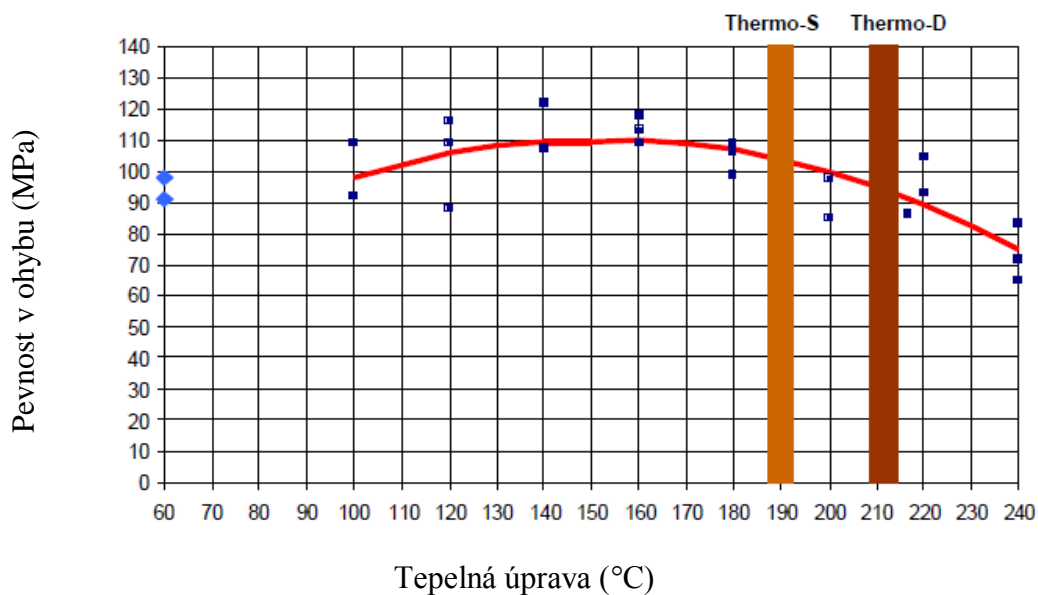
4.2.2 Mechanické změny

4.2.2.1 Rázová houževnatost

Změny v chemické struktuře termodřeva způsobují, že dřevo se stává křehčím, proto rázová houževnatost se zvyšujícím se stupněm tepelné úpravy klesá. Pokles houževnatosti se dá označit za exponenciální (potažmo logaritmickou) funkci závislou na úbytku hmotnosti (Reinprecht, 2008).

4.2.2.2 Ohybová pevnost

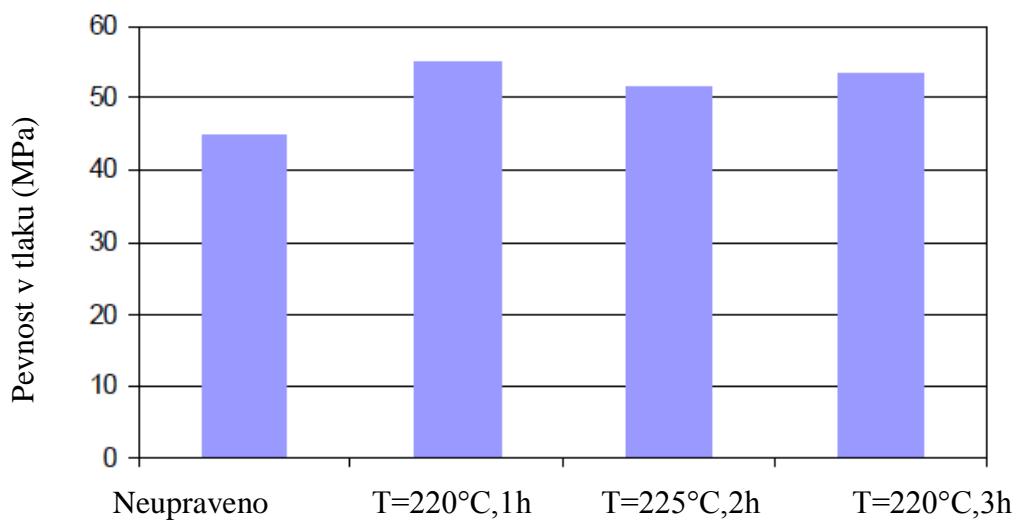
Ohybová pevnost je při tepelné úpravě okolo 150°C - 160°C dokonce o cca 10% vyšší (v závislosti na dřevině), než u neupraveného dřeva, okolo 200°C tato pevnost zase klesá pod hodnotu pevnosti neupraveného dřeva. Pro praktičtější využití tento nárůst ale nemá valnějšího významu (ThermoWood Handbook, 2003).



Graf 3 – Vliv tepelné úpravy na ohybovou pevnost borovice při průměrné hustotě 560 kg.m^{-3} (ThermoWood Handbook, 2003)

4.2.2.3 Tahová, tlaková a smyková pevnost

Tahový a smyková pevnost se s narůstajícím stupněm tepelné úpravy snižuje, naopak tlaková pevnost podél vláken stoupá při úpravě na cca 220°C přibližně o nějakých 30 %.



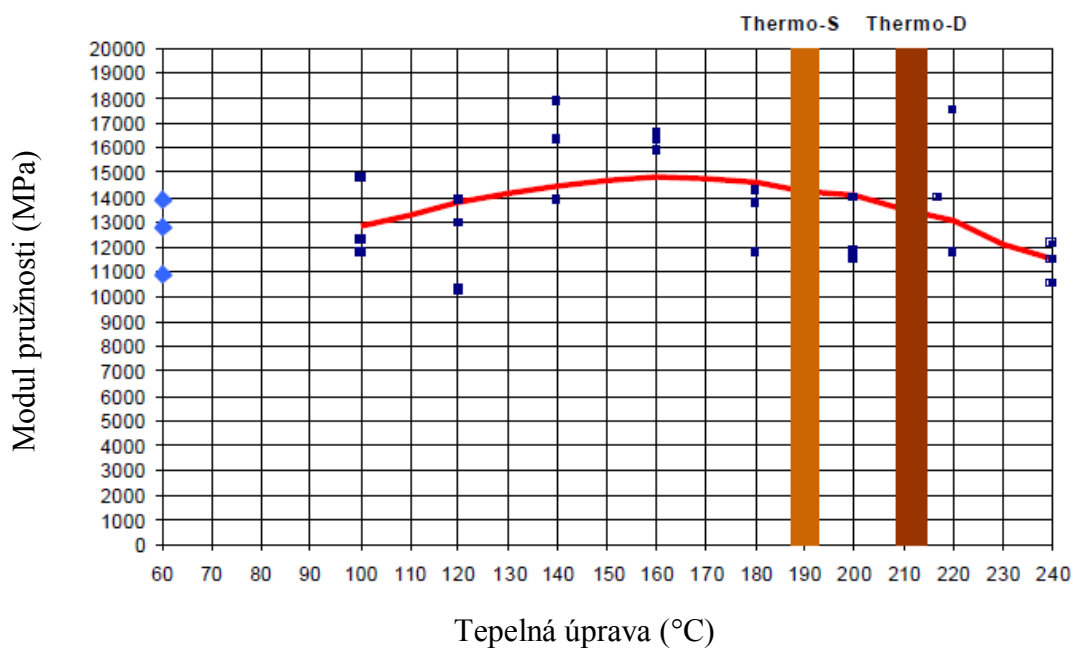
Graf 4 – Vliv tepelné úpravy na pevnost v tlaku podél vláken borovice při průměrné hustotě 420 kg.m^{-3} (ThermoWood Handbook, 2003)

4.2.2.4 Tvrdost

Tvrdost podle Brinella se stejně jako pevnost v ohybu a tlaku mírně zvyšuje a to v rozsahu od 100°C do 250°C. Pro praktičtější využití tento nárůst ale nemá větší význam (ThermoWood Handbook, 2003).

4.2.2.5 Modul pružnosti

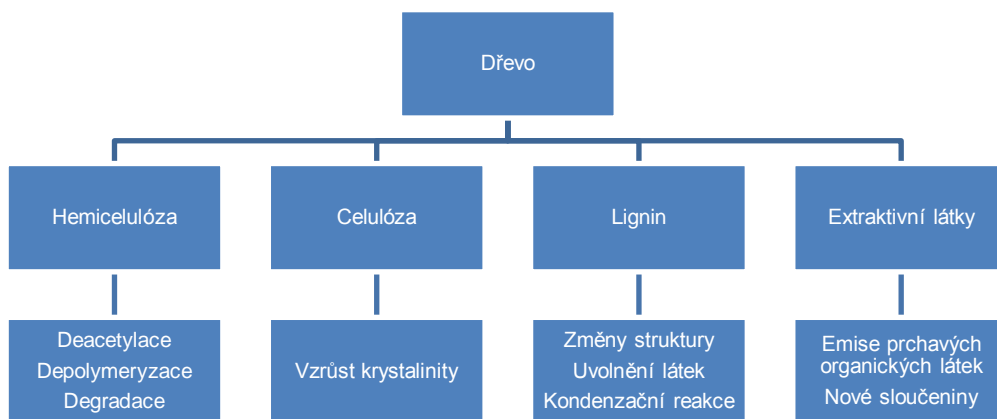
Vliv termických úprav na modul pružnosti je podobný, jako u pevnosti ohybu. Nabývá mírného zvýšení (10 – 15 %) při úpravě okolo 160°C, následně opět klesá a při tepelné úpravě nad 200°C opět klesá pod hodnotu neupraveného dřeva (ThermoWood Handbook, 2003).



Graf 5 - Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti borovice při průměrné hustotě 560 kg.m⁻³
(ThermoWood Handbook, 2003)

4.2.3 Chemické změny

Nevýznamné nebo méně významné změny v chemické struktuře dřeva nastávají už při teplotě 100°C ve spojení s méně intenzivními dehydratačními procesy. Významnější termolytické a termooxidační reakce nastávají až při teplotách nad 150°C - 170°C. Vyšší teploty v oblasti 150°C - 260°C způsobují částečné odbourání hemicelulóz i ligninu za vzniku vody, oxidu uhličitého, kyseliny mravenčí a octové a dalších látek, které se zapojují do následných kondenzačních reakcí. Tyto reakce pak dřevo modifikují v hydrofobnější a bioodolnější substanci. Průběh termických reakcí ve složkách dřeva je ovlivněn hlavně intenzitou přiváděného tepla (výškou teploty a časem jejího působení), podmínkami přístupu kyslíku ke dřevu, tlakem prostředí, druhem, tvarem a počáteční vlhkostí dřeva a aditivami ve dřevě, jako např. anorganické látky, ale i sorbované emise. Obecné dopady tepelné úpravy na chemickou strukturu dřeva vysvětluje následující obrázek:



Obr. 4 – Změny v chemické struktuře dřeva vlivem tepelné úpravy (Borůvka, 2015)

4.2.3.1 Celulóza

Celulóza je nosnou kostrou buněčných stěn dřeva (to obsahuje celulózu ze 40 – 50 %). Její termická degradace při teplotách 120°C - 220°C se pojí s dehydratačními a depolymerizačními reakcemi, které vedou k poklesu polymerizačního stupně, tvorbě glukózy, laktonů i různých plynů. Při výrobě termicky upraveného dřeva je nutné potlačit všechny depolymerizační reakce v řetězcích celulózy, z důvodu co možná největší eliminace poklesu

mechanických vlastností termodřeva. Rozklad celulózy nastává při 240°C - 350°C, což je nejvyšší teplota ze všech složek dřeva. Tuto vlastnost má celulóza díky své krystalické struktuře (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008; ThermoWood Handbook, 2003).

4.2.3.2 Hemicelulóza

Hemicelulózy tvoří 25 – 35 % dřeva a představují nejlabilnější stavební složku dřeva z hlediska termických úprav. Skládají se z více typů monosacharidů – xylóza, manóza, glukóza, galaktóza, glukorónová kyselina, arabinóza aj. Jejich rozklad probíhá v teplotním rozmezí od 200°C do 260°C a nejvíce z nich se rozkládají xylany. Iniciační teplota degradace hemicelulózy byla stanovena na 140°C (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008; ThermoWood Handbook, 2003).

4.2.3.3 Lignin

Lignin je z chemického hlediska nejstabilnější složkou dřeva díky jeho kovalentním vazbám., avšak jeho přesná struktura není do dnešních dnů známá. Jeho obsah ve dřevě se pohybuje mezi 20 až 30 %. Počáteční teplota degradace se pohybuje až kolem 200°C. Při 180°C - 260°C se z ligninu tvoří nízkomolekulové polární látky typu koniferylových a syringilových jednotek, probíhají termooxidační reakce vedoucí k nárůstu karbonylových struktur, ale objevují se i kondenzační reakce, kterými se naopak hydrofobnost dřeva zvyšuje (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008; ThermoWood Handbook, 2003).

4.2.3.4 Extraktivní látky

Extraktiva mají podíl ve dřevě menší než 5 %. Skládají se z terpenů, tuků, vosků, tříslovin aj. Extraktiva nejsou ve dřevě strukturálními komponenty a většina se během termické úpravy lehce vypaří při teplotách 100°C - 200°C v závislosti na typu sloučeniny. Z dřeva je lze odstranit použitím směsí středně polárních a nepolárních rozpouštědel (Kačíková, 2011; Reinprecht, 2008; ThermoWood Handbook, 2003).

4.3 Využití termicky upraveného dřeva

4.3.1 Využití v interiérech

Termicky upravené dřevo se často uplatňuje v interiérech hlavně pro obklady, vnitřní panely, kuchyňský a koupelnový nábytek, stěnové panely a lavičky v saunách. Speciální úpravy je možné použít i na hudební nástroje (Reinprecht, 2008).

4.3.2 Využití v exteriérech

Větší biologická odolnost a zlepšená rozměrová stabilita se hodně uplatňuje právě pro uplatnění do exteriéru. Ve větším rozsahu se však aplikuje jen do 3. třídy ohrožení bez trvalého kontaktu s terénem – což znamená pro obklady venkovních fasád, venkovní dveře, okna, oplocení nad úrovní terénu, zahradní nábytek bez kontaktu se zemí, altánky, pergoly apod. Do 4. třídy ohrožení (např. pro terasy k bazénům, zahradní nábytek v trvalém kontaktu se zemí, dětské hřiště, protihlukové bariéry apod. se běžně nedoporučuje, ale jisté druhy termodřeva se dají použít i pro tyto účely. Trvanlivější typy termodřev se dají použít i na terasy, nebo se dají umístit do zahrad (Reinprecht, 2008).

5 Zkoumané vlastnosti

Cílem této práce je otestovat je otestovat zkoušenou dřevinu *Fagus sylvatica* s různým stupněm tepelné úpravy (0°, 165°C a 210°C) na statickou pevnost v ohybu a rázovou houževnatost, a porovnat změnu barevného spektra pomocí spektrofotometru na vzorcích, které byly termicky upraveny v desetistupňových intervalech od 140°C do 210°C.

Doplňkovými měřeními vlastnostmi byla vlhkost u vzorků, které byly měřeny z pevnostního hlediska, a dynamický modul pružnosti u vzorků, které byly zkoušeny na statickou pevnost v ohybu.

5.1 Rázová houževnatost

Rázovou, nebo také dynamickou houževnatostí se rozumí veličina, která nám udává množství spotřebované práce v joulech, potřebné k přeražení tělesa o daném průřezu. Celkově se hodnota houževnatosti udává v J/cm², či daJ/cm², jako vedlejší jednotka se dá použít kpm/cm² – kilopondmetr na centimetr čtvereční. Přepočítání mezi těmito dvěma veličinami se udává jako 1 kpm/cm² = 0,980 665 daJ/cm² (Novák, 1970). Vztah, který používáme pro stanovení hodnoty houževnatosti při dané vlhkosti je tento:

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad [1]$$

kde:

W – přerážecí práce spotřebovaná na přeražení tělesa v J

b, h – příčné rozměry tělesa v cm

Pro přepočítání houževnatosti pro 12 % vlhkost, využíváme následujícího vzorce:

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

kde:

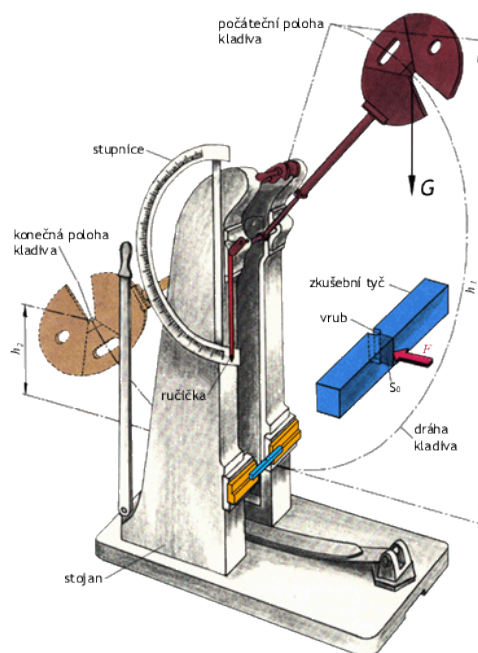
A_w – rázová houževnatost při vlhkosti w v $J \cdot cm^{-2}$

α – opravný vlhkostní koeficient, pro všechny dřeviny se udává 0,02

w – vlhkost dřeva v době zkoušky v %

Doporučuje se pro lepší pohlcení energie a směrodatnější hodnotu houževnatosti dodržovat štíhlostní poměr mezi vzdálenostmi podpěr u přerážecího kladiva a výškou tělesa, který je určen jako $\frac{l_0}{h} \geq 12$. Při zkoušce se také musí brát v potaz fakt, zda síla působí v radiálním nebo v tangenciálním směru, neboť při nárazu kladiva ve směru radiálním dosahuje rázová houževnatost v závislosti na typu dřeviny o 25 – 50 % větších hodnot. (Gandelová, 2012). U zkoušek houževnatosti těchto měření přerážecí práce působila v tangenciálním směru.

Zařízením, sloužícím k měření této veličiny, je Charpyho kladivo, které se používá pro měření houževnatosti nejen u dřeva, ale i u kovů, v těchto případech mluvíme o zkouškách vrubové houževnatosti. Princip fungování Charpyho kladiva nejlépe popisuje následující obrázek pouze s tím rozdílem, že na dřevěné vzorky se nefrézuje vyobrazený vrub:



Obr. 5 – Princip fungování Charpyho kladiva (www.strojari.wz.cz)

Při zkušebním kmitu (bez přeráženého tělesa) nám stupnice stroje ukáže nulovou hodnotu, teprve při spotřebování práce kladiva na přeražení vzorku na stupnici odečteme příslušnou hodnotu. Po přeražení tělesa je nutné ještě vyhodnotit, zda se jedná o lom vláknitý, či tupý. Lom vláknitý provází tělesa, která dosahují vysoké houževnatosti a jsou víceméně bez vad, naproti tomu tupý lom se objevuje u těles, která jsou křehká, nebo v sobě obsahují nějakou vadu (např. lom v místě suku či vnitřní praskliny).

Obecně vzato lze říci, že rázová, či také dynamická houževnatost nemá nijak velký praktický význam, využije se maximálně při zkoumání namáhání např. u sportovního náčiní, či u paprsků kol apod. Mnohem většího významu nabývá statická pevnost v ohybu, ve s pojení s dynamickým modelem pružnosti (Novák, 1970).

5.2 Statická pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu je největší míra napětí, které může dřevo snést po krátkou dobu, je-li zatěžováno plynule a pomalu jako nosník. Je to důležitá vlastnost z hlediska posuzování pevnosti trámů, fošen či prken ve stavebnictví (Novák, 1970).

V našem případě se jednalo o třibodový ohyb při zatížení kolmo na vlákna v tangenciálním směru, zkušebním zařízením byl přístroj UTS 50. Vztahem, kterým určíme maximální napětí při dané vlhkosti, které vzorek schopen snést (nazývané také jako mez pevnosti), je následující:

$$\sigma_{w,\max} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad [3]$$

kde:

F_{\max} – síla působící na těleso v N

l_0 – vzdálenost podpěr v mm

b – šířka tělesa v mm

h – výška tělesa v mm

Pro přepočet pevnosti na 12 % vlhkost je využito následujícího vzorce:

$$\sigma_{12} = \sigma_{w,\max}(1 + \alpha(w - 12)) \quad [\text{MPa}] \quad [4]$$

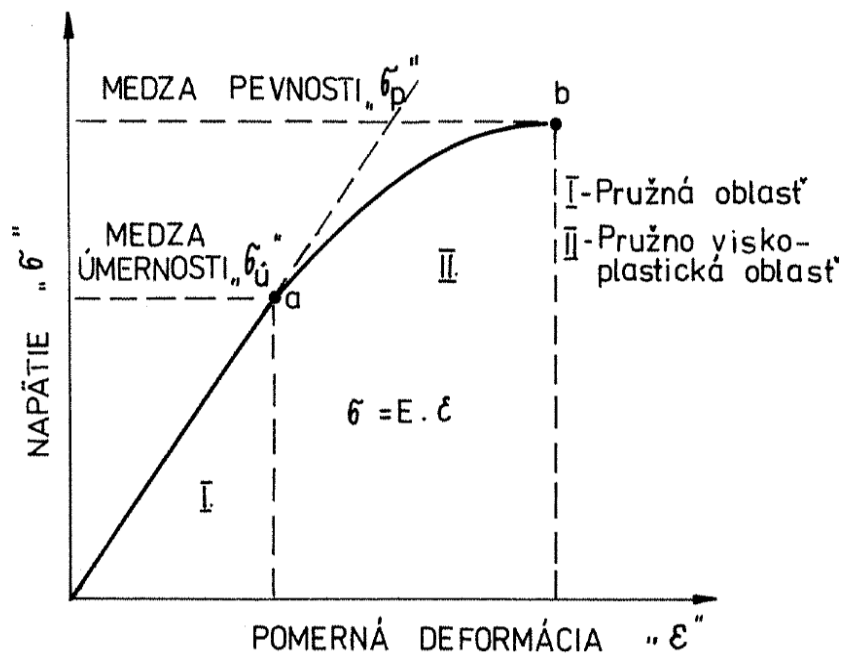
kde:

$\sigma_{w,\max}$ – mez pevnosti při vlhkosti w v MPa

α – opravný vlhkostní koeficient, pro všechny dřeviny se udává 0,04

w – vlhkost dřeva v době zkoušky v %

Kromě meze pevnosti rozlišujeme ještě mez úměrnosti, ve které dochází k pružným deformacím (tzn. materiál je schopen se vrátit sám do původního stavu). Mez úměrnosti se pohybuje cca kolem 50 – 65 % z meze pevnosti. Mezi mezí úměrnosti a mezí pevnosti dochází k deformacím plastickým, kdy se po uvolnění zatížení materiál není schopen vrátit sám do původního stavu. Nad mezí pevnosti dochází už k naprosté destrukci materiálu. Kromě deformací pružných a plastických rozeznáváme ještě deformaci pružnou v čase, kdy deformace tělesa a návrat do původního stavu nenastává okamžitě, ale až po nějaké době. Průběh těchto deformací demonstruje následující graf:



Graf 6 – Diagram napětí – deformace (Požgaj et al., 1997)

5.3 Moduly pružnosti

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřeba na to, aby se vyvolala žadaná deformace. Rozeznáváme moduly pružnosti při namáháních normálových (tah, tlak, ohyb – tzv. Youngovy moduly pružnosti), a při namáháních tangenciálních - krut, smyk (Gandelová, 2012; Požgaj et al. 1997).

5.3.1 Modul pružnosti ve statickém ohybu

Odvození modulu pružnosti v ohybu vychází z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem. Pro náš případ se modul pružnosti při vlhkosti w spočívá podle následujícího vzorce:

$$E_{w,stat} = \frac{F.l_0^3}{4.b.h^3.\delta y} \text{ [MPa]} \quad [5]$$

kde:

F – zatěžující síla v N

l_0 – vzdálenost podpěr v mm

b – šířka tělesa v mm

h – výška tělesa v mm

δy – výška tělesa v mm

Následuje přepočet pro 12 % vlhkost:

$$E_{12,stat} = \frac{E_{w,stat}}{(1-\alpha(w-12))} \text{ [MPa]} \quad [6]$$

kde:

$E_{w, stat}$ – statický modul pružnosti při vlhkosti w v MPa

α – opravný vlhkostní koeficient, pro všechny dřeviny se udává 0,01

w – vlhkost dřeva v době zkoušky v %

5.3.2 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti je nedestruktivní metoda, kterou se dá modul pružnosti změřit, slouží také k posouzení kvality dřevního sortimentu. Dá se změřit buď ultrazvukovou, nebo rezonanční metodou, v našem případě bylo využito ultrazvuku pomocí přístroje společnosti Fakopp, Ultrasonic Timer.

Ultrazvuková metoda spočívá v přiložení dvou sond měřícího zařízení na měřený vzorek v určité vzdálenosti od sebe. Přístroj pak skrz vzorek vysílá impuls z jedné sondy, který pak druhá sonda přijímá a přístroj v mikrosekundách měří čas, za který impuls urazí danou dráhou z jedné sondy do druhé. Po odečtení času a změření vzdálenosti mezi sondami se spočte rychlost, kterou impuls vzorkem proletěl podle vztahu:

$$v = \frac{s}{t \cdot 1000} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [7]$$

kde:

s – vzdálenost mezi sondami v mm

t – čas průchodu impulsu v μs

S vypočtenou rychlostí a hustotou se poté dynamický modul pružnosti při vlhkosti w dá spočítat podle vztahu:

$$E_{w, dyn} = 1\,000\,000 \cdot \rho \cdot v^2 \quad [\text{MPa}] \quad [8]$$

kde:

ρ – hustota vzorku v kg.m^{-3}

v – rychlost průchodu impulzu v m.s^{-1}

Následně můžeme přepočítat na modul pružnosti pro 12 % vlhkost:

$$E_{12,\text{dyn}} = E_{w,\text{dyn}}(1 - \alpha(w - 12)) \quad [\text{MPa}] \quad [9]$$

kde:

$E_{w,\text{dyn}}$ – dynamický modul pružnosti při vlhkosti w v MPa

α – opravný vlhkostní koeficient, pro všechny dřeviny se udává 0,01

w – vlhkost dřeva v době zkoušky v %

5.4 Hustota

Vzhledem k hygroscopicitě je stanovení hustoty dřeva poměrně obtížné, na rozdíl od jiných materiálů. I přes výrazný vliv vlhkosti na hodnotu hustoty je to jedna z nejvýznamnějších charakteristik, která výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Rozlišujeme několik typů hustoty – nejčastější hodnotou je určení hustoty při určité vlhkosti, která je dána vztahem:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [\text{kg. m}^{-3}] \quad [10]$$

kde:

m_w - hmotnost vzorku v g

V_w – objem vzorku v m^3

Kromě této hustoty při určité vlhkosti, rozeznáváme hlavně ještě hustotu při 12 % vlhkosti (poměr hmotnosti a objemu dřeva při 12 % vlhkosti), která je nejdůležitějším údajem při porovnávání fyzikálních a mechanických vlastností různých dřevin. Dále také rozeznáváme hustotu dřevní substance, která je dána

poměrem hmotnosti a objemu dřevní substance, hustotu dřeva v absolutně suchém stavu (poměr hmotnosti a objemu absolutně suchého dřeva), redukovanou hustotu (poměr hmotnosti absolutně suchého dřeva a objemu při určité vlhkosti w) a též konvenční (nebo také redukovanou v čerstvém stavu) hustotu, která je dána poměrem hmotností dřeva v absolutně suchém stavu a maximálním objemem, který dřevo nabude, pokud vlhkost překročí mez hygroscopicity. Tato veličina je velmi vhodná pro technologické výpočty v lesním a dřevozpracujícím průmyslu, zvláště při přejímkách dříví (Gandelová, 2012; Horáček, 2008).

V této práci však budeme počítat pouze s hustotou dřeva při určité vlhkosti w (dle vztahu [10]), a jejím přepočtem na 12 % vlhkost dle následujícího vztahu:

$$\rho_{12} = \rho_w \cdot \left(1 - \frac{(1-K) \cdot (w-12)}{100}\right) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad [11]$$

kde:

ρ_w – hustota při vlhkosti w v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

K – koeficient objemového sesychání při změně vlhkosti o 1 %, udává se $K = 0,85$, při hustotě vyjádřené v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

w – vlhkost dřeva v době měření hustoty

5.5 Vlhkost

Vlhkost definuje množství vody ve dřevě. Rozlišujeme dva typy vlhkostí; vlhkost absolutní, která je dána poměrem hmotnosti vody ku hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu, a vlhkost relativní, která je dána poměrem hmotnosti vody ku hmotnosti vlhkého dřeva. Vzhledem k porovnávání různých mechanických vlastností v této práci počítáme s vlhkostí absolutní, která se spočítá dle následujícího vzorce:

$$w_{\text{abs}} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad [12]$$

kde:

m_w – hmotnost vlhkého tělesa v g

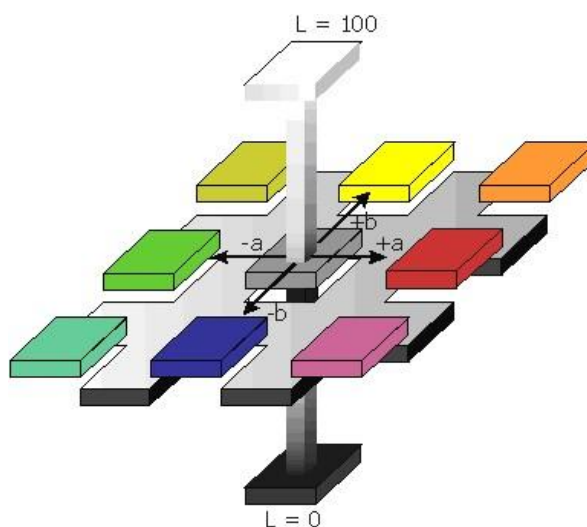
m_0 – hmotnost absolutně suchého tělesa v g

5.6 Barevné spektrum

Vnímání barevného spektra je hodně subjektivní záležitost, proto se musel ustanovit jednotný systém, které toto vnímání bude sjednocovat. Tento systém v současné době definují tři trichromatické prostory – RGB, XYZ, CIELAB (CIELUV). Tato práce se bude věnovat měření prostoru CIELAB pomocí spektrofotometru (Babiak). Tento prostor je definován pomocí tří veličin:

- **L** – měrná světlost – určuje nakolik je barva světlá či tmavá
- **a** – odstín mezi červenou a zelenou
- **b** – odstín mezi žlutou a modrou

Tyto veličiny spektrofotometr vyhodnocuje na základě zachycení jednotlivých vlnových délek odrazu světla od příslušné vzorky. Na počátku celého měření je ovšem potřeba spektrofotometr řádně kalibrovat zkouškou na čistě bílý povrch (Babiak). Princip kolorimetrického prostoru $L^*a^*b^*$ popisuje následující obrázek:



Obr. 6 – Kolorimetrický prostor $L^*a^*b^*$ (Babiak)

Naměřené hodnoty L, a, b jsme potom vyhodnocovali jako rozdíl hodnot před, a po měření parametry ΔL , Δa a Δb . Celkovou změnu barevného spektra potom můžeme vyjádřit parametrem ΔE , který je definován dle následujícího vzorce podle systému CIE1976. Tento parametr čím větší hodnoty nabývá, tím větší nastává změna v barevném spektru. Vyjadřujeme ho vzorcem:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad [-] \quad [13]$$

6 Metodika

6.1 Zkušební vzorky

6.1.1 Vzorky pro pevnostní zkoušky

Na pevnostní zkoušky bylo použito celkem 360 vzorků buku lesního. Všechny vzorky byly vyřezány z jednoho kmene, ze 2 čtyřmetrových fošen, kdy jedna obsahovala nepravé jádro, které tedy obsahuje přesně polovina vzorků (180 kusů). Ve finále můžeme tedy vzorky podle přítomnosti či nepřítomnosti nepravého jádra a podle stupně tepelné úpravy rozdělit do šesti skupin po třiceti vzorcích. Tyto skupiny popisuje následující obrázek: vlevo jsou vzorky bez nepravého jádra, vpravo vzorky s jádrem, odshora dolů jsou vzorky v pořadí: tepelně neupravený vzorek, upraveno na 165°C, upraveno na 210°C.



Obr. 7 – Přehled zkoušených vzorků

Vzorky na pevnostní zkoušky byly dle norem ČSN 49 0115 – Drevo, zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe a ČSN 49 0117 – Drevo, rázová húževnatost v ohybe nařezány na rozměr 300x20x20 mm, s odchylkou několika desetin milimetru. Na vzorcích se poté kvůli stanovení hustoty změnil průřez s přesností na setiny milimetru posuvným měřítkem, délka s přesností 0,5 milimetru klasickým pravítkem a hmotnost na laboratorních vahách s přesností jedné setiny gramu.

6.1.2 Vzorky pro vyhodnocení barvy

Vzorky pro vyhodnocení změny barevného spektra můžeme znovu rozdělit do dvou skupin, podle přítomnosti či nepřítomnosti nepravého jádra. Dále se vzorky dělí podle stupně tepelné úpravy na 8 skupin – vzorky byly upraveny na 140°C, 150°C, 160°C, 170°C, 180°C, 190°C, 200°C, 210°C. U skupiny vzorků s nepravým jádrem se pro každý stupeň tepelné úpravy upravilo deset vzorků, u skupiny bez nepravého jádra se upravovalo vzorků šest, celkem jsme tedy měřili 128 vzorků.

Na každém vzorku bylo poté vyznačeno tři, nebo šest kružnic o průměru 50 mm tak, aby plocha uvnitř co možná nejvíce charakterizovala barvu vzorku. Na tato vyznačená místa se poté přikládá spektrofotometr, a konalo se měření. Vzorky se měřily dvakrát – před tepelnou úpravou a po ní. Přibližné rozměry vzorků činí 185 x 42 x 20 mm ± 3 mm. Následující fotografie zobrazuje všechny typy měřených vzorků – horní řada představuje vzorky s nepravým jádrem, dolní řada jsou vzorky bezjádrové. Zleva doprava jsou potom vzorky seřazeny podle stupně tepelné úpravy – od 140°C do 210°C. Další obrázek zobrazuje vyznačené zóny měření.



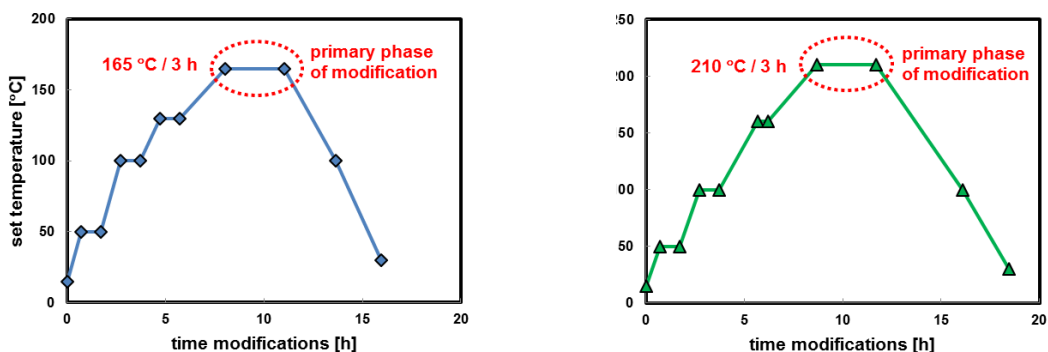
Obr. 8 – Vzorky pro vyhodnocení změny barevného spektra



Obr. 9 – Rozvržení zón měření pro spektrofotometr

6.1.3 Tepelná úprava vzorků

Tepelná úprava vzorků probíhala ve fakultním středisku v Kostelci n. Černými lesy v zařízení Jihlavské firmy Katres Atyp KHT. Vzorky určené pro tepelnou úpravu se nejdříve naklimatizovaly na rovnovážnou vlhkost v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu $65 \% \pm 5 \%$ a teplotou $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Poté byl proveden proces tepelné úpravy v atmosféře vzduchu podle postupu patentovaného společností FTA (Finnish ThermoWood Association). První skupina se upravovala na $165 \text{ }^\circ\text{C}$, skupina druhá se upravovala na $210 \text{ }^\circ\text{C}$. Po ukončení procesu tepelné úpravy se vzorky aklimatizovaly v prostředí laboratoře s relativní vlhkostí vzduchu $45 \% \pm 5 \%$ a teplotou $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Borůvka, 2015). Následující diagramy znázorňují časový průběh tepelné úpravy vzorků:



Obr. 10 – Diagramy procesu tepelné úpravy vzorků (Borůvka, 2015)

Vzhledem k povaze termodřeva, u kterého tepelná úprava snižuje hygroskopicitu a rovnovážnou vlhkost se vzorky neklimatizovaly na 12 % vlhkost, ale hodnoty mechanických zkoušek uváděné ve výsledcích jsou hodnoty naměřené při dané vlhkosti w v době zkoušky. Pouze u neupravených vzorků byly hodnoty přepočteny na 12 % vlhkost pro porovnání s literaturou.

6.2 Rázová houževnatost

Zkoušky rázové houževnatosti byly prováděny na dvou Charpyho kladivech. Vzorky upravené na 165 °C a 210 °C byly přeráženy na menším, se stupnicí na 50 J. Vzhledem k tomu, že u některých vzorků při úpravě na 165 °C se hodnoty přerážecí práce vyšplhaly ke 40 J, bylo kvůli přesnějšímu stanovení hodnot na přerážení neupravených vzorků zvoleno větší kladivo, s hlavou a stupnicí na 150 J. Zkouška byla provedena dle normy ČSN 49 0117 - Dřevo. Rázová houževnatost v ohybe.

Zkušební těleso se umístí na podpěry tak, aby kladivo dopadlo v podélném středu tělesa a zároveň aby při dopadu uhodilo v jeho tangenciálním směru. Spotřebovanou přerážecí práci poté odečteme z analogického číselníku s přesností na 0,5 J. Po zastavení kladiva a vrácení do počáteční polohy nesmíme vždy zapomenout vrátit ručičku číselníku do její počáteční polohy.



Obr. 11 – Přerážecí Charpyho kladiva se stupnicí a hlavami na 50 J a 150 J.

Výsledná hodnota rázové houževnatosti a její přepoččet pro 12 % vlhkost u neupravených vzorků byly poté vypočteny dle vztahů [1] a [2].

6.3 Statická zkouška v ohybu

Zkouška byla prováděna dle normy ČSN 49 0115 - Drevo. Zist'ovanie medze pevnosti v statickom ohybe. Tělesa byla zkoušena tříbodovým ohybem na zkušebním přístroji UTS 50 s rozsahem síly až 50 kN.



Obr. 12 – Zkušební stroj UTS 50 uzpůsobený pro ohybové zkoušky

Zkouška na ohyb v našem případě byla dimenzována tak, aby se zkoušení přerušilo v případě náhlého poklesu síly o více než 10 % a celý proces probíhal v rozmezí 60 – 120 sekund. Rychlost poklesu ohýbacího prvku nám tedy oscillovala mezi 5 až 9 mm/min. Při délce těles 300 mm se rozpětí podpěr nastavilo na 240 mm, ohýbací prvek dopadal na podélný střed tělesa. Počítačová jednotka nám poté odečetla maximální zatěžovací sílu F_{\max} , poměrnou deformaci ϵ a spočítala mez pevnosti σ_{\max} podle vzorce [3] a modul pružnosti ve statickém ohybu E_m podle [5]. Poté se ještě dopočítaly hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti pro 12 % vlhkost u neupravených vzorků podle vzorců [4] a [6].

6.4 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti byl stanovován přístrojem maďarské společnosti FAKOPP – Ultrasonic timerem. Měření tímto přístrojem je založeno na průchodu ultrazvuku materiálem mezi dvěma sondami, kdy se sondy přitlačí v určitých vzdálenostech na vzorku od sebe a měří se čas, který impulsu trvá, než skrz vzorek projde.



Obr. 13 – Fakopp Ultrasonic Timer (Fakopp UT Users Guide)

V našem případě byly osově souměrně se středem vzorku ve vzdálenostech 6, 10, 14, 18 a 22 cm na vzorek přikládány sondy přístroje, a na displeji se odečítal čas v mikrosekundách, za který impuls prošel vzorkem. Následná rychlost průchodu impulsu vzorkem a dynamický modul pružnosti byly poté spočteny podle vztahů [7] a [8], na konec se ještě stanovil přepočít modulu pružnosti u neupravených vzorků pro 12 % vlhkost podle [9].

6.5 Barevné spektrum

Barevné spektrum bylo měřeno spektrofotometrem firmy Konica Minolta CM-700d/600d, pomocí kterého byly měřeny parametry L, a, b. Na začátku měření bylo nutné spektrofotometr kalibrovat zkouškou na čistě bílou čočku, poté mohlo následovat vlastní měření. Měření probíhalo přiložením pracovní části přístroje na vyznačené kružnice, přístroj poté provedl zkoušku a odečetly se hodnoty L, a, b z displeje spektrofotometru. Vzorky se měřily dvakrát, jednou před tepelnou úpravou a podruhé po ní. Následně jsme z naměřených dat určili parametr odchylky ΔE podle [13].



Obr. 14 – Spektrofotometr CM-700d/600d (www.konicaminolta.eu)

6.6 Hustota

Hustota při dané vlhkosti byla zjišťována podle normy ČSN 49 0108 - Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach. U těles se před započítáním mechanických zkoušek změřily rozměry s přesností 0,01 mm posuvným měřítkem a hmotnost s přesností 0,01 g. Výsledná hustota se poté spočítala podle vztahu [10] a následně u neupravených vzorků přepočítala na 12 % vlhkost podle vztahu [11].

6.7 Vlhkost

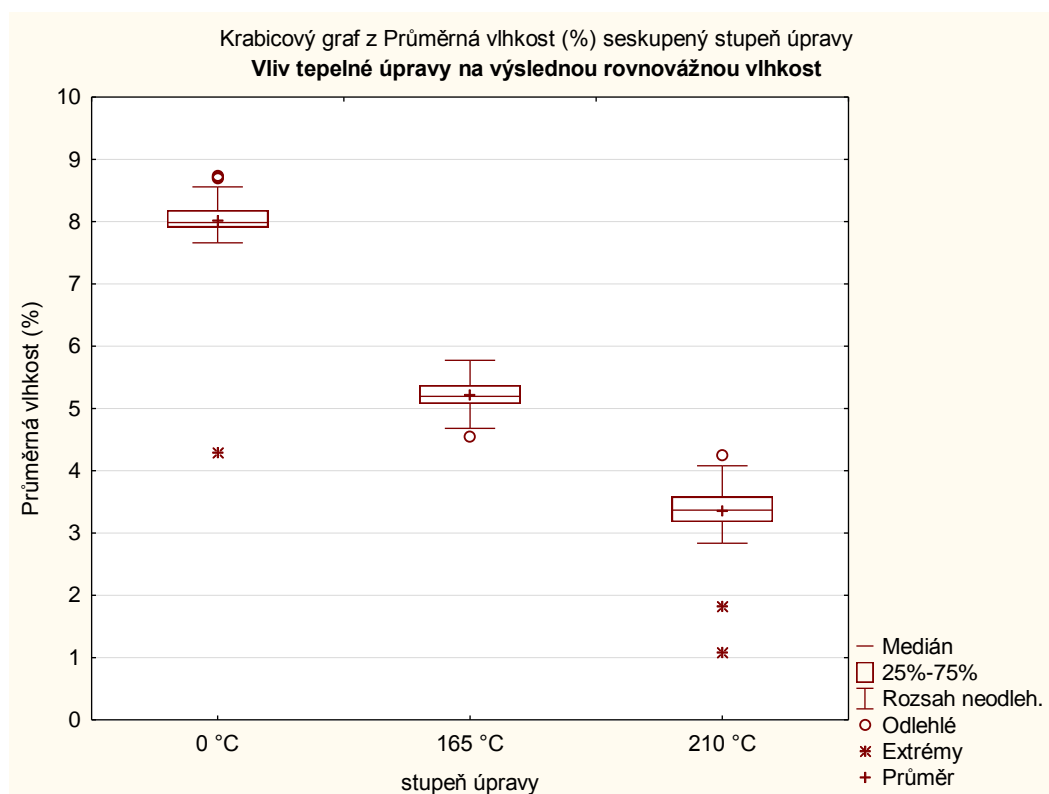
U měření vlhkosti se postupovalo dle normy ČSN 49 0103 - Drevo. Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických skúškach. Po ukončení zkoušek na rázovou houževnatost a statický ohyb se z porušených těles na každém konci odřezalo tělísko o velikosti 20 x 20 x 30 milimetrů, které v sobě neobsahovalo žádnou vadu ani nemělo žádnou větší trhlinu. Vzhledem k těmto požadavkům a povaze zkoušky na rázovou houževnatost bylo z některých těles možno odřezat pouze jeden vzorek na zjištění vlhkosti. Ta se poté zvažila na laboratorních vahách s přesností jedné setiny gramu a dala vysušit do sušárny na teplotu $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ po dobu dvou dnů, aby bylo zajištěno dostatečné vyschnutí vzorků. Ty se po vyschnutí zvažily okamžitě po vytažení ze sušárny, aby bylo zabráněno dodatečnému nabrání vzdušné vlhkosti. Výsledná relativní vlhkost se poté vypočítala podle vztahu [12].

7 Výsledky a diskuse

Vzhledem k velké variabilitě postupů, kterými se termodřevo vyrábí, nebyly hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností naměřené u tepelné úpravy na 165 °C a 210 °C porovnávány s literaturou, ani se nepřepočítávaly pro 12 % vlhkost, pouze se porovnávaly ve vztahu k sobě samým a k neupraveným vzorkům. S literaturou byly porovnávány pouze vzorky neupravené, u kterých byly hodnoty vlastností přepočteny na 12 % vlhkost pro lepší srovnání, jakých fyzikálních a mechanických vlastností námi měřená dřevina dosahovala.

7.1 Vlhkost

Po tepelné úpravě se vzorky odvezly do prostředí fakultní laboratoře, kde se nechaly aklimatizovat při teplotě 20 °C ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 45 % ± 5 %.



Graf 7 – Vliv tepelné úpravy na rovnovážnou vlhkost

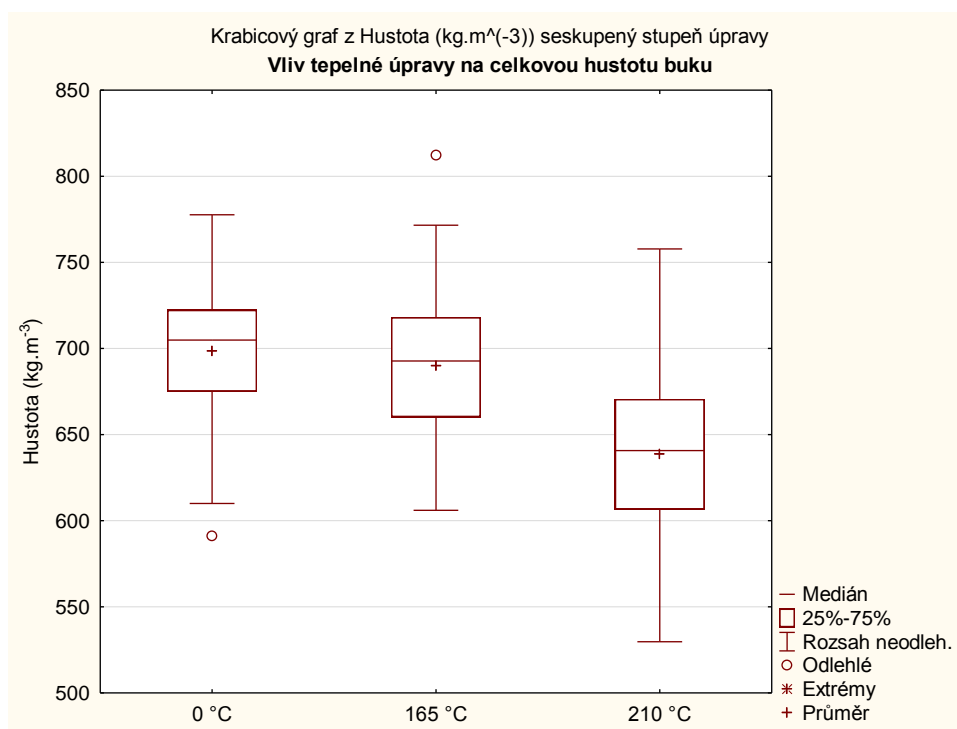
Tab. 5 – Statistické údaje rovnovážné vlhkosti při různých tepelných úpravách

Vlhkost (%)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	7,99	5,22	3,44
Medián	7,99	5,19	3,37
Sm. Odchylka	0,48	0,25	0,75
Var. Koeficient (%)	6,03	4,85	21,85

Z vyobrazených údajů můžeme vyvodit, že se zvyšující se tepelnou úpravou klesá hladina rovnovážné vlhkosti. U úpravy při 165 °C jsme zjistili pokles této hladiny v průměru o 35 %, u úpravy na 210 °C hladina poklesla o 57 %. Tento jev můžeme přičíst odbourávání hydrofilních skupin během termické úpravy.

7.2 Hustota

Dle Reinprechta, 2008 má termická úprava za následek odbourávání hemicelulózy a některých typů extraktivních látek, které vedou k poklesu hmotnosti a objemu, nicméně pokles hmotnosti je několikanásobně vyšší, což vede i k poklesu hustoty jako takové.

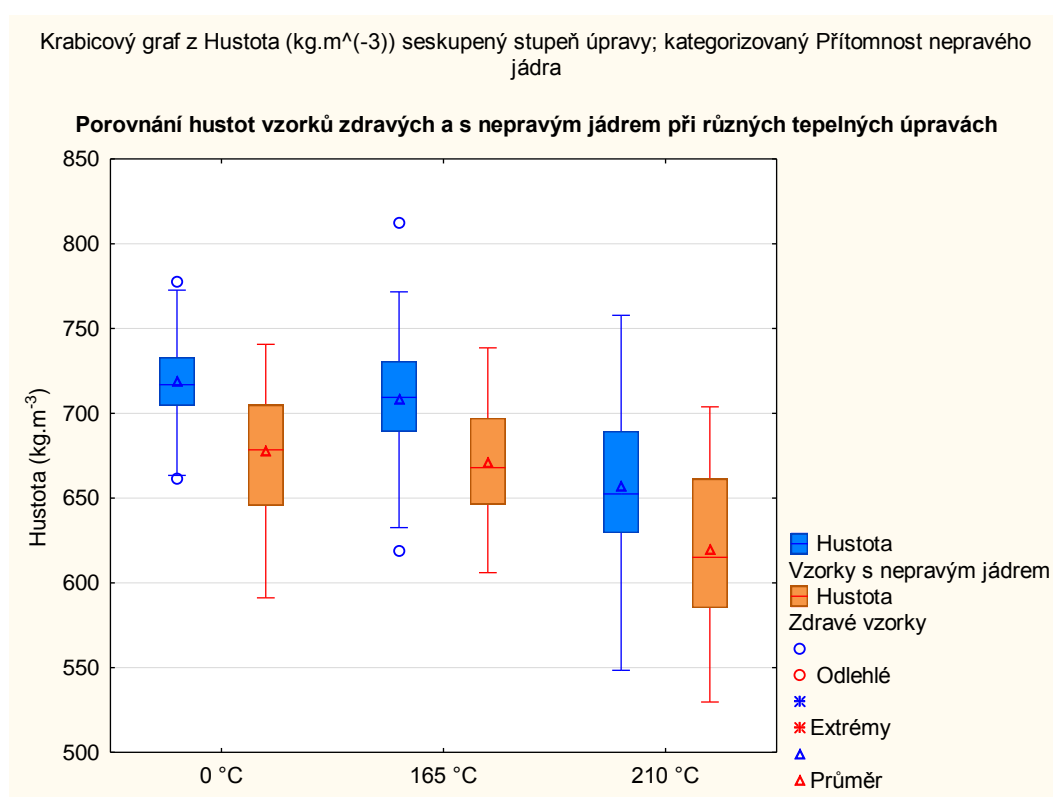


Graf 8 – Vliv tepelné úpravy na celkovou hustotu vzorků

Tab. 6 – Statistické údaje hustoty bukových vzorků

Celková hustota (kg.m ⁻³)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	698,63	689,93	638,67
Medián	704,90	692,76	640,77
Sm. Odchylka	36,57	37,61	46,95
Var. Koeficient (%)	5,23	5,45	7,35

Z výše uvedených údajů můžeme usoudit, že úprava při 165 °C nemá na změnu hustoty takový vliv, jako úprava při 210 °C. Tam jsme zjistili pokles průměrné hodnoty o 8,5 %, naproti úpravě při 165 °C, kde pokles činil pouze necelého 1,5 %.



Graf 9 – Vliv tepelné úpravy na hustotu vzorek zdravých a s nepravým jádrem

Graf č. 9 nám zobrazuje porovnání hustoty vzorků zdravého dřeva a vzorků s nepravým jádrem. Je patrné, že nepravé jádro při všech stupních úpravy má větší hustotu. Nicméně nemůžeme tento jev definovat nijak přesně, neboť vzorky s nepravým jádrem nebyly kompletně tvořené nepravým jádrem, jejich podíl ve dřevě nebyl jednotný. Stejně tak u celkové hustoty záleží na tom, jak máme široké letokruhy, jaký je v nich podíl jarního a letního dřeva a na dalších faktorech.

7.3 Rázová houževnatost

Tepelná modifikace vzorků by měla učinit dřevo křehčím a méně odolným vůči rázovým vlivům (Reinprecht, 2008). To zároveň můžeme ještě posoudit podle poměru typů lomu, které dělíme na tupý a vláknitý.



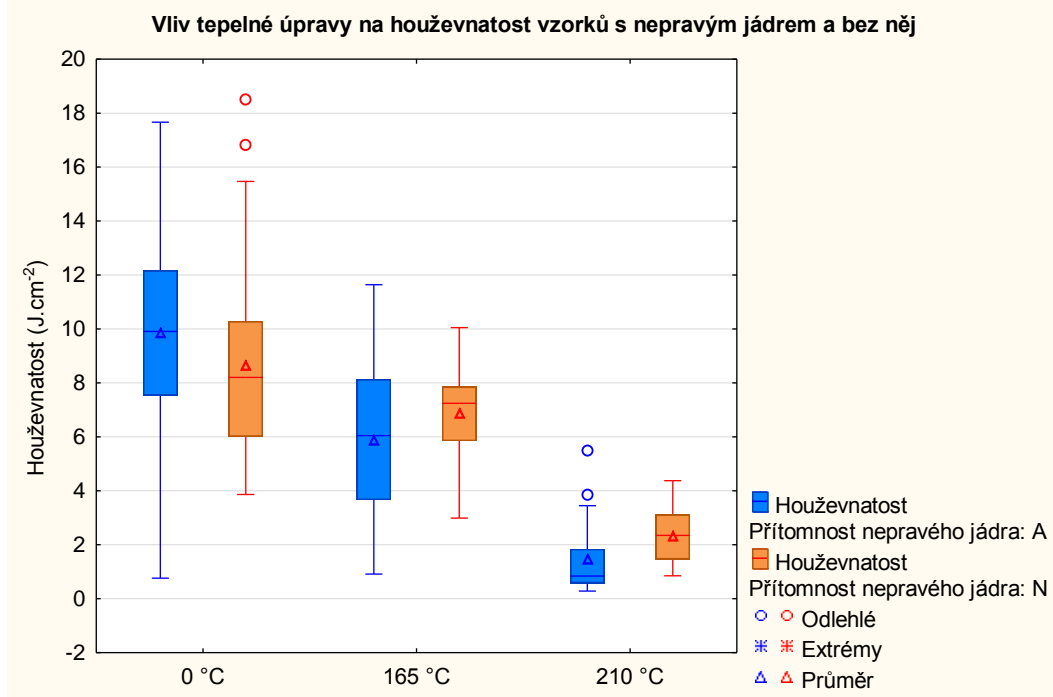
Graf 10 – Vliv tepelné úpravy na rázovou houževnatost

Tab. 7 – Statistické údaje houževnatosti při různých tepelných úpravách

Houževnatost (J.cm-2)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	9,28	6,43	1,91
Medián	9,03	6,71	1,59
Sm. Odchylka	3,72	2,44	1,17
Var. Koeficient (%)	40,14	38,03	61,35

Z výše uvedených údajů můžeme vyvodit, že tepelná úprava snižuje rázovou odolnost dřeva o docela podstatnou hodnotu. U prvního stupně úpravy nastal pokles průměrných hodnot o 31 %, druhý stupeň tuto hodnotu snížil téměř o 80 %. V této statistice je zahrnuto všech 180 vzorků určených na přerážení, nyní si stanovíme rozdíly v houževnatosti u vzorků s nepravým jádrem a bez něj.

Krabicový graf z Houževnatost (J.cm-2) seskupený stupeň úpravy; kategorizovaný Přítomnost nepravého jádra



Graf 11 – Vliv tepelné úpravy na houževnatost vzorků s nepravým jádrem a bez něj

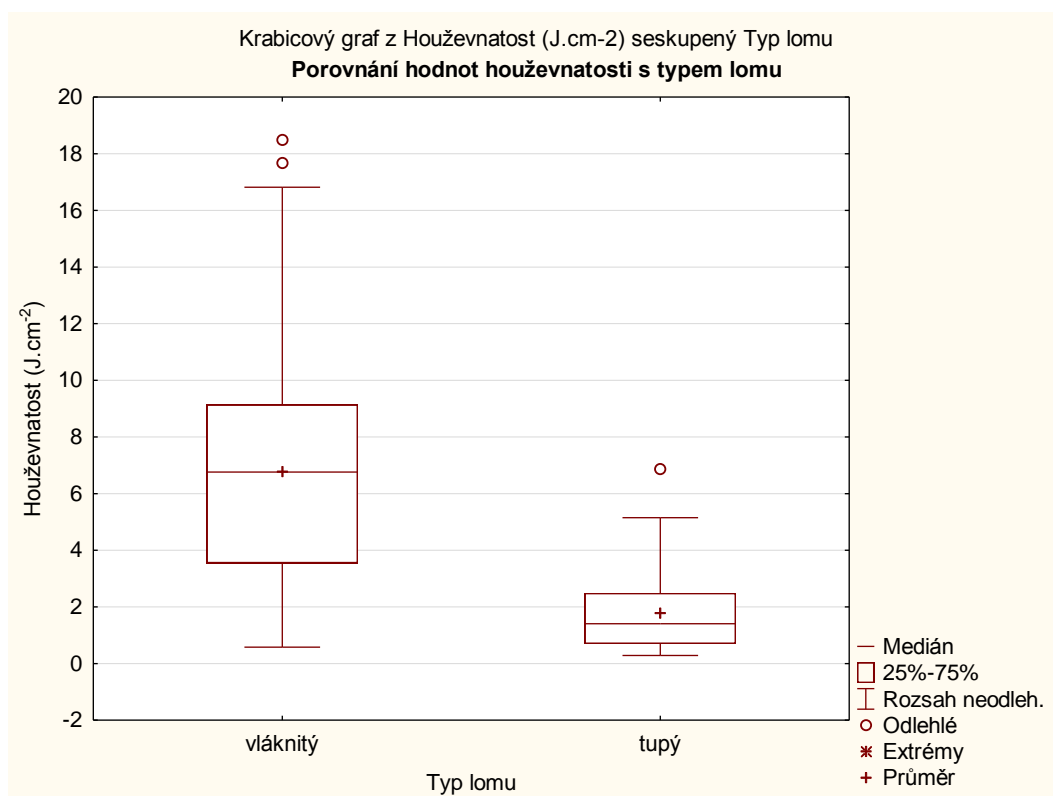
Tab. 8 – Statistické údaje houževnatosti vzorků s nepravým jádrem

Houževnatost vzorků s nepravým jádrem (J.cm⁻²)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	9,88	5,89	1,48
Medián	9,91	6,03	4,47
Sm. Odchylka	3,91	0,54	1,02
Var. Koeficient (%)	39,58	9,14	68,70

Tab. 9 – Statistické údaje houževnatosti zdravých vzorků

Houževnatost zdravých vzorků (J.cm⁻²)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	8,67	6,90	3,01
Medián	8,20	7,25	3,01
Sm. Odchylka	3,42	1,76	0,25
Var. Koeficient (%)	39,42	25,46	8,32

Z grafu č. 11 je patrné, že u neupravených vzorků dosahovaly lepší houževnatosti vzorky s nepravým jádrem cca o $1,2 \text{ J.cm}^{-2}$, tato skutečnost se naopak otáčí u prvního i u druhého stupně tepelné úpravy, kdy u prvního stupně úpravy houževnatost vzorků s nepravým jádrem klesá cca o 1 J.cm^{-2} , u druhého stupně úpravy je to pak o $1,5 \text{ J.cm}^{-2}$. Tento fakt můžeme přičíst skutečnosti, že v nepravém jádru se tvoří vlivem vnějších abiotických činitelů větší koncentrace thyl, jádrových látek a dalších extraktiv, což má za následek zvýšenou hustotu a houževnatost dřeva. Tyto látky však vlivem tepelné modifikace degradují, a výsledná houževnatost klesá pod hodnotu houževnatosti vzorků bez nepravého jádra.



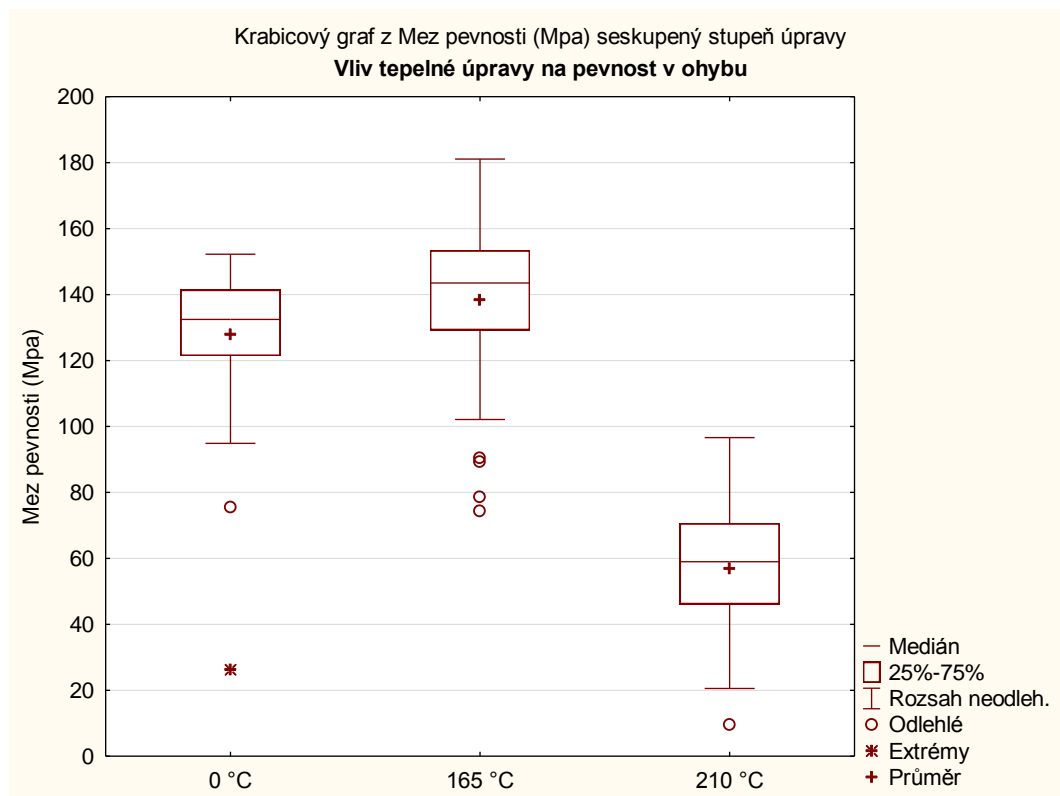
Graf 12 – Porovnání hodnot houževnatosti s typem lomu

Dle Požgaje et al. (1993) rozlišujeme porušení vzorků při zatížení v ohybu kolmo na vlákna u této zkoušky na tupé a vláknité. Tupé lomy provázejí zkoušky, kde nebyla naměřena příliš velká houževnatost, naopak lom vláknitý je spojen se vzorky, které dokážou být velmi odolné vůči rázu. Tento poznatek se nám

povedlo potvrdit, neboť minima jsou u obou typů vzorků stejná, ale průměrné hodnoty houževnatosti u vzorků, kde byl lom po zkoušce vyhodnocen jako tupý, činily cca $1,7 \text{ J.cm}^{-2}$, oproti vzorkům s lomem vláknitým, kde tato průměrná hodnota činila $6,6 \text{ J.cm}^{-2}$.

7.4 Ohybová pevnost

Dle ThermoWood Handbook (2003) tepelná úprava zvyšuje mez pevnosti při úpravě na 165 °C cca o 10 %, při úpravě na 210 °C tato pevnost zase naopak o řečených 10 % klesá pod hodnotu meze pevnosti neupraveného dřeva. Tyto zkoušky byly prováděny na borovici.

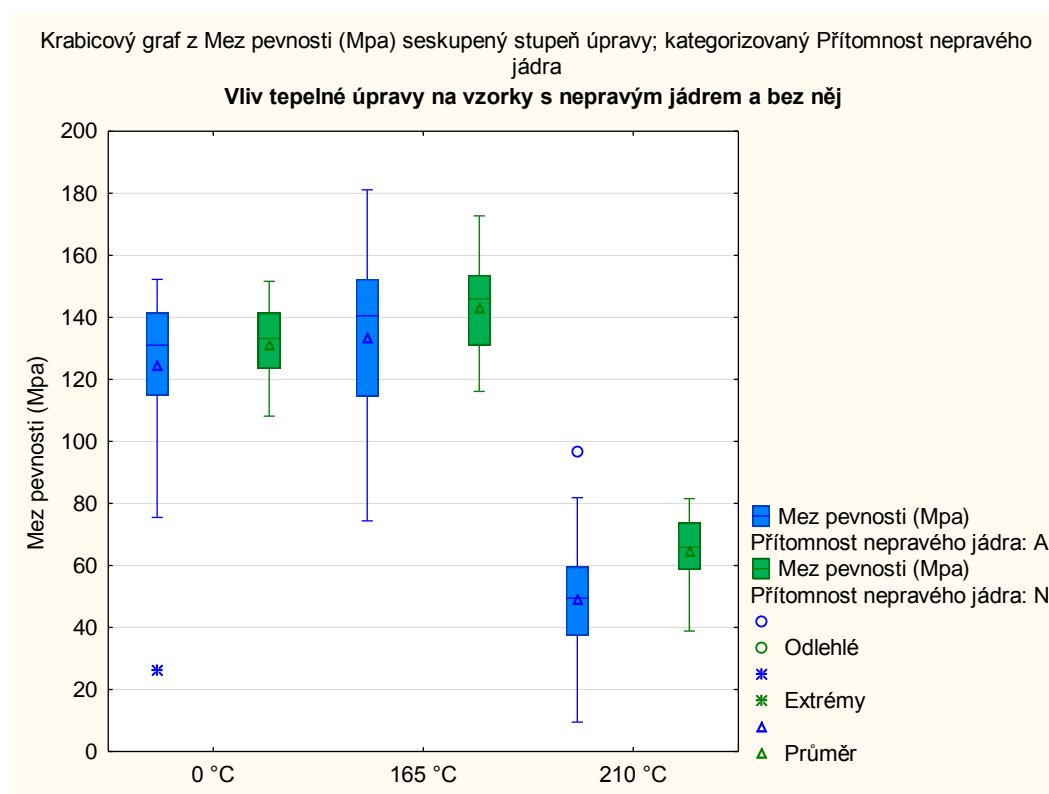


Graf 13 – Vliv tepelné úpravy na pevnost v ohybu

Tab. 10 – Statistické údaje ohybové pevnosti při různých tepelných úpravách

Ohybová pevnost (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	127,88	138,30	56,96
Medián	132,48	143,50	59,00
Sm. Odchylka	19,89	22,35	17,47
Var. Koeficient (%)	15,55	16,16	30,66

Z výše uvedených údajů můžeme potvrdit fakt, že u úpravy na 165 °C ohybová pevnost opravdu vzrostla, nicméně průměrný vzrůst o 8,2 % nebude pro praktické účely nijak využitelný. Tento jev můžeme přičíst nejspíše poklesu rovnovážné vlhkosti, která má na pevnost vliv a slabé degradaci hemicelulóz, díky které si dřevo ještě uchovává svoji pevnost. U úpravy při 210 °C ohybová pevnost poklesla velmi rapidním způsobem, a to o 55,5 % oproti neupravenému dřevu. Tento fakt má na svědomí skutečnost, že při těchto teplotách už dochází k velké degradaci chemické i anatomické struktury dřeva.



Graf 13 – Vliv tepelné úpravy na vzorky s nepravým jádrem a bez

Tab. 11 – Statistické údaje pevnosti vzorků s nepravým jádrem

Mez pevnosti vzorků s nepravým jádrem (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	124,52	133,50	49,25
Medián	131,00	140,55	49,46
Sm. Odchylka	25,14	27,23	18,86
Var. Koeficient (%)	20,19	20,39	38,29

Tab. 12 – Statistické údaje pevnosti zdravých vzorků

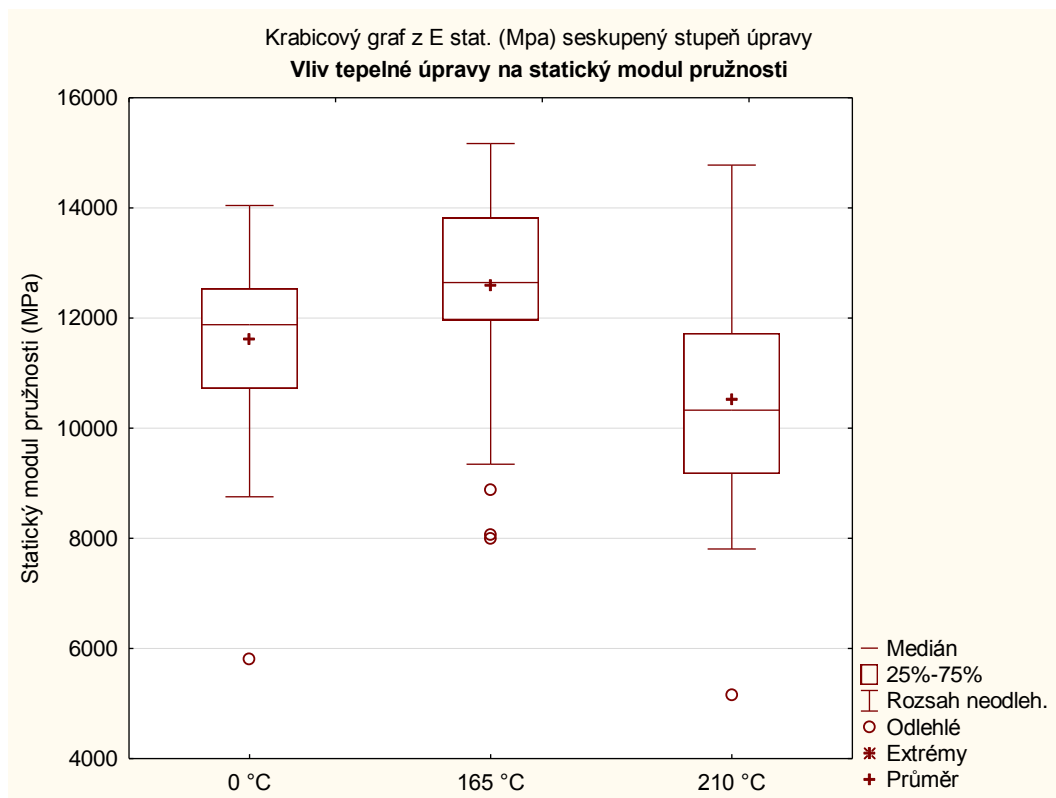
Mez pevnosti zdravých vzorků (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	131,24	143,10	64,66
Medián	133,16	146,01	65,86
Sm. Odchylka	11,69	14,55	11,65
Var. Koeficient (%)	8,90	10,17	18,01

Z výše naměřených hodnot můžeme usoudit, že degradace nepravým jádrem snižuje mez pevnosti dřeva, nejmarkantnější rozdíl byl u druhého stupně úpravy, kde tato pevnost poklesla o 24 %, u neupravených vzorků byl tento pokles pouhých 5 %. Vzorky s nepravým jádrem také dosahovaly velkého rozptylu, což je dáno nestejným podílem nepravého jádra ve vzorku.

7.5 Modul pružnosti

7.5.1 Statický modul pružnosti

Stejně jako u pevnosti v ohybu můžeme, dle ThermoWood Handbook (2003), pozorovat trend lehkého vzrůstu modulu pružnosti při prvním stupni úpravy na 165 °C, při druhém stupni tato hodnota opět rapidně klesá. Tato měření dle ThermoWood Handbook byla stejně jako u ohybu prováděna na borovici s průměrnou hustotou 560 kg.m⁻³.

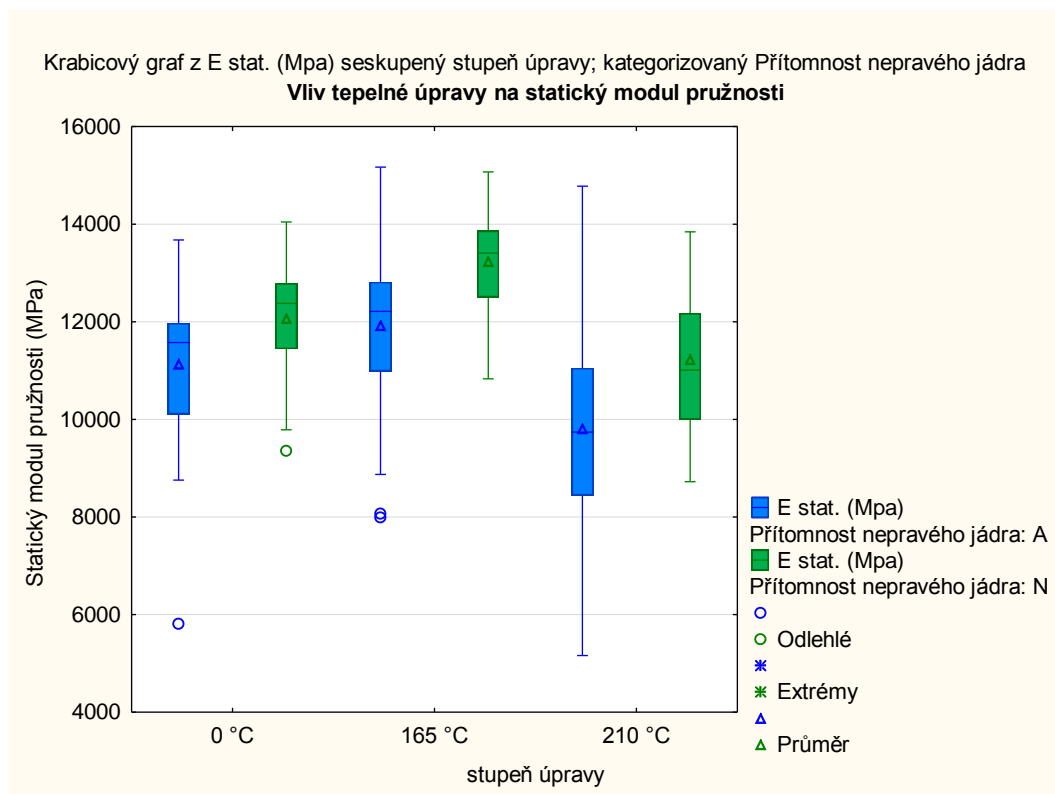


Graf 14 – Vliv tepelné úpravy na statický modul pružnosti

Tab. 13 – Statistické údaje statického modulu pružnosti při různých tepelných úpravách

Statický modul pružnosti (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	11609,88	12590,57	10523,88
Medián	11880,50	12646,50	10328,00
Sm. Odchylka	1407,31	1585,49	1824,24
Var. Koeficient (%)	12,12	12,59	17,33

Z grafu č. 14 můžeme stejně jako u zkoušky ohybu usoudit, že první stupeň tepelné úpravy má pozitivní vliv na modul pružnosti, průměrný nárůst hodnot činí 8,5 %. Naopak druhý stupeň úpravy snížil průměrnou hodnotu oproti neupravenému dřevu o 9,5 %, což nepředstavuje takový propad oproti procentickému poklesu meze pevnosti.



Graf 15 – Vliv tepelné úpravy na statický modul pružnosti vzorků s nepravým jádrem a bez

Tab. 14 – Statistické údaje statického modulu pružnosti vzorků s nepravým jádrem

Statický modul pružnosti vzorků s nepravým jádrem (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	11150,20	11932,30	9817,40
Medián	11576,50	12214,00	9740,50
Sm. Odchylka	1517,33	1765,97	1833,91
Var. Koeficient (%)	13,61	14,80	18,68

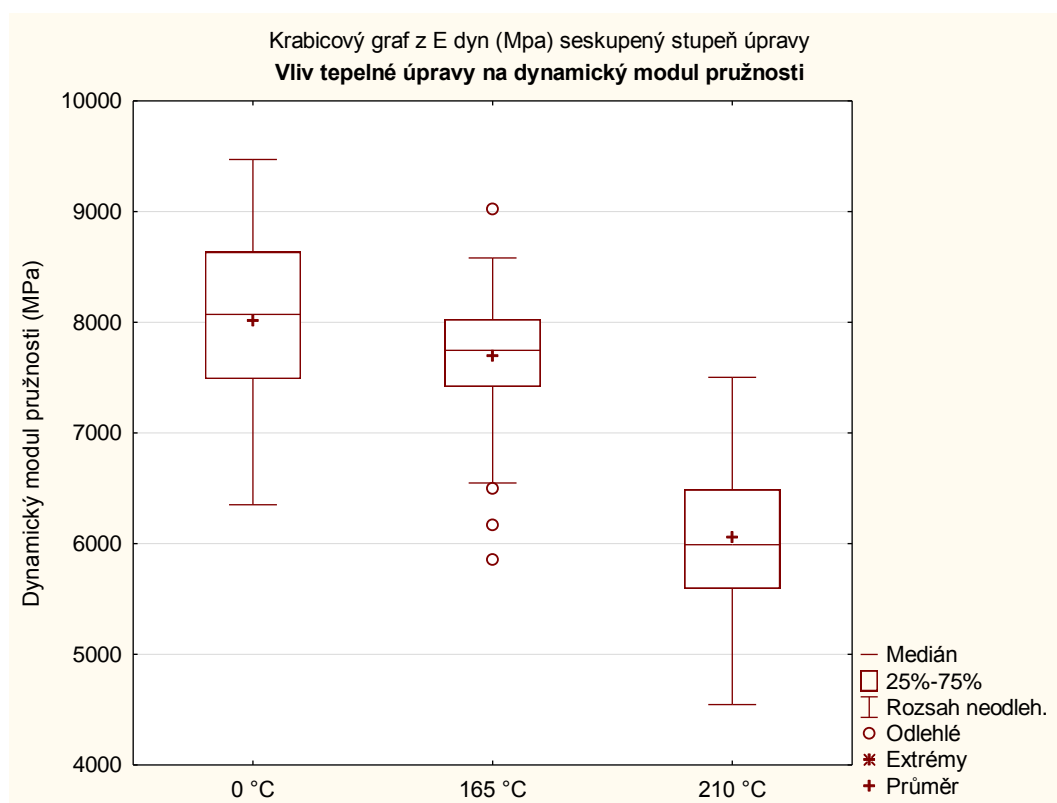
Tab. 15 - Statistické údaje statického modulu pružnosti zdravých vzorků

Statický modul pružnosti zdravých vzorků (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	12069,57	13248,83	11230,37
Medián	12377,00	13408,50	11009,50
Sm. Odchylka	1111,81	1020,91	1514,67
Var. Koeficient (%)	9,21	7,71	13,49

Stejně jako u meze pevnosti v ohybu vidíme, že nepravé jádro snižuje modul pružnosti a zvětšuje jeho rozptyl. Pokles hodnot modulu pružnosti byl opět nejvyšší u druhého stupně úpravy na 210 °C, kde tato hodnota v průměru poklesla o 12,5 % oproti vzorkům bez nepravého jádra.

7.5.2 Dynamický modul pružnosti

Dle Reinprechta (2008) má dynamický modul pružnosti podobný průběh ve vztahu ke stupni úpravy, jako modul statický, k přihlédnutím také k závislosti na úbytku hmotnosti.

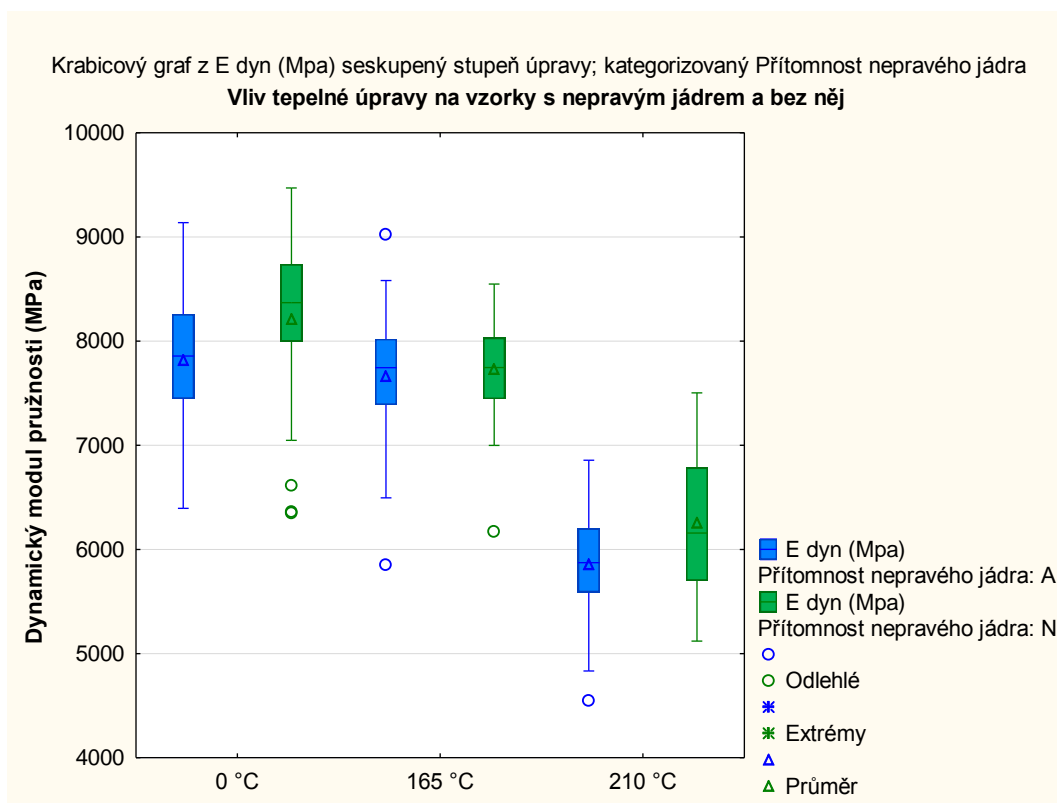


Graf 16 – Vliv tepelné úpravy na dynamický modul pružnosti

Tab. 16 – Statistické údaje dynamického modulu pružnosti

Dynamický modul pružnosti (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	8012,77	7696,80	6057,24
Medián	8071,41	7746,90	5990,43
Sm. Odchylka	796,56	586,64	658,80
Var. Koeficient (%)	9,94	7,62	10,88

Na rozdíl od pevnosti v ohybu a statického modulu pružnosti, průměrné hodnoty modulu dynamického nevykazují zvýšené hodnoty při prvním stupni úpravy na 165 °C. U tohoto stupně modul pružnosti poklesla průměrná hodnota o 4 %, druhý stupeň vykazuje drastičtější snížení o 24,5 %. Domněnku stanovenou Reinprechtem (2008), či ThermoWood Handbook (2003) se nám potvrdit nepodařilo. To může být způsobeno jednak odlišným typem dřeviny a jiným procesem úpravy, které ovlivnily hodnotu hustoty potřebné pro výpočet dynamického modulu pružnosti.



Graf 17 – Vliv tepelné úpravy na dynamický modul pružnosti vzorků s nepravým jádrem a bez

Tab. 17 – Statistické údaje dynamického modulu pružnosti vzorků s nepravým jádrem

Dynamický modul pružnosti vzorků s nepravým jádrem (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	7815,97	7662,51	5855,22
Medián	7856,68	7745,60	5872,89
Sm. Odchylka	720,74	651,56	537,90
Var. Koeficient (%)	9,22	8,50	9,19

Tab. 18 – Statistické údaje dynamického modulu pružnosti zdravých vzorků

Dynamický modul pružnosti zdravých vzorků (MPa)	0 °C	165 °C	210 °C
Průměr	8209,56	7731,09	6259,26
Medián	8369,57	7747,25	6157,51
Sm. Odchylka	819,81	511,29	705,04
Var. Koeficient (%)	9,99	6,61	11,26

Stejně jako u předchozích zkoušek, i tady má nepravé jádro negativní vliv na měřené vlastnosti, i když ne tak značný. Největšího poklesu hodnot dosahují vzorky při druhém stupni úpravy, a to o 6,5 %. Naopak nejmenšího poklesu dosahují vzorky při prvním stupni úpravy, průměrný rozdíl činí necelé jedno procento. Rozdíl u neupravených vzorků je 4,8 %.

7.6 Porovnání neupravených vzorků s literaturou

Pro porovnání s literaturou byly vybrány vzorky, které nebyly tepelně upraveny, ani neobsahovaly nepravé jádro. U těchto 60 vzorků se tedy vybraly klíčové vlastnosti, naměřené hodnoty se přepočítaly dle řádných vzorců pro 12 % vlhkost a porovnály s literaturou.

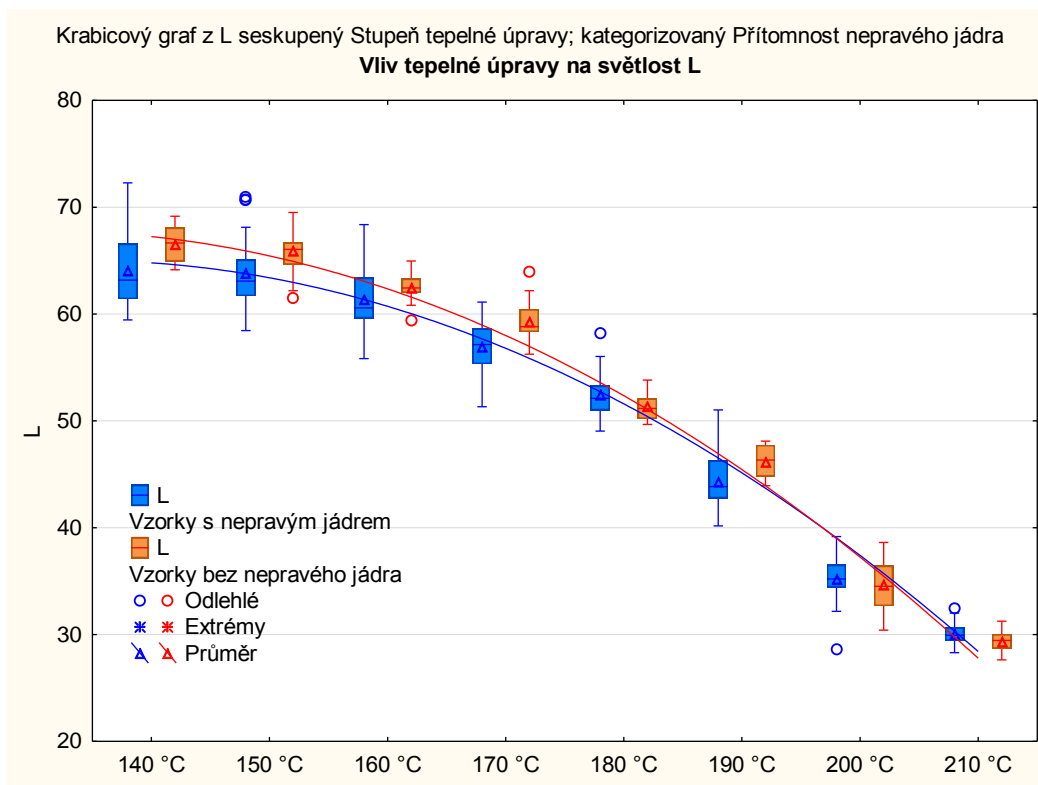
Tab. 19 – Porovnání fyzikálně-mechanických vlastností s literaturou

	Hustota (kg.m⁻³)	Rázová houževnatost (J.cm⁻²)	Mez pevnosti v ohybu (Mpa)	Modul pružnosti v ohybu (MPa)
Naměřené hodnoty	733	8	109	11 580 (statický)
Gandelová, 2012	720	8	109	-
Lexa, 1952	710	10	105	16 000
Kollmann, 1951	720	10	123	16 000
Novák, 1970	720	10	123	16 000
Požgaj et al., 1997	-	8,1	124	12 966
Wagenführ, 2000	720	10	123	16 000

Námi měřený buk v porovnání s jinými autory dosáhl o něco horších mechanických vlastností, přesto jsou tyto hodnoty spolu dobře porovnatelné.

7.7 Barevné spektrum

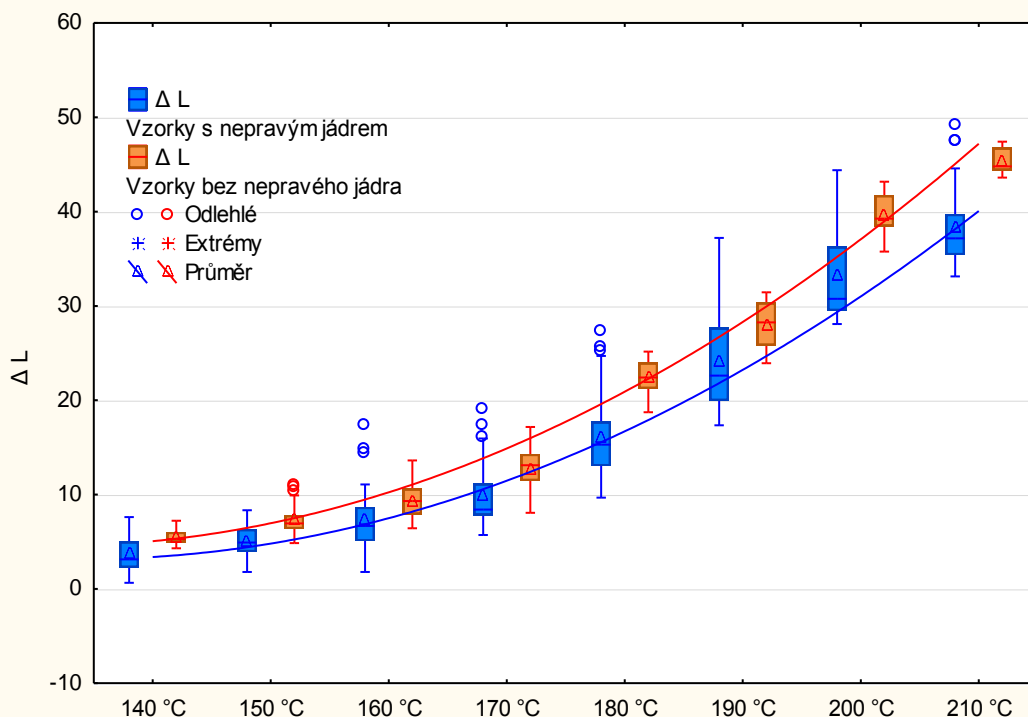
Na první, lidskému oku jasně rozeznatelný pohled je nejmarkantnější změna u světlosti, neboli parametru L. Čím tato hodnota nabývá větších hodnot, tím tmavší vzorek dostáváme.



Graf 18 – Vliv tepelné úpravy na světlost L

Z uvedeného grafu vidíme, že vzorky s nepravým jádrem díky svému vzhledu v neupraveném stavu byly při stejné tepelné úpravě tmavší, při teplotách kolem 200 °C se tento rozdíl už téměř vyrovnal.

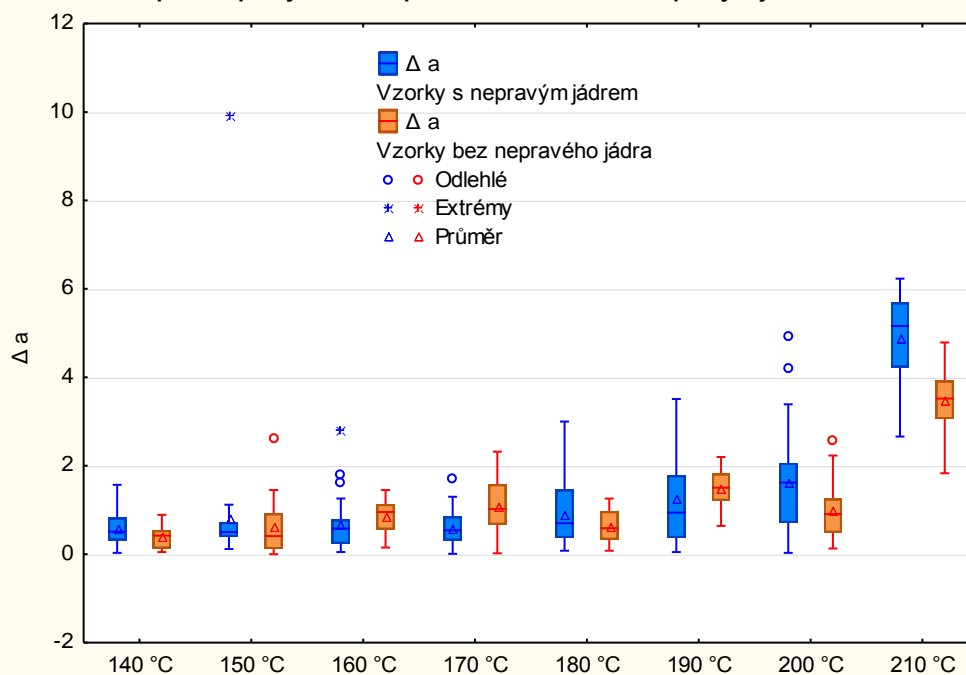
Krabicový graf z ΔL seskupený Stupeň tepelné úpravy; kategorizovaný Přítomnost nepravého jádra
Vliv tepelné úpravy na rozdíl světlosti L vzorků s nepravým jádrem a bez



Graf 19 - Vliv tepelné úpravy na rozdíl světlosti L vzorků s nepravým jádrem a bez

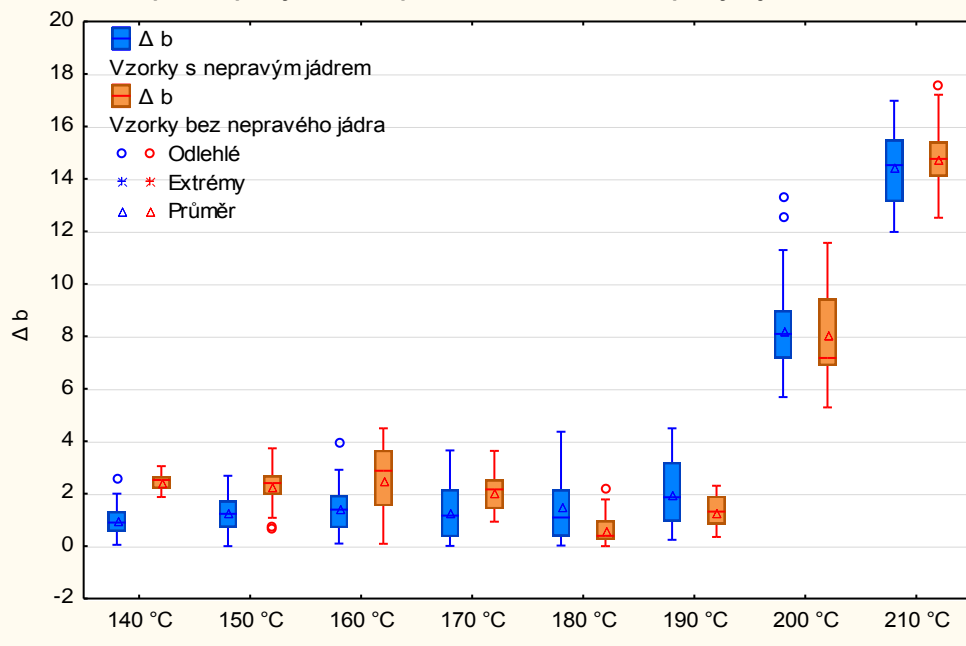
Graf č. 19 reprezentuje rozdíl světlosti L před a po tepelné úpravě. Tento rozdíl se samozřejmě zvyšuje s narůstajícím stupněm tepelné úpravy, zároveň ale můžeme vidět, že vzorky s nepravým jádrem nedosahovaly takového rozdílu, jako vzorky zdravé. Tento rozdíl můžeme přičíst pravděpodobně změnám v chemické struktuře nepravého jádra, zejména oxidaci tríslovin či změnám v jiných extraktivech.

Krabicový graf z Δa a seskupený Stupeň tepelné úpravy; kategorizovaný Přítomnost nepravého jádra
Vliv tepelné úpravy na rozdíl parametru a vzorků s nepravým jádrem a bez



Graf 20 - Vliv tepelné úpravy na parametr Δa vzorků s nepravým jádrem a bez

Krabicový graf z Δb a seskupený Stupeň tepelné úpravy; kategorizovaný Přítomnost nepravého jádra
Vliv tepelné úpravy na rozdíl parametru b vzorků s nepravým jádrem a bez

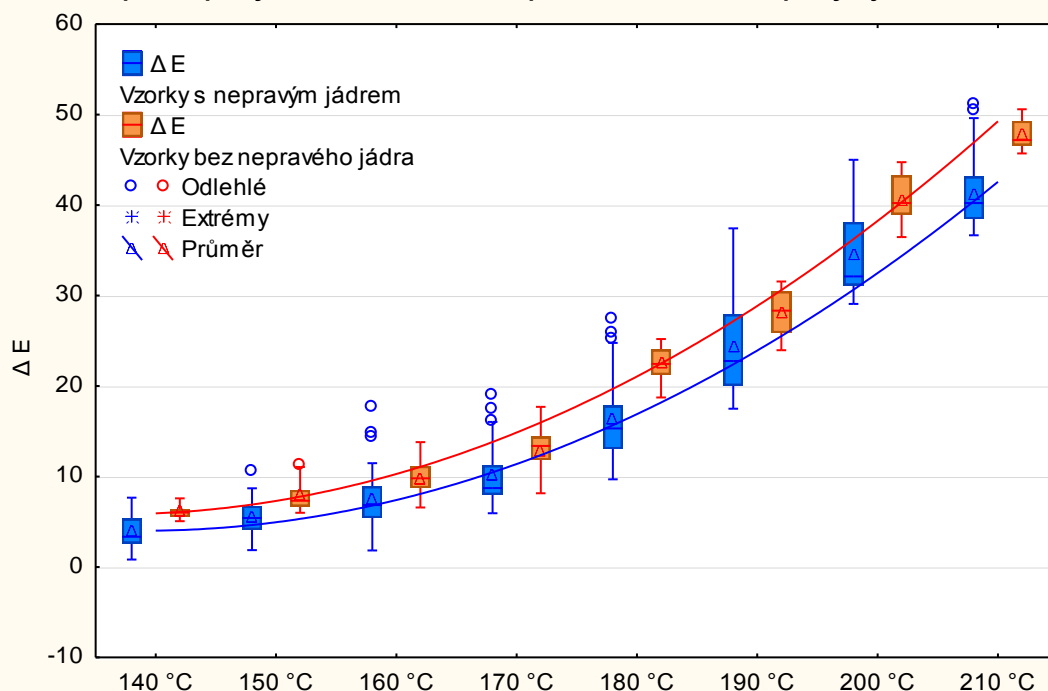


Graf 21 - Vliv tepelné úpravy na parametr Δb vzorků s nepravým jádrem a bez

Grafy č. 20 a 21 zobrazují změnu v parametrech „a“ a „b“. Přibližně do 200 °C se lehce rozšiřoval rozptyl, ale průměrné hodnoty těchto rozdílů se příliš neměnily. Při teplotách 200 °C a výše ale už docházelo k radikálnímu zvýšení těchto hodnot.

Krabicový graf z ΔE seskupený Stupeň tepelné úpravy; kategorizovaný Přítomnost nepravého jádra

Vliv tepelné úpravy na změnu barevného spektra ΔE vzorků s nepravým jádrem a bez



Graf 22 – Vliv tepelné úpravy na změnu barevného spektra ΔE vzorků s nepravým jádrem a bez

Tento poslední graf nám znázorňuje celkovou změnu všech tří parametrů, tedy i celého prostoru. Čím je tato hodnota vyšší, k tím větší změně došlo a můžeme vidět, že tato diference roste v průběhu všech stupňů tepelných úprav. Vzorky bez nepravého jádra konstantně dosahovaly v celém průběhu úprav změn hodnot o něco vyšších, než vzorky s nepravým jádrem.

8 Závěr

Buk je jedna z našich nejvíce využívaných listnatých dřevin, proto je termická úprava jedna z možností, jak využití této dřeviny ještě rozšířit.

Při porovnání fyzikálních a mechanických vlastností jsme zjistili, že termicky upravený buk dosahuje snížené rovnovážné vlhkosti, tedy i zvýšené rozměrové stability, což je z hlediska fyzikálních vlastností velké plus. U vlastností mechanických naopak už takových zlepšení buk nedosahuje. Při prvním stupni úpravy se pevnost v ohybu a statický modul pružnosti sice zlepšily, avšak pouze o malé procento, které v praxi není využitelné. Při druhém stupni úpravy už vlastnosti klesaly hluboko pod úroveň neupraveného dřeva, zbylé charakteristiky klesaly už při prvním stupni úpravy.

Z hlediska zjištění takovýchto vlastností by se termicky upravené dřevo nemělo využívat jako materiál pro konstrukční prvky či jinde, kde je žádaná vysoká pevnost, ale spíše pro obkladové či podlahové aplikace, kde se využije dobrá rozměrová stabilita termodřeva. Dá se také použít pro výrobu dekoračních prvků, které by mohla být zajímavé z hlediska změny barevné struktury.

Co se týče vlivu nepravého jádra na zkoumané charakteristiky, prokázal se jasný negativní vliv na mechanické vlastnosti s výjimkou neupravených vzorků při zkoušce přerážením.

9 Zdroje

9.1 Literatura

BABIAK, M. - KUBOVSKÝ, I. - MAMOŇOVÁ, M. *Farebný prostor vybraných domácích dřevín*. Článek v ED.: KURJATKO S. *Interakcia dreva s rôznymi formami energie*: [2. vědecké sympóziu, 4. - 5. září 2000 na Technické Univerzitě ve Zvolenu] = *Interaction of wood with various forms of energy*. 1. vydání. Zvolen: TU, 2000. ISBN 80-228-0975-6.

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

GANDELOVÁ, L. - ŠLEZINGEROVÁ, J. – *Stavba dřeva – cvičení*. 3. vydání. Brno: Ediční středisko MZLU, 2012. 132 s. ISBN 978-80-7375-168-5.

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

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.

KAČÍKOVÁ, D. – KAČÍK, F. *Chemické a mechanické zmeny dřeva při termické úpravě*. 1. vydání. Zvolen: TU ve Zvolenu, 2011. 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.

KOLLMANN, F., *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 1. Auflage. Berlin: Springer-Verlag. 1951. 870 s.

LEXA, J. et al. *Mechanické a fyzikálne vlastnosti dřeva*. Bratislava: Drevárský výzkumný ústav. 1952. 436 s.

NOVÁK, V., et al. *Dřevarařská technická příručka*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970. 748 s.

POŽGAJ, A. – CHOVANEC, D. – KURJATKO, S. – BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dřeva*. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00960-4.

REINPRECHT, L. - VIDHOLDOVÁ, Z. (2008). *Termodrevo. Příprava, vlastnosti a aplikace*, TU Zvolen 2008, 89 s. ISBN 978-80-228-1920-6.

ÚRADNÍČEK, L., et al. *Dřeviny České republiky*. 1. vyd. Písek: Matice Lesnická, spol. s.r.o., 2001. 333 s. ISBN 80-86271-09-9.

WAGENFÜHR, R. *Holzatlas*. 5. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag, 2000. 707 s.

WALKER, A. *Dřevo: velká encyklopedie: 150 druhů dřeva: podrobný průvodce "strom za stromem": svět nejvšestrannějšího přírodního zdroje*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. 192 s. ISBN 978-80-247-2858-2.

9.2 Internetové zdroje

BORŮVKA, V. – ZEIDLER, A. – HOLEČEK, T. *Comparison of stiffness and strength properties of untreated and heat-treated wood of Douglas fir and alder*. [online]. Bioresources, 2015. [cit. 14. 4. 2015]. Dostupné z www: <https://www.ncsu.edu/bioresources/>

ThermoWood Handbook. Helsinki: Finnish ThermoWood Association 2003 [online]. [cit. 25. 3. 2015]. Dostupné z www: www.thermowood.fi

ZEIDLER, A. *Lexikon dřeva*. Česká zemědělská univerzita v Praze: 2012 [online]. [cit. 23. 3. 2015]. Dostupné z www: http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/

ZEIDLER, A. *Mikroskopický atlas dřevin*. Česká zemědělská univerzita v Praze: 2007 [online] [cit. 23. 3. 2015]. Dostupné online na http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/

9.3 Normy

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

ČSN 49 0103 - Dřevo. Zisťovanie vlhkosti při fyzikálnych a mechanických skúškach. 1979

ČSN 49 0108 - Dřevo. Zisťovanie hustoty. 1993

ČSN 49 0115 - Dřevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979

ČSN 49 0116 - Dřevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti při statickom ohybe. 1982

ČSN 49 0117 - Dřevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1977.