

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Pavel Hasenkopf

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra základního zpracování dřeva

Vliv tepelné modifikace na vlastnosti dřeva dubu

Diplomová práce

Autor: Bc. Pavel Hasenkopf

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra základního zpracování dřeva

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hasenkopf Pavel

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv tepelné modifikace na vlastnosti dřeva dubu

Anglický název

Influence of thermal modification on wood properties of oak

Cíle práce

Srovnat vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva dubu a dřeva dubu bez tepelné úpravy. Zhodnotit vliv tepelné modifikace na posuzované vlastnosti.

Metodika

- Zpracovat literární rešerši o tepelné úpravě dřeva, zkoumané dřevině a hodnocených vlastnostech.
- Zajistit reprezentativní vzorky neupraveného a tepelně upraveného dřeva dubu pro provedení zkoušek.
- Normalizovanými postupy na zkušebních tělesech u neupraveného a upraveného dubového dřeva stanovit především hustotu, sesychání, navlhavost, rázovou houževnatost v ohybu a pevnost v tlaku.
- Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabulární a grafické podobě.

Harmonogram zpracování

- duben – květen 2012

Výroba zkušebních těles, zpracování literární rešerše

- červen – prosinec 2011

Laboratorní práce a zpracování dat

- leden – duben 2013

Tvorba vlastní práce

Rozsah textové části

50 - 60 stran

Klíčová slova

dřevo, tepelná modifikace, vlastnosti, dub

Doporučené zdroje informací

POŽGAJ A., CHOVANEC D., KURJATKO S., BABIAK M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s.
WAGENFÜHR R. Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 2000. 707 s.
Thermowood Handbook. Helsinki: Finnish Thermowood Association, [2003]. Dostupné z www: <www.thermowood.fi>
Kačíková D., Kačík F. Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave. TU Zvolen, 2011. ISBN 978-80-228-2249-7
Reinprecht L., Vidholdová Z. Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie, TU Zvolen, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6

Vedoucí práce

Zeidler Aleš, Ing., Ph.D.

Termín odevzdání

duben 2013

doc. Ing. Štefan Barčík, CSc.
Vedoucí katedry



prof. Ing. Marek Turčáni, Ph.D.
Děkan fakulty

V Praze dne 13.3.2013

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv tepelné modifikace na vlastnosti dřeva dubu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Aleše Zeidlera, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne:

Podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli k vypracování mé diplomové práce. Především bych chtěl poděkovat panu Ing. Alešovi Zeidlerovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odbornou spolupráci při zpracování této diplomové práce a firmě TIMLESS TIMBER s.r.o. za poskytnutí tepelně upraveného dřeva potřebného pro tuto práci.

Abstrakt

S rostoucím trendem spotřeby tepelně modifikovaného dřeva a jeho využitím v oblasti dřevozpracujícího průmyslu roste potřeba zjistit jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Tato diplomová práce je zaměřena na vliv tepelné modifikace na vlastnosti dřeva dubu. Z fyzikálních vlastností to jsou hustota dřeva, navlhání a sesychání. Z mechanických vlastností je zde posuzována pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken a rázová houževnatost v ohybu. Všechny tyto zkoušky se prováděly na vzorcích dle příslušných norem. U tepelně modifikovaného dřeva dubu byla zjištěna vyšší hustota, snížila se rovnovážná vlhkost a zlepšila rozměrová stabilita. Naopak došlo ke zhoršení rázové houževnatosti a pevnosti v tlaku oproti neupravenému dřevu.

Klíčová slova: dřevo, tepelná modifikace, vlastnosti, dub

Abstract

With growing consumption of thermally modified wood and with its increasing utilisation in woodworking industry knowledge of its physical and mechanical properties is of great importance. This diploma thesis focuses on the influence of thermal modification on wood properties of oak. From the physical properties the density, shrinkage and hygroscopicity were tested. From the mechanical properties the compression strength along the grains and impact strength were evaluated. All the tests followed Czech national standards. Thermally modified oak wood featured higher density and lower equilibrium moisture content. The dimensional stability has been also improved. On the contrary the impact strength and compression strength decreased compared to untreated wood.

Key words: wood, thermal modification, properties, oak

OBSAH

1. ÚVOD.....	4
2. CÍL PRÁCE.....	4
3. POPIS PROBLEMATIKY.....	5
3.1. TERMICKY MODIFIKOVANÉ DŘEVO	5
3.1.1. <i>Modifikace dřeva</i>	5
3.1.1.1. Tepelná modifikace dřeva.....	6
3.1.1.2. Změny ve struktuře dřeva.....	6
3.1.1.3. Hlavní cíle tepelné úpravy dřeva	7
3.1.2. <i>Anatomická struktura</i>	7
3.1.3. <i>Trhliny.....</i>	7
3.1.4. <i>Chemická struktura</i>	8
3.1.4.1. Celulóza	9
3.1.4.2. Hemicelulóza	9
3.1.4.3. Lignin	10
3.2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ STRUKTURU DŘEVA PŘI TEPELNÉ ÚPRAVĚ.....	10
3.2.1. <i>Změny vlastností vlivem teploty.....</i>	10
3.3. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI TEPELNĚ MODIFIKOVANÉHO DŘEVA	11
3.3.1. <i>Hustota</i>	11
3.3.2. <i>Rovnovážná vlhkost.....</i>	11
3.3.3. <i>Rozměrová stabilita.....</i>	13
3.3.4. <i>Tepelně izolační vlastnosti</i>	14
3.3.5. <i>Akustické vlastnosti</i>	15
3.3.6. <i>Barevné změny.....</i>	15
3.3.7. <i>Vůně</i>	16
3.4. MECHANICKÉ VLASTNOSTI TEPELNĚ MODIFIKOVANÉHO DŘEVA	16
3.4.1. <i>Pevnost dřeva</i>	16
3.4.1.1. Pevnost dřeva v ohybu.....	16
3.4.1.2. Pevnost v tlaku	17
3.4.1.3. Rázová houževnatost.....	18
3.4.1.4. Modul pružnosti	18

3.4.1.5. Tvrdost.....	19
3.4.1.6. Štípatelnost	20
3.4.1.7. Pevnost dřeva ve smyku	20
3.4.2. <i>Opracování, lepení a spojování</i>	20
3.4.3. <i>Odolnost dřeva</i>	21
3.4.3.1. Biologická odolnost.....	21
3.4.3.2. Odolnost proti povětrnostním podmínkám.....	22
3.5. TECHNOLOGIE VÝROBY.....	23
3.5.1. <i>Používané dřeviny při výrobě</i>	25
3.6. VLASTNOSTI DUBU.....	25
3.6.1. <i>Charakteristika dubu</i>	25
3.6.2. <i>Makroskopické znaky</i>	26
3.6.3. <i>Mikroskopické znaky</i>	27
3.6.4. <i>Základní fyzikální a mechanické vlastnosti dubového dřeva</i>	28
4. VLASTNOSTI DŘEVA	29
4.1. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	29
4.1.1. <i>Hustota</i>	29
4.1.2. <i>Sesychání</i>	31
4.1.3. <i>Navlhání</i>	31
4.2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	31
4.2.1. <i>Rázová houževnatost v ohybu</i>	32
4.2.2. <i>Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken</i>	32
5. METODIKA PRÁCE.....	33
5.1. VÝBĚR A PŘÍPRAVA VZORKŮ	33
5.2. TEPELNÉ OŠETŘENÍ MATERIÁLU	33
5.3. STANOVENÍ FYZIKÁLNÍCH A MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	35
5.3.1. <i>Fyzikální zkoušky</i>	35
5.3.1.1. <i>Hustota</i>	35
5.3.1.2. <i>Sesychání dřeva</i>	36
5.3.1.3. <i>Navlhání</i>	37
5.3.2. <i>Mechanické zkoušky</i>	38

5.3.2.1 Zjišťování rázové houževnatosti v ohybu	38
5.3.2.2. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken	39
5.4. ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ DAT	40
5.4.1. <i>Statistické zpracování dat</i>	41
6. VÝSLEDKY A DISKUZE	43
6.1. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	43
6.1.1. <i>Hustota</i>	43
6.1.1.1. Hustota při 12% vlhkosti	43
6.1.1.2. Konvenční hustota.....	44
6.1.2. <i>Sesychání</i>	45
6.1.2.1. Maximální sesychání v radiálním směru	45
6.1.2.2. Maximální sesychání v tangenciálním směru.....	46
6.1.2.3. Maximální objemové sesychání.....	48
6.1.3. <i>Navlhání</i>	50
6.2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	51
6.2.1. <i>Rázová houževnatost v ohybu</i>	51
6.2.2. <i>Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken</i>	54
7. ZÁVĚR	57
8. POUŽITÉ ZDROJE	59
8.1. LITERATURA	59
8.2. ELEKTRONICKÉ DOKUMENTY.....	60
8.3. NORMY	60
9. SEZNAM OBRÁZKŮ	61
10. SEZNAM TABULEK.....	62
11. SEZNAM GRAFŮ	63
12. PŘÍLOHY	65

1. Úvod

Dřevo je obnovitelný materiál a má široké spektrum použití ve stavebnictví, nábytkářství, dopravě, papírenském průmyslu a v dalších odvětvích. Za předpokladu, že se bude dřevo rozumně využívat a bude se pečlivě hospodařit s lesy, můžeme říct, že je dřevo nevyčerpatelným zdrojem materiálu a energie. Za tohoto předpokladu lze lesy i dřevo dlouhodobě využívat se všemi výhodami, které mají.

Stále se hledají nové alternativy jak využívat dřevo a zlepšovat jeho vlastnosti. Jednou z možností, jak toho dosáhnout, je tepelná modifikace dřeva. Tepelná modifikace je založena na termických a hydrotermických změnách ve struktuře dřeva, za působení zvýšených teplot, které vedou především ke zlepšení vlastností, jako jsou snížení hygroskopicity, tvarová stálost, barevné změny, odolnost vůči škůdcům atd. (ThermoWood Handbook 2003, Reinprecht 2008a).

Tato práce pojednává o tepelné modifikaci a jejím vlivu na vlastnosti dubového dřeva, zjišťované pro firmu TIMLESS TIMBER s.r.o., která dodala vstupní materiál.

2. Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce je srovnání tepelně modifikovaného a neupraveného dřeva dubu pro firmu TIMLESS TIMBER s.r.o..

Dále popsat některé vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a provést je na vzorcích tepelně modifikovaného dřeva dubu a dřeva dubu bez tepelné úpravy. Z fyzikálních vlastností je to hustota dřeva, sesychání a navlhání. Z mechanických vlastností jde o rázovou houževnatost dřeva v ohybu a pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken.

3. Popis problematiky

3.1. Termicky modifikované dřevo

Tepelná modifikace dřeva je způsob, který je znám již řadu let. Už naši předkové opalovali konce plotových stojek, aby zvýšili jejich trvanlivost. Samotný proces tepelné modifikace, jak jej známe dnes, byl teoreticky popsán již ve 20. letech minulého století, avšak jeho náročnost neumožňovala plné a bezproblémové technologické zvládnutí. Tento způsob se vyřešil pomocí moderní technologie v 90. letech 20. století ve Finsku, kde se začala modifikace dřeva provádět průmyslově s patentovaným názvem ThermoWood®. Primárním cílem průmyslové tepelné modifikace je přetvořit domácí a snadno dostupné dřeviny v produkt, který bude mít obdobné vlastnosti jako dřeviny tropické. Thermowood je dřevo s upravenou strukturou dosaženou tepelnou a vlhkostní úpravou, která pozitivně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti i trvanlivost. Takto upravené dřevo vykazuje zvýšenou odolnost vůči mikroorganizmům a větší stabilitu ve stejných klimatických podmínkách než neupravené dřevo. Trvanlivost thermowoodu je více než 30 let bez použití chemické úpravy. Termodřevo má lepší izolační vlastnosti než klasicky sušené přírodní dřevo. Vnější znakem takto upraveného dřeva je barva, podle teploty je intenzita odstínu od světle hnědé až po tmavohnědou (Reinprecht 2008a).

3.1.1. Modifikace dřeva

Dřevo má široké možnosti využití například při výrobě řeziva, nástrojů, dopravních prostředků (lodí), papíru a celulózy. Používá se ve stavebnictví jako konstrukční nebo obkladový materiál, v nábytkářství a při výrobě materiálů na bázi dřeva. Při využívání výrobků ze dřeva požadujeme co možná nejdelší dobu životnosti. Proto je jednou z velmi důležitých vlastností dřeva jeho přirozená trvanlivost v různých exteriérových a interiérových expozicích, která se týká zejména jeho odolnosti vůči biotickým škůdcům. Trvanlivost dřeva považujeme za dostatečnou, ale dá se zvýšit chemickou ochranou a dnes pomocí tepelné modifikace dřeva. Přitom si dřevo musí zachovat své výhodné vlastnosti jako je pevnost, barva, opracovatelnost, ekologická nezávadnost atd. (Reinprecht 2008a).

3.1.1.1. Tepelná modifikace dřeva

Tepelná modifikace dřeva je založena na termických a hydrotermických úpravách při vysokých teplotách v rozmezí od 150° do 260 °C. Vysokými teplotami se rozkládají některé stavební polymery dřeva a tvoří se nové ve vodě nerozpustné látky a také látky s toxickým nebo odpuzujícím účinkem proti biologickým škůdcům dřeva, jako jsou plísně a houby. Pevnost a některé mechanické vlastnosti se u termicky upraveného dřeva snižují. Podstatně méně se mechanické vlastnosti snižují, pokud se tepelná úprava dřeva provádí v inertním prostředí bez přístupu kyslíku - například ve vakuu, v dusíku nebo v olejích (Reinprecht 2008a).

Při teplotách nad 150° až 170 °C se kromě plastifikačních procesů začíná výrazně měnit i chemická struktura v upravovaném dřevě. Ve strukturách polysacharidů, ligninu a průvodních látek zanikají hydrofilní –OH funkční skupiny a provádějí se depolymerizační a kondenzační reakce ve spojení s částečnou karbonizací dřeva a s uvolňováním hořlavých plynů. Tepelně upravené dřevo je díky těmto změnám odolnější vůči biologickým škůdcům a klesá jeho hygroskopicita (Reinprecht 2008a).

3.1.1.2. Změny ve struktuře dřeva

Tepelná úprava vyvolává změny v chemické a následně i anatomické struktuře dřeva. K mírným změnám ve struktuře dřeva začíná docházet při teplotách nad 100 °C. Výrazné změny se objevují při teplotách přesahujících 150 °C a se stoupající teplotou už nepřestávají. Chemické změny se projevují v anatomické struktuře dřeva, kde vznikají trhliny ve ztenčeninách a v buněčných stěnách. Zkřehnutí a trhliny v buňkách se ve dřevě projeví snížením pevnosti dřeva, zejména se snižuje ohybová pevnost a houževnatost dřeva (Reinprecht 2008a).

Změny vznikající v dřevě působením zvýšené teploty jsou závislé na mnoha faktorech (druh dřeviny, teplota, způsob a délka ohřevu, prostředí - vzduch, vlhkost atd.). Mění se mechanické a fyzikální vlastnosti, které úzce souvisejí s chemickými změnami. Technologický proces při výrobě termicky modifikovaného dřeva je potřebné provádět takovým způsobem, aby se při minimálních ekonomických nákladech dosáhlo cílené změny a byly potlačeny nežádoucí změny dřeva (Kačíková 2011).

3.1.1.3. Hlavní cíle tepelné úpravy dřeva

Cílem tepelné úpravy je připravit dřevěný materiál, který bude mít zlepšené vlastnosti oproti rostlému dřevu, aby se mohl použít na výrobu různých dřevařských výrobků do náročných interiérových a exteriérových expozicí, kde dokáže nahradit některé velmi trvanlivé a rozměrově stálé exotické druhy dřevin (Reinprecht 2008a).

Mezi hlavní změny tepelné úpravy dřeva patří snížení hygroskopičnosti, zlepšení rozměrové stability, zvýšení odolnosti vůči biologickým účinkům a zušlechtnění barvy. Ale hlavní výhodou tepelné úpravy je ekologická nezávadnost (Razumov 2012).

3.1.2. Anatomická struktura

Působení zvýšených teplot na dřevo způsobuje výrazné změny v anatomickém složení strukturních elementů. Při ohřevu smrkového dřeva na teplotu 150 °C a pomocí elektronového mikroskopu byly zjištěny praskliny mezi vrstvami S1 a S2 a v rozích buněk. Podobné změny byly pozorovány v březovém a bukovém dřevě po hydrotermickém působení při teplotách 120 °C až 160 °C (Kačíková 2011).

Fengel zkoumal elektronovým mikroskopem vzorky smrkového dřeva po 24-hodinovém působení teplot 180 °C a 200 °C. Zjistil, že ve vrstvě S1 dochází následkem sesychání k tvorbě trhlin podél střední lamely (Fengel 1966).

McGinnes pozoroval elektronovým mikroskopem strukturu dubového dřeva po pyrolýze a zjistil, že první optické změny jsou pozorovatelné v oblasti buněčných stěn s vysokým obsahem ligninu. S dosažením teploty uhelnatění dochází k úplné destrukci mikrofibriálních oblastí a struktura buněčných stěn nabývá amorfního vzhled (McGinnes et al. 1971).

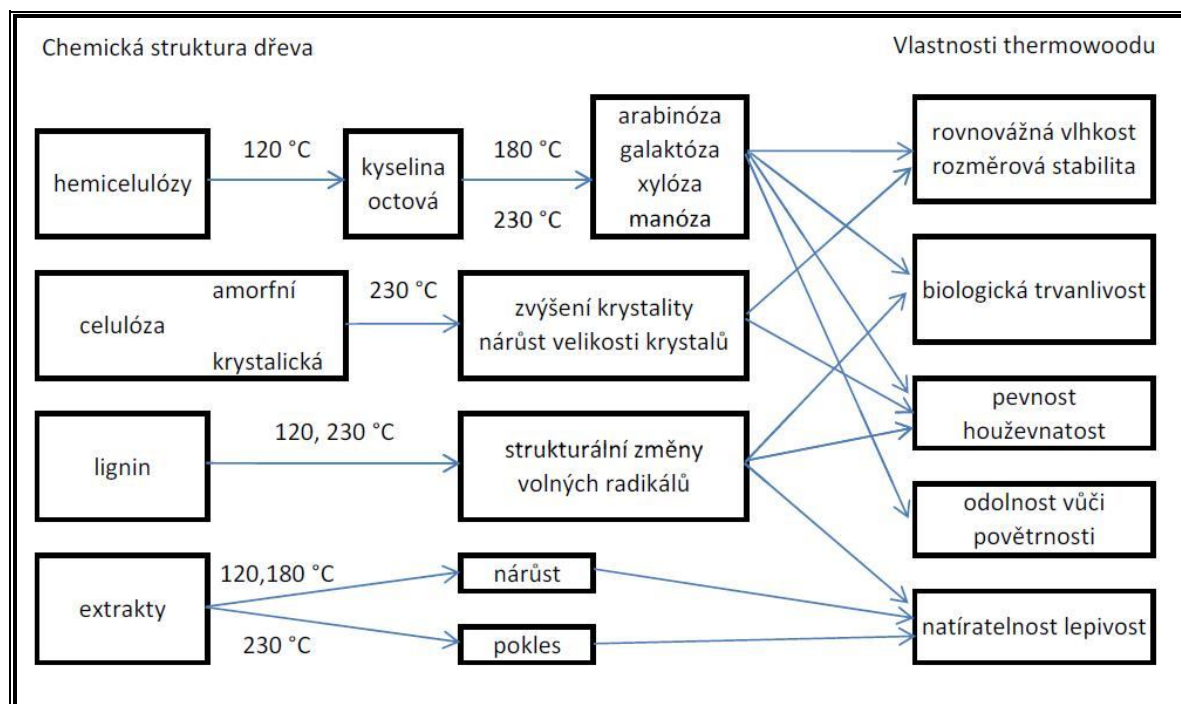
3.1.3. Trhliny

Buněčné stěny dřeva jsou z důvodu depolymerizace celulózy křehčí a z toho důvodu se v nich tvoří nanotrhlínky, mikrotrhlínky a okem viditelné makrotrhlínky. Trhlínky různých velikostí se poměrně často tvoří ve dvojtečkách, ale i v jiných typech ztenčenin, čímž se narušuje a narůstá propustnost dřeva pro tekutiny. Tvorbou trhlinek ve střední lamelle se buňky navzájem izolují (Reinprecht 2008a).

3.1.4. Chemická struktura

Dřevo je velmi složitý komplex různých látek, z nichž základ tvoří přírodní polymery. Hlavními složkami dřeva jsou celulóza (40 až 50 %), hemicelulóza (25 až 35 %), lignin (20 až 30 %) a ostatní složky (1 až 3 %) jako jsou tuky, cukry, třísloviny. Tvorba a přeměna přírodních polymerů jsou velmi složité a specifické procesy. Celulóza a hemicelulózy tvoří polysacharidický podíl dřeva, charakter ligninu je polyfenolický. Tyto biopolyméry tvoří hlavní složky dřeva. Jejich procentické zastoupení je 90 % až 97 %, přičemž sacharidická část tvoří asi 70 % a lignin zbytek. V menší míře jsou zastoupeny další organické a anorganické látky, které se označují jako doprovodné složky dřeva. Tato průměrná procentická zastoupení se mohou měnit podle druhu dřeva i části stromu, ze kterého dřevo pochází (Gandelová et al. 2002).

Zvýšená teplota způsobuje chemické změny hlavních složek dřeva. Jejich rozsah závisí na délce působení a teplotě, při které se tepelná modifikace provádí. Při teplotách 20 °C až 150 °C dochází k sušení dřeva, přičemž dřevo ztrácí vodu. V rozsahu teplot 180 °C až 250 °C, které se obvykle používají na termickou úpravu dřeva, dochází k významným chemickým změnám. Při teplotách vyšších než 250 °C začíná probíhat zuhelnatění a vzniká oxid uhličitý (Kačíková 2011).



Obr. 1 - Změny v chemické struktuře dřeva při teplotách 120 - 230 °C a jejich vliv na vlastnosti thermowoodu (Razumov 2012, Reinprecht 2008a).

3.1.4.1. Celulóza

Celulóza je nejrozšířenější sloučeninou biosféry. Je typickým polysacharidem se stavební funkcí. Tvoří podstatnou část buněčných stěn rostlinných buněk. V podstatě vytváří kostru zdřevnatělých buněčných stěn anatomických elementů dřeva. Dřevo obsahuje přibližně 35 - 56 % celulózy. Vyšší zastoupení je u jehličnanů 46 - 56 % než u listnáčů 41 - 48 % (Gandelová et al. 2002).

Celulóza je odolnější vůči termickému působení ve srovnání s hemicelulózou a to v důsledku její krystalické struktury. Při zahřívání celulózy v rozsahu 120 °C až 350 °C probíhají tyto tři primární reakce: termooxidace, dehydratace a depolymerizace. Při teplotách nad 150 °C probíhají nepolymerační reakce za přítomnosti kyslíku a různých anorganických látek. Při teplotě nad 300 °C výrazně depolymerizuje krystalická struktura. Změny v množství krystalické celulózy jsou důležité z pohledu změn modulu pružnosti. Proto se musejí omezit depolymerační reakce v řetězcích celulózy pomocí invertního prostředí v dusíku, vakuu nebo ohřevem v rostlinném oleji (Kačíková 2011).

3.1.4.2. Hemicelulóza

Od celulózy se liší zejména svým složením, nižším stupněm polymerizace a tím i nižší relativní molekulovou hmotností a nízkým podílem krystalické části. Jsou to v podstatě rovněž lineární polysacharidy (polymerační stupeň je 100 až 200) s krátkými postraními řetězci. Tvoří zde tmelící vrstvu mezi celulóзовými řetězcovými makromolekulami a váže se na ni lignin. Podíl hemicelulóz činí u jehličnanů 15 % – 25 %, u listnatých stromů 25 % – 45 %. Podle obsahu se dělí do několika skupin, z nichž jsou významné: mangany, galaktiny a xylany (Gandelová et al. 2002).

Jako první se z hlavních složek dřeva při termickém působení začínají měnit hemicelulózy a to už při relativně nízkých teplotách. Termickým rozkladem při teplotách nad 150 °C vzniká kyselina octová, která působí jako katalyzátor depolymerizačních a dehydratačních reakcí a dále urychluje rozklad polysacharidů. Při dehydratačních reakcích klesají i hydroxylové skupiny v hemicelulózách. Množství sacharidů v termicky upraveném dřevě klesá úměrně podmínkám termického působení (čas, teplota) a závisí i na druhu dřeviny. Po tepelném rozkladu hemicelulózy už dřevo neobsahuje dostatečné množství výživných látek podporujících růst hub, které způsobují hnilobu (Kačíková 2011, Reinprecht 2008a).

3.1.4.3. Lignin

Lignin je důležitou stavební složkou dřeva zabezpečující dřevnatění jeho buněčných stěn. Lignin plní hydrofobní funkci. Jeho hlavním úkolem je spojování mezibuněčných vláken a zpevnění celulózových molekul v rámci buněčných stěn. Dřevu dodává pevnost především v tlaku. Množství ligninu v dřevě kolísá od 15 % do 35 %. Větší zastoupení je ve dřevě jehličnanů (25 až 35 %) než u listnáčů (15 - 30 %). Nejvíce ligninu se ukládá do střední lamely a primární buněčné stěny (Gandelová et al. 2002).

Sarni dokumentoval, že při ohřevu dubového dřeva v rozmezí 175 - 195 °C se vytvoří velké množství monomerních látek lehce přecházejících do etanolového roztoku. Avšak při teplotě nad 195 °C se jejich podíl už výrazně snížil, což se vysvětluje zvýšením kondenzačních reakcí (Reinprecht 2008a).

3.2. Faktory ovlivňující strukturu dřeva při tepelné úpravě

Termická úprava dřeva mění strukturu dřeva. Mezi hlavní faktory ovlivňující vlastnosti patří: teplota a čas působení, tlak prostředí, přístup kyslíku k upravovanému materiálu, druh dřeviny, počáteční vlhkost a tvar upravovaného materiálu. V závislosti na zařízení a technologickém procesu se termická modifikace provádí za sníženého nebo zvýšeného tlaku. Snížený tlak (vakuum) omezuje množství kyslíku v prostředí a termooxidační reakce je potlačena. Zvýšený tlak se využívá například při úpravě dřeva vodní párou (Reinprecht 2008a).

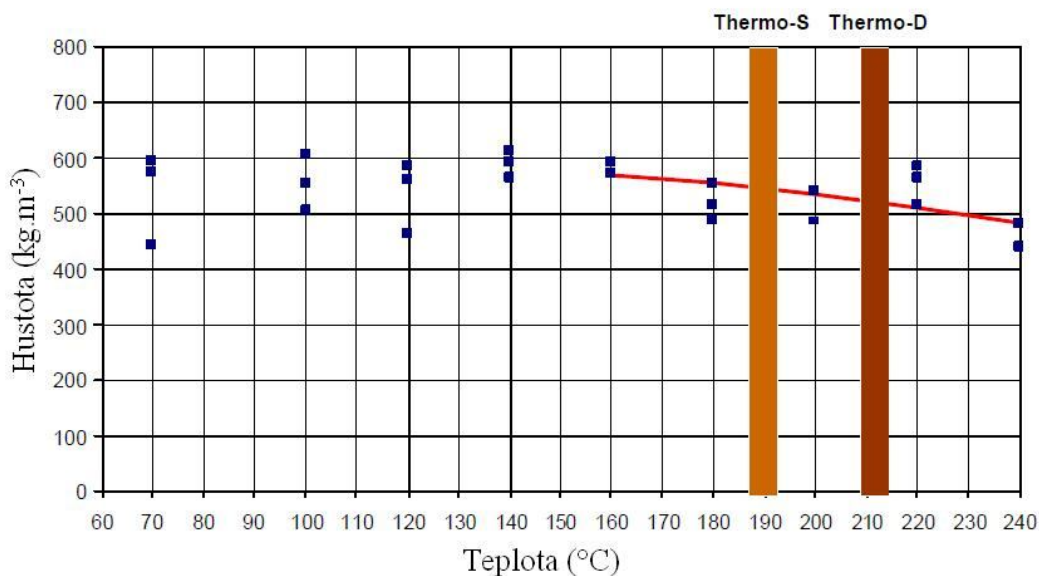
3.2.1. Změny vlastností vlivem teploty

S rostoucí teplotou se pevnost a pružnost dřeva snižuje. Vlivem teploty do 70 °C se pevnost a pružnost dřeva snižuje pouze dočasně. Vlivem teplot nad 200 °C se dřevo stává křehkým a začíná pyrolýza dřeva. Vysoké teploty ovlivňují zejména rázovou houževnatost v ohybu. Více je rázová houževnatost ovlivněna u listnáčů, protože v buněčných stěnách je 3krát více pentózanů než u jehličnanů. Vliv teploty na mechanické vlastnosti se mění s vlhkostí. Zvyšováním teploty a vlhkosti se pevnost výrazně snižuje, přičemž současné působení obou faktorů snižuje pevnost více, než působením každého samostatně (Gandelová et al. 2002).

3.3. Fyzikální vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

3.3.1. Hustota

Hustota tepelně ošetřeného dřeva je mírně nižší než u dřeva neošetřeného. Důvodem je především ztráta váhy při tepelné úpravě dřeva (Reinprecht 2008a, ThermoWood Handbook 2003).



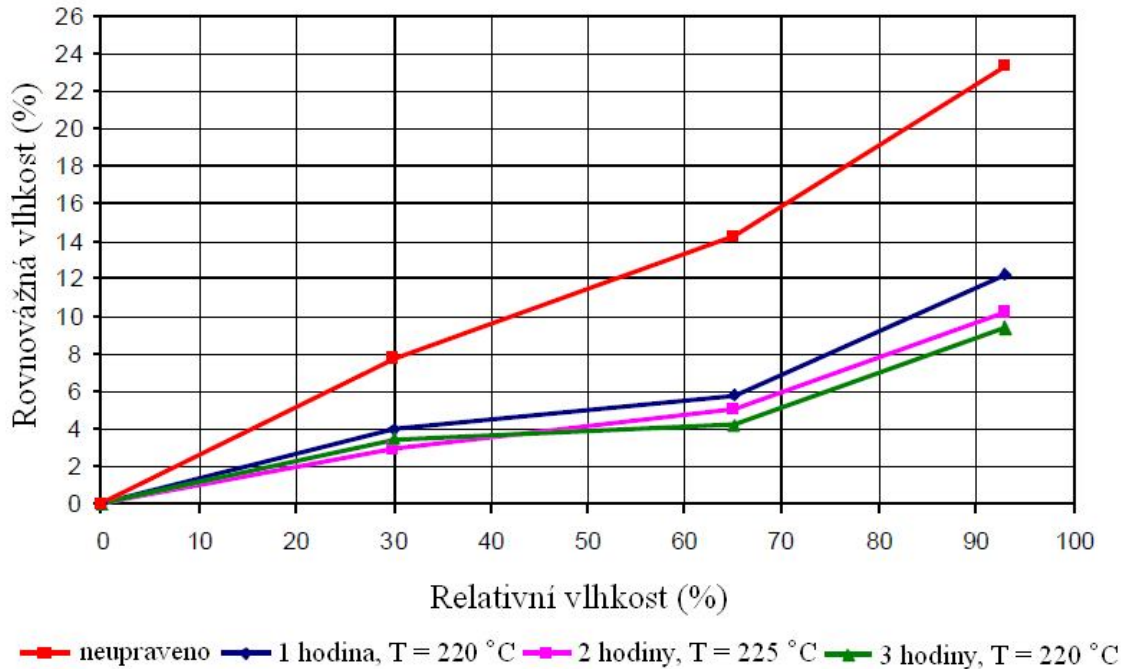
Obr. 2 - Změna hustoty tepelně upravené borovice po dobu 3 hodin při teplotách 160 – 240 °C. Průměrná hustota $T < 160$ °C je 560 kg.m^{-3} (ThermoWood Handbook 2003).

3.3.2. Rovnovážná vlhkost

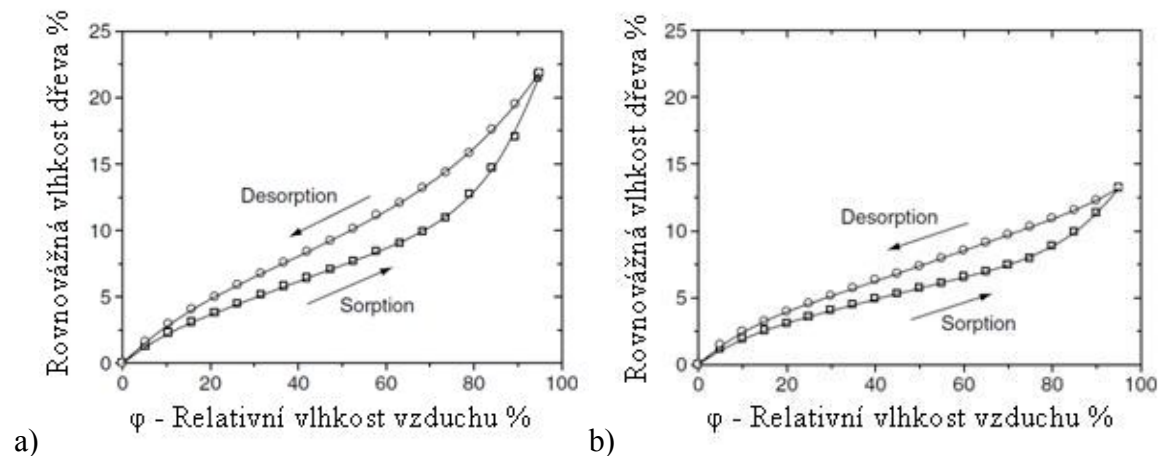
Hlavním efektem tepelného působení na dřevo je pokles rovnovážné vlhkosti a následný pokles bobtnání a sesychání. Podobně jako je tomu při úbytku hmotnosti, je závislá i rovnovážná vlhkost na druhu dřeviny, teplotě, času a druhu působení. Důvodem poklesu rovnovážné vlhkosti po tepelné modifikaci dřeva je skutečnost, že buněčné stěny absorbují méně vody jako důsledek chemických změn, které způsobil pokles hydroxylových skupin (Kačíková 2011).

Hygroskopicitata je velmi důležitá vlastnost dřeva, která ovlivňuje i jiné vlastnosti dřeva, hlavně rozměrovou stabilitu a odolnost vůči biologickým škůdcům. Hygroskopicitata je schopnost přijímat a odevzdávat vodu do okolního vzduchu při definované rovnovážné

vlhkosti a teplotě vzduchu. Při modifikaci o teplotě 220 °C je rovnovážná vlhkost téměř poloviční než u rostlého dřeva (Reinprecht 2008a, ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 3 - Vliv relativní vlhkosti na obsah vlhkosti tepelně modifikovaného smrkového dřeva (ThermoWood Handbook 2003).

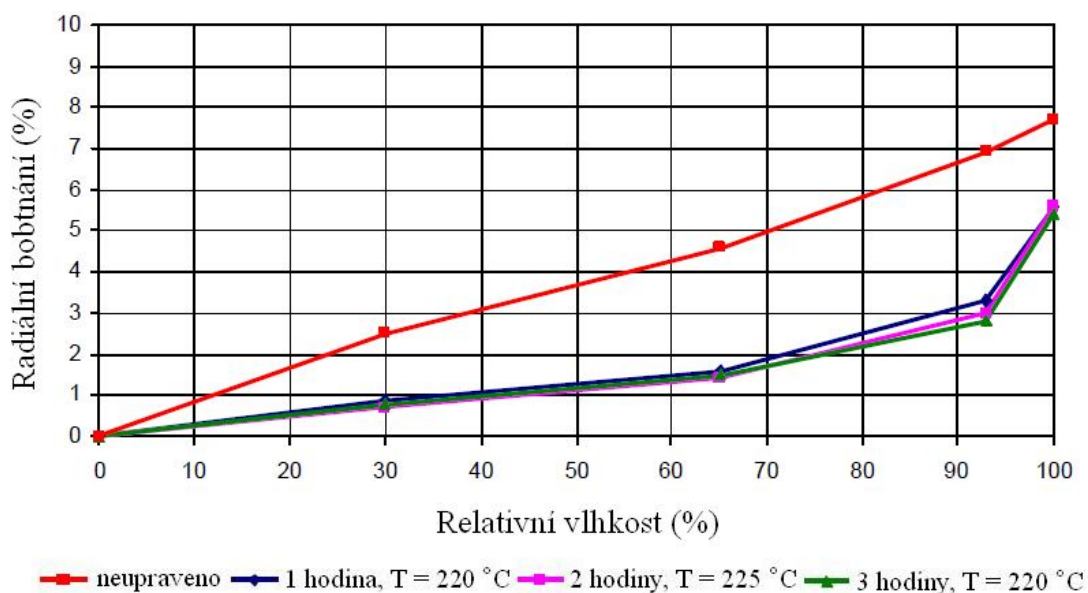


Obr. 4 - Sorpční izoterma pro a) neupravené dřevo b) modifikované dřevo (Reinprecht 2008a)

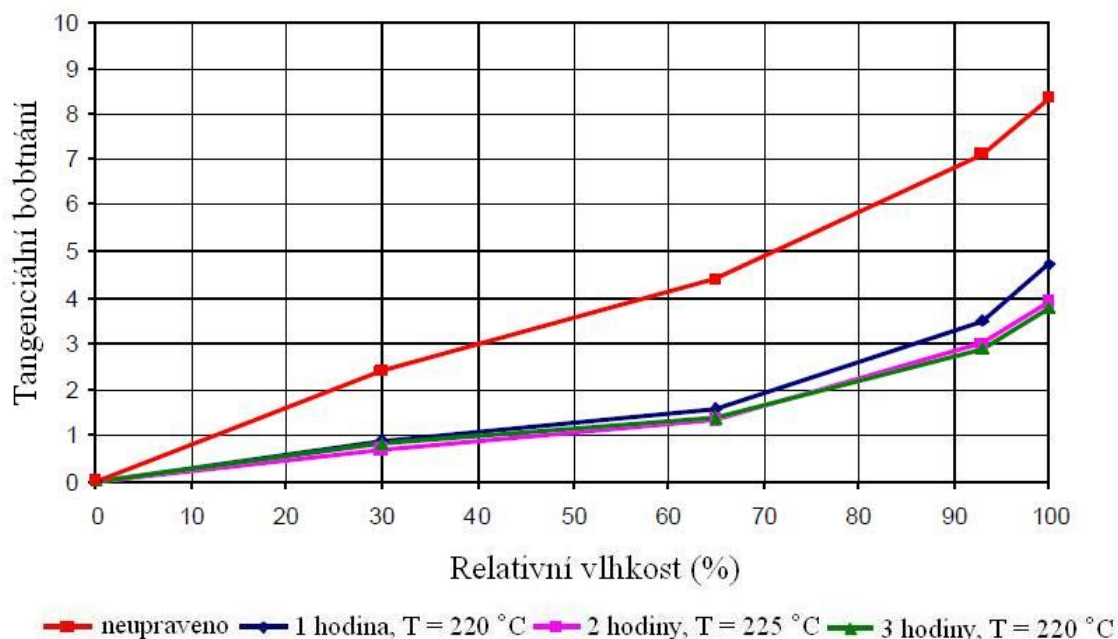
3.3.3. Rozměrová stabilita

Pokles rovnovážné vlhkosti dřeva po tepelné modifikaci vede ke zlepšení rozměrové stability. Při optimálním tlaku a teplotě se zlepší deformace při bobtnání o 75 % u dubového dřeva (Kačíková 2011).

Už při sušení teplotou 110 °C se dřevo stává rozměrově stabilnější. U tepelně modifikovaného dřeva typu Thermowood dosahuje rozměrová stabilita hodnot 50 - 90 % oproti neupravenému dřevu. Proto se tyto výrobky používají tam, kde je důležitá stabilita rozměrů jako třeba parkety v interiéru nebo u terasových podlah v exteriéru (Reinprecht 2008a, ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 5 - Radiální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti (ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 6 - Tangenciální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti (ThermoWood Handbook 2003).

3.3.4. Tepelně izolační vlastnosti

Tepelná vodivost tepelně modifikovaného dřeva se snižuje o 10 - 30 %. Protože má lepší izolační vlastnosti než rostlé dřevo je výhodné ho použít na okna, venkovní dveře, fasádní obklady a sauny (Reinprecht 2008a).

Rozměry (mm)	Doba zpracování (h)	Úbytek hmotnosti (%)	Hustota (kg/m ³)	Vlhkost (%)	Tepelná vodivost (W/m.K)
25 x 125	3	8,7	525	4,5	0,107
25 x 125	5	12,1	474	3,6	0,101
	0		505		1,130

Tabulka č. 1 - Hodnoty tepelné vodivosti borovice po tepelném zpracování v 230 °C po dobu 3 a 5 hodin (ThermoWood Handbook 2003).

Rozměry (mm)	Doba zpracování (h)	Úbytek hmotnosti (%)	Hustota (kg/m ³)	Vlhkost (%)	Tepelná vodivost (W/m.K)
22 x 100	3	5,8	445	5,5	0,097
22 x 100	5	9,3	405	4,4	0,082
	0		432		0,110

Tabulka č. 2 - Hodnoty tepelné vodivosti smrku po tepelném zpracování v 230 °C po dobu 3 a 5 hodin (ThermoWood Handbook 2003).

3.3.5. Akustické vlastnosti

Tepelně modifikované dřevo má zvláštní akustické vlastnosti. Pro hudební nástroje je možné při úpravě za nižších teplot přichystat zvláštní druhy tepelně upraveného dřeva. Jeho vlastnosti a struktura se shodují s přirozeně sušeným dřevem dlouhou dobu. Zvukové vlastnosti se často vyrovnají kvalitám historických hudebních nástrojů. Důležitým faktorem je i dobrá rozměrová stabilita (Reinprecht 2008a).

3.3.6. Barevné změny

Dřevo se vlivem vyšších teplot zbarvuje do žluto-hnědých až hnědo-černých odstínů. Zvýšení teploty a prodloužení času ohřevu vede k tmavšímu zbarvení. Ohřevem dřeva v atmosféře vzduchu způsobí intenzivnější změny barvy v porovnání s ohřevem v dusíku. Ohřívání dřeva víc tmavne v přítomnosti agresivních chemikálií. Netradiční změna zbarvení a lesku dřeva nastává při ohřevu v rostlinných olejích. Z praxe je známé, že dřevo na povětrnosti a za působení UV záření degraduje. A stejně je tomu i u tepelně modifikovaného dřeva, které časem zešedne a zbledne. Jeho přirozenou barvu můžeme ochránit pomocí povrchové úpravy (Reinprecht 2008a).



Obr. 7 - Tepelně zpracovaný dub v závislosti na teplotě
(www.boisdurablesdebourgogne.fr) [4.3.2013]

3.3.7. Vůně

Tepelně upravené dřevo nabývá výrazné vůně podobné karamelu. Důvodem jsou prchavé organické produkty vzniklé rozpadem hemicelulóz. Tepelně modifikované dřevo se zvýšeným podílem prchavých látek může až zapáchat, a proto je jeho použití v interiéru značně omezeno. Aroma je závislé na technologii a prostředí, ve kterém se dřevo upravuje (Reinprecht 2008a).

3.4. Mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

Nevýhodou tepelně upraveného dřeva je zhoršení jeho mechanických vlastností, které redukuje použití takto upraveného dřeva v některých aplikacích zejména konstrukčních prvků. Změny závisí na druhu dřeviny a podmínkách úpravy, přičemž některé vlastnosti se zhoršují (rázová houževnatost, pevnost a tvrdost), některé vlastnosti se mohou naopak tepelnou modifikací zlepšit (modul pružnosti a tvrdost). Modul pružnosti se při mírných podmínkách zlepšuje a při tvrdších podmínkách zhoršuje (Kačíková 2011).

3.4.1. Pevnost dřeva

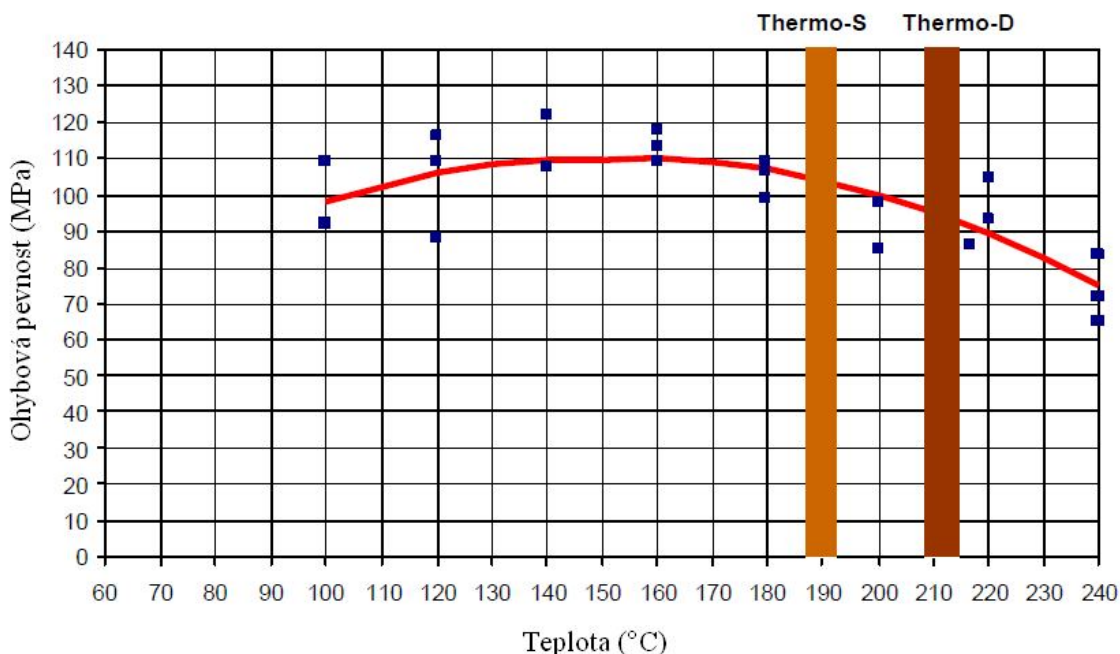
Pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Kvantitativně se pevnost vyjadřuje napětím, při kterém se poruší soudržnost tělesa. S ohledem na nemožnost vypočítat teoretickou pevnost dřeva pro žádný způsob mechanického namáhání stanovuje se pevnost dřeva jako skutečná pevnost dřeva. Údaje o pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím zkoušek, kde se sleduje skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa. Jedinou výjimkou je pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, která je definována jako konvenční pevnost, protože zde konečného porušení tělesa nelze dosáhnout.

Pevnost dřeva v zásadě můžeme rozdělit podle: stavu napjatosti - jednoosý a víceosý; způsobu zatížení - tlak, tah, ohyb, krut a smyk; časového průběhu zatížení - statické a dynamické; účinků zatížení na dřevo - destruktivní a nedestruktivní způsob (Gandelová et al. 2002).

3.4.1.1. Pevnost dřeva v ohybu

Pevnost v ohybu tepelně upraveného dřeva při teplotě 220 °C po dobu 5 hodin s fázemi ohřevu a chlazení se za čtyři dny sníží až o 50 % (Reinprecht 2008).

ThermoWood Handbook (2003) uvádí pokles ohybové pevnosti u borovice o něco menší a dokonce při teplotách 100 až 160 °C došlo k mírnému nárůstu ohybové pevnosti. K výraznému poklesu pevnosti o 30 % dochází až při ohřevu nad 240 °C.

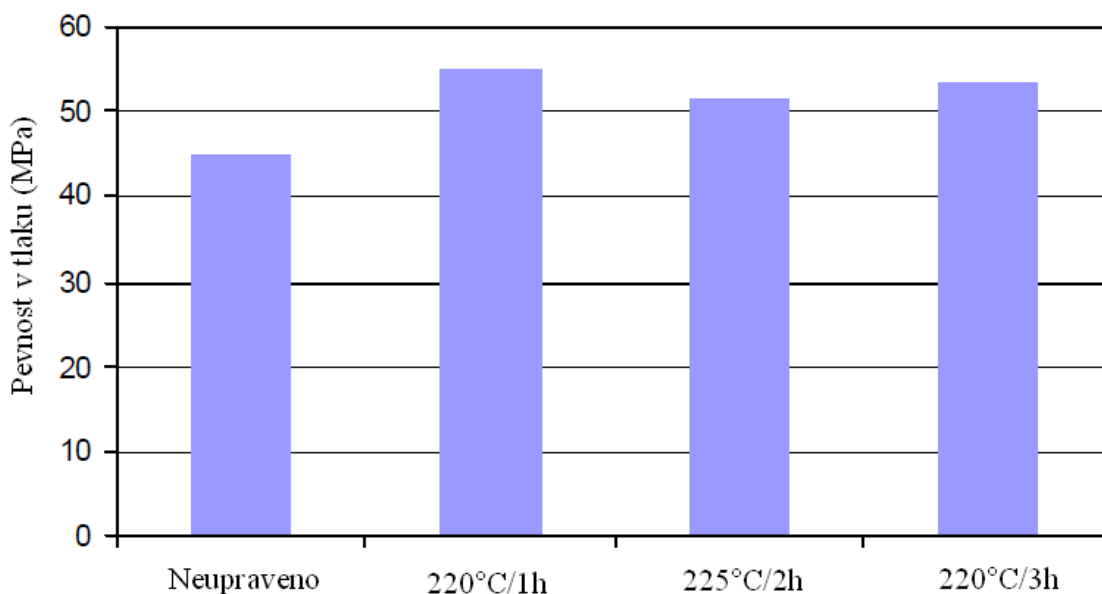


Obr. 8 - Změna ohybové pevnosti borového dřeva v závislosti na tepelné úpravě (ThermoWood Handbook 2003).

3.4.1.2. Pevnost v tlaku

Tepelně modifikované dřevo zkoušené na pevnost v tlaku může mít vyšší hodnoty než dřevo neupravené. Podle zkoušek provedených ve Finsku ve výzkumném ústavě VTT na smrkovém dřevě ošetřeném při teplotě 195 °C po dobu 3 hodin pevnost v tlaku ve směru vláken stoupla přibližně o 30 % oproti neošetřenému dřevu (ThermoWood Handbook 2003).

K podobným výsledkům dospěli i na Technické univerzitě ve Zvolenu, kde zkoumali tepelně upravený buk a běl borovice v řepkovém oleji při teplotách 180 až 220 °C. Průběh deformace tepelně upraveného dřeva se při tlakovém zatížení liší od dřeva, které je vysušené v klasických sušárnách. Při maximálním zatížení se upravené dřevo rozpadá na více kousků, což poukazuje na jeho zvýšenou křehkost (Reinprecht 2008a).



Obr. 9 - Pevnost dřeva v tlaku tepelně upraveného smrkového dřeva, který měl průměrnou hustotu 420 kg.m^{-3} (ThermoWood Handbook 2003).

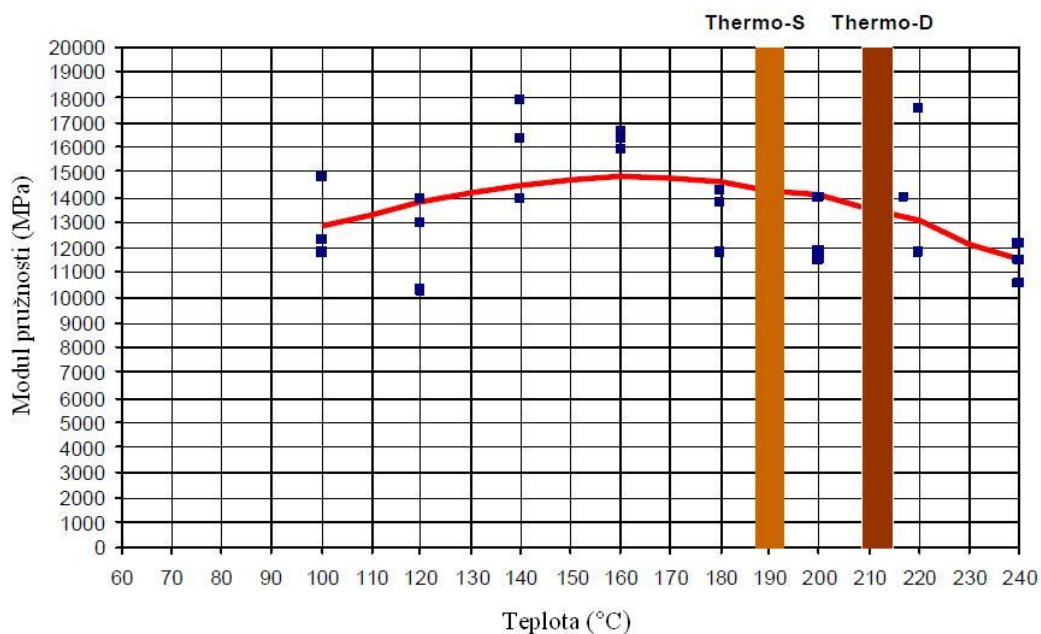
3.4.1.3. Rázová houževnatost

Rázová houževnatost dřeva po tepelné modifikaci je výrazně křehčí. Při tepelné modifikaci topolového dřeva ohřivaného po dobu 3 hodin při teplotě $210 \text{ }^\circ\text{C}$ se rázová houževnatost snížila o 61 % při hmotnostním úbytku 11,3 % (Reinprecht 2008a).

U smrkového dřeva, na kterém proběhlo tepelné ošetření při teplotě $220 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 3 hodin, byla snížena o 25 % rázová houževnatost (ThermoWood Handbook 2003).

3.4.1.4. Modul pružnosti

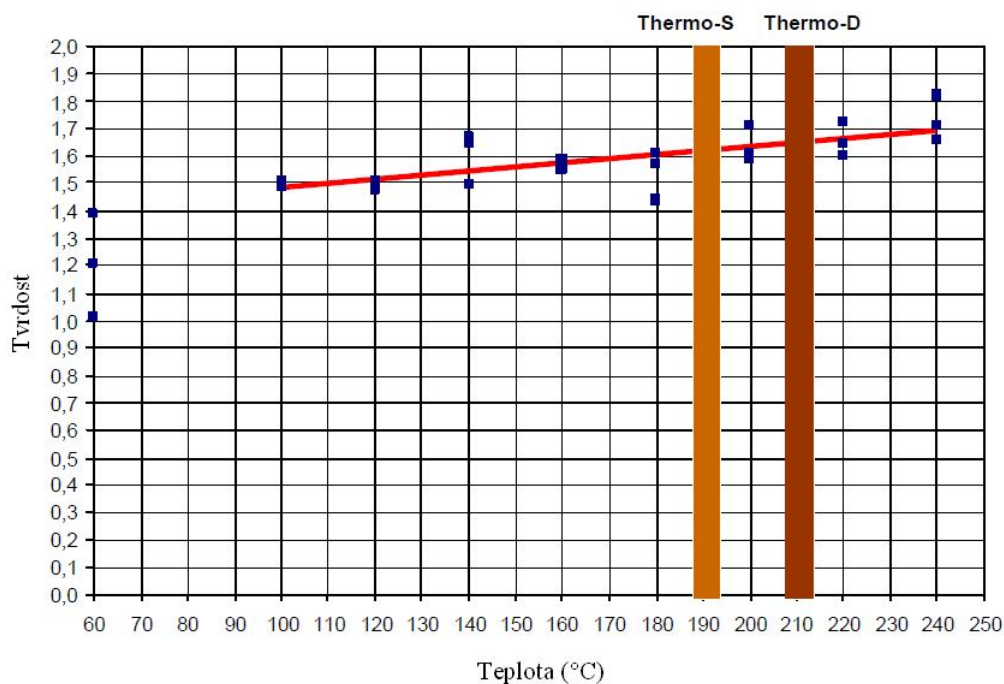
Modul pružnosti dřeva se vlivem tepelných změn zvyšuje do hodnoty $160 \text{ }^\circ\text{C}$. Po překročení této hodnoty modul pružnosti začíná klesat, především kvůli výraznému úbytku o více než 6 až 8 %. Při modifikaci v atmosféře čistého dusíku se modul pružnosti mírně zvětšuje. Modul pružnosti se snižuje při teplotách mezi 160 a $190 \text{ }^\circ\text{C}$ mírněji než pevnost dřeva (Reinprecht 2008a).



Obr. 10 - Změna modulu pružnosti borového dřeva v závislosti na tepelné úpravě (ThermoWood Handbook 2003).

3.4.1.5. Tvrdost

Tvrdost dřeva je stejně jako u všech druhů dřeva závislá na hustotě. Se zvyšující se teplotou roste tvrdost tepelně modifikovaného dřeva. Pro praxi to nemá moc podstatný význam, protože zvýšení tvrdosti je malé (ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 11 - Závislost tvrdosti podle Brinella borového dřeva na teplotě ošetření po dobu 3 hodin (ThermoWood Handbook 2003).

Druh dřeviny	Tvrdość dřeva na ploše v MPa při vlhkosti					
	čelní		radiální		tangenciální	
	12 %	> 30 %	12 %	> 30 %	12 %	> 30 %
Dub	67,5	40,0	56,0	33,5	49,0	29,0

Tabulka č. 3 - Tvrdość podle Janka pro dub v MPa (Gandelová et al. 2002).

3.4.1.6. Štípatelnost

Štípatelnost dřeva je z pohledu způsobu zatížení a stavu napjatosti složitý jev, při kterém v důsledku vnikání klínu do dřeva dochází k dělení dřeva. Rozrušení dřeva probíhá za současného působení tlaku a ohybu (Gandelová et al. 2002).

U neupraveného dřeva je vyšší odpor proti rozdělení než u tepelně modifikovaného dřeva. Podle zkoušek na smrku, borovici a bříze se štípatelnost snížila o 30 – 40 % (ThermoWood Handbook 2003).

3.4.1.7. Pevnost dřeva ve smyku

Pevnost dřeva ve smyku je u tepelně upraveného dřeva snížena v radiálním i v tangenciálním směru. Úpravou dřeva po dobu 4 hodin při teplotě 230 °C klesla smyková pevnost v radiálním směru o 1 až 25 %. V tangenciálním směru klesla smyková pevnost o 1 až 40 %. Při zpracování do teplot 190 °C je vliv na pokles pevnosti ve smyku 1 až 20 % v obou směrech (ThermoWood Handbook 2003).

3.4.2. Opracování, lepení a spojování

Thermowood může být opracován běžným strojním i ručním způsobem. Řezání a frézování je snadnější než u standardního dřeva a kvalitně obrobeného povrchu lze dosáhnout použitím dobře naostřených nástrojů. Tepelně upravované dřevo je náchylnější na vznik trhlin než normální dřevo, protože dřevní elementy jsou tepelnou úpravou nevratným způsobem fixovány. Při obrábění materiálu tepelně modifikovaného dřeva dochází k silnému zápachu, který však po krátké době vyprchá. Broušení dřeva je snadné a rychlé, ale vzniká při něm více prachu. Při lepení disperzními PVAC lepidly, která jsou ředěna vodou, je potřebná delší doba fixace spojovaných povrchů. Upravené dřevo špatně pohlcuje vodu, a je proto potřeba 3 – 6krát delší doba než u neupraveného dřeva.

Polyuretanová lepidla mohou být použita stejně jako při lepení normálního dřeva. Montáž může být provedena vruty a spojovacími prvky (Kráal 2005).

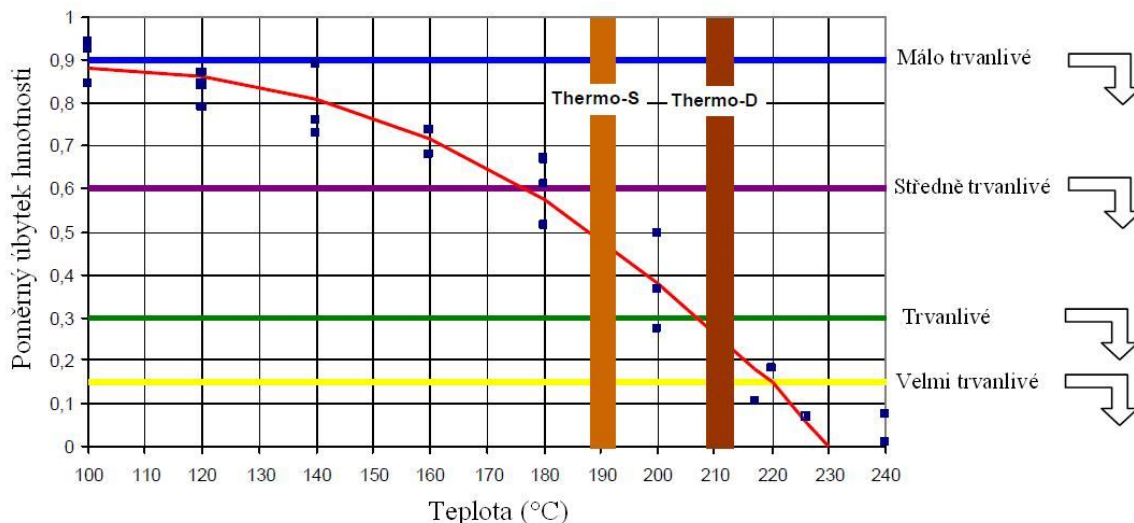
3.4.3. Odolnost dřeva

Tepelná modifikace dřeva se provádí hlavně z důvodu zvýšení trvanlivosti a prodloužení životnosti. Pod pojmem trvanlivost dřeva rozumíme v první řadě odolnost vůči dřevokazným houbám, plísním a dřevokaznému hmyzu. Dále sem můžeme zařadit odolnost vůči povětrnostním vlivům, mechanickému opotřebení a odolnost vůči ohni (Reinprecht 2008a).

3.4.3.1. Biologická odolnost

K výraznému zlepšení biologické odolnosti tepelně upraveného dřeva dochází při teplotách 150 - 260 °C kdy se mění chemická struktura. Snižuje se podíl -OH funkčních skupin a zvyšuje se hydrofóbnost dřeva následkem kondenzačních i jiných reakcí. Snižuje se schopnost absorbovat vlhkost, která je nutná pro napadení biologickými škůdci. Také se vytvářejí látky s biocidním účinkem a odbourává se určitý podíl hemicelulóz, které jsou lehce přístupné pro houby a hmyz. Thermowood byl testován proti červotoči proužkovému (*Amonium punctatum*), hrbohlavu hnědému (*Lyctus brunneus*) a tesaříku krovovému (*Hylotrupes bajulus*). Ve všech třech případech byl Thermowood proti těmto broukům odolný (Reinprecht 2008a).

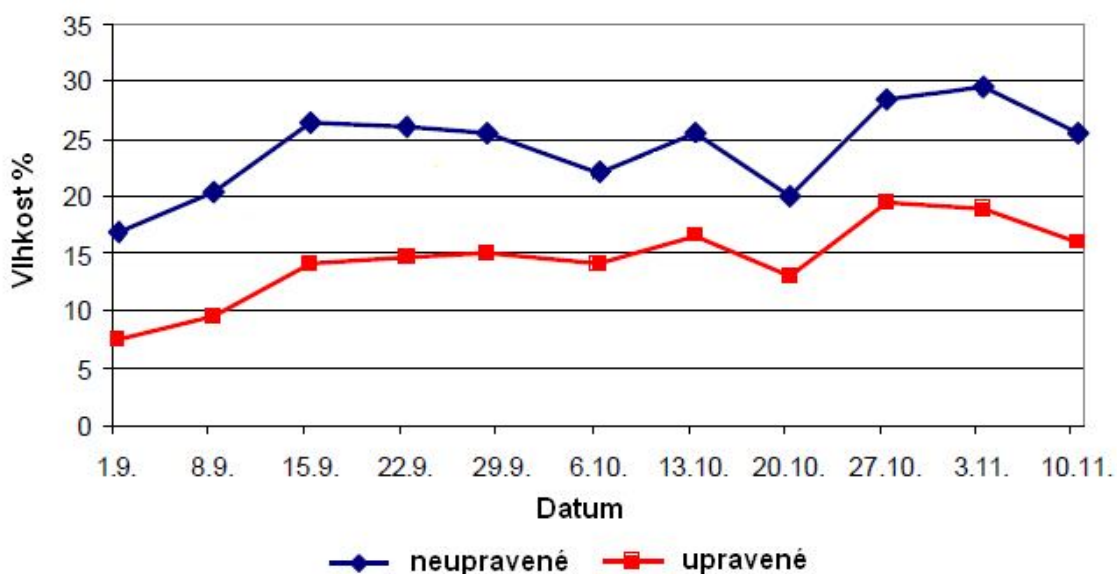
Odolnost proti houbám a plísním je důležitá, pokud vlhkost dřeva je vyšší než 20 %. Odolnost proti biotickým škůdcům dřevo získá pomocí vyšší tepelné úpravy. Málo trvanlivé dřeviny dosáhnou pomocí tepelné úpravy zvýšení trvanlivosti. Úpravou běle borovice (třída trvanlivosti 4) technologií ThermoWood se dosáhne u typu Thermo-S třídy trvanlivosti 3 a u typu Thermo-D dokonce 2. třídy. Změna třídy trvanlivosti borovice v závislosti na teplotě je znázorněna na obrázku 12 (Reinprecht 2008a).



Obr. 12 - Poměrný úbytek hmotnosti ošetřené borovice napadené *Coniophora puteana* k neupravenému dřevu. Čas úpravy 3 hodiny (ThermoWood Handbook 2003).

3.4.3.2. Odolnost proti povětrnostním podmínkám

Odolnost tepelně upraveného dřeva závisí na technologických podmínkách výroby. Tepelně upravené dřevo má nižší vlhkost než rostlé dřevo ve stejných podmínkách díky nižší hygroskopitě. Vlivem UV záření, působením kyslíku a srážek se poměrně rychle mění barva z hnědé na šedou. Proto je doporučeno v exteriéru dřevo ošetřit. Trhlinky na tepelně upraveném dřevě se tvoří méně díky nižší navlhavosti a lepší rozměrové stabilitě (Reinprecht 2008a).



Obr. 13 - Hodnoty měnící se vlhkosti tepelně upravené borovice při teplotě 225 °C po dobu 6 hodin vystavené venkovní expozici (ThermoWood Handbook 2003).

3.5. Technologie výroby

Materiál nazývaný Thermowood se vyrábí v atmosféře vzduchu. Průkopníci této úpravy dřeva byli vědci ve Finsku. Výroba nepřímo navazuje na poznatky od našich předků, kteří opalovali trámy i jiné dřevařské výrobky. Při výrobě se nepoužívají toxické chemikálie. Tepelná modifikace dřeva je technologický proces, při kterém se mění jeho chemická struktura vlivem zvýšené teploty 150 - 260 °C, s cílem zlepšit jeho odolnost vůči vodě a biologickým škůdcům. Při tomto procesu by nemělo dojít ke zhoršení mechanických vlastností. Proces výroby se skládá ze tří hlavních funkcí (sušení, tepelná úprava, chlazení).

Fáze 1. Zvýšení teploty a sušení

V prvních třech komorách probíhá vysokoteplotní sušení za pomoci páry, kdy se dřevo prudce zahřeje na teplotu 100 °C a následně se teplota pozvolna zvyšuje až na 130°C. Tento proces spotřebuje nejvíce času z celého procesu tepelné úpravy. Během této fáze je vlhkost snížena téměř až na nulovou hodnotu. Doba sušící fáze závisí na počáteční vlhkosti dřeva, druhu dřeviny a tloušťce řeziva. Během tohoto sušení se volná voda uvolňuje v důsledku rozdílu povrchového napětí a tlaku páry.

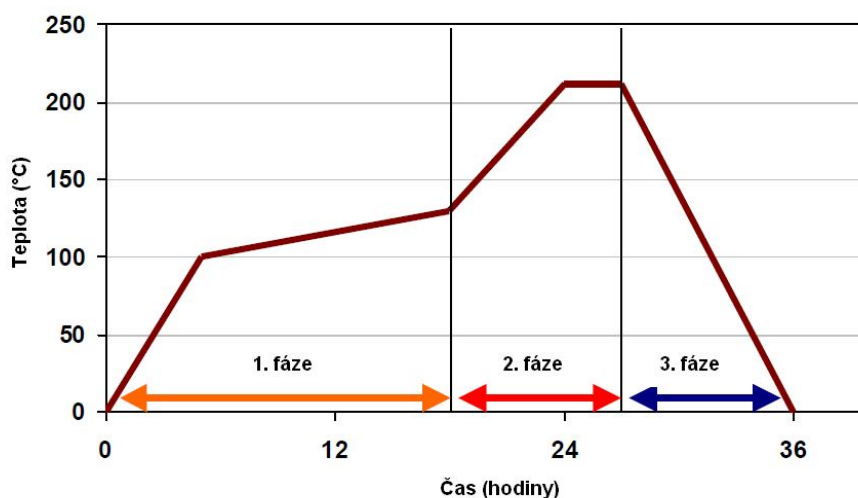
Fáze 2. Tepelná úprava

Ve čtvrté komoře dochází k samotnému tepelnému zpracování, které probíhá v uzavřených komorách, ve kterých je teplota zvyšována na 185 - 215 °C v závislosti na stupni tepelné úpravy (Thermo-S nebo Thermo-D). Při dosažení požadované teploty je tato teplota udržována po dobu 2 - 3 hodin.

Fáze 3. Chlazení a úprava vlhkosti

Pára je používána během sušení i tepelného zpracování jako ochrana. Parní mlhovina chrání dřevo před vznícením a ovlivňuje chemické změny, které probíhají ve dřevě. Poslední dvě komory slouží ke konečné normalizaci. Dřevo je po tepelném ošetření kontrolovaně ochlazováno. Zvláštní péče musí být v této fázi věnována vysokému teplotnímu rozdílu mezi dřevem a venkovním vzduchem, který může způsobit trhliny. Kromě toho musí být dřevo znovu vlhčeno, aby mělo vhodnou vlhkost před konečným použitím. Konečná vlhkost dřeva má podstatný vliv na jeho pracovní vlastnosti – je obtížné pracovat se dřevem, které je příliš suché. Po finální úpravě by měla být konečná vlhkost dřeva 5 - 7 %. V závislosti na stupni tepelného ošetření a řezivu trvá fáze konečné normalizace 5 - 15 hodin.

Po tepelném zpracování probíhá stabilizace, která pokračuje dále v teplých zastřešených prostorech pod tlakem po dobu jednoho až dvou dnů provedením finálního opracování do požadovaného typu profilu. Po hoblování probíhá dále rozřídění dle třídy jakosti a následné zabalení do transportního balení (Reinprecht 2008a,b, www.prokom.cz).



Obr. 14 - Schéma výrobního procesu ThermoWood (ThermoWood Handbook 2003)

Thermo-S (stability - stabilita) se vyznačuje tvarovou a rozměrovou stabilitou. Tento materiál je určen hlavně pro vnitřní používání: interiérový nábytek a stavebně truhlářské výrobky - okna, dveře, obložení, podlahy a sauny.

Thermo-D (durability - odolnost) zaručuje vyšší trvanlivost a vyrábí se při vyšších teplotách. Tento materiál je určen pro vnitřní i vnější použití - obklady fasád, terasy, zahradní nábytek, přístavní mola (Král 2005, Reinprecht 2008b).

Listnaté dřeviny (topol a bříza)	Thermo-S	Thermo-D
Teplotní zpracování	185 ± 3 °C	200 ± 3 °C
Odolnost proti povětrnostním vlivům	+	+
Třída trvanlivosti	4	3
Rozměrová stabilita	+	+
Pevnost v ohybu	Beze změny	-
Tmavost barvy	+	++

Tabulka č. 4 - Změny vlastností způsobené tepelnou úpravou u listnatých dřevin typu Thermo-S a Thermo-D (Král 2005).

Jehličnaté dřeviny (borovice a smrk)	Thermo-S	Thermo-D
Teplotní zpracování	190 ± 3 °C	212 ± 3 °C
Odolnost proti povětrnostním vlivům	+	++
Třída trvanlivosti	3	2
Rozměrová stabilita	+	++
Pevnost v ohybu	Beze změny	-
Tmavost barvy	+	++

Tabulka č. 5 - Změny vlastností způsobené tepelnou úpravou u jehličnatých dřevin typu Thermo-S a Thermo-D (Král 2005).

3.5.1. Používané dřeviny při výrobě

Používají se různé druhy dřevin, při různých technologických podmínkách, které závisí na druhu dřeviny a finálním způsobu užívání. Na tepelnou modifikaci se nejčastěji používají tyto dřeviny: borovice (*Pinus sylvestris*), smrk (*Picea abies*), bříza (*Betula pendula*) a topol (*Populus tremula*). Kromě těchto dřevin se také tepelně upravuje jasan (*Fraxinus excelsior*), modřín (*Larix sibirica*), olše (*Alnus glutinosa*) a buk (*Fagus sylvatica*) (ThermoWood Handbook 2003).

V této diplomové práci jsou zjišťovány vlastnosti tepelně modifikovaného dubového dřeva.

3.6. Vlastnosti dubu

3.6.1. Charakteristika dubu

Dub je rod rostlin z čeledi bukovitých. Duby jsou stálezelené nebo opadavé dřeviny se střídavými jednoduchými listy a nenápadnými květy. Celý rod zahrnuje 300 až 600 druhů. Duby jsou rozšířeny především v mírných a subtropických oblastech severní polokoule. Duby jsou dlouhověké, pomalu rostoucí stromy, řidčeji i keře, s tvrdým dřevem. Borka bývá hluboce brázditá nebo podélně odlupčivá. Zimní pupeny jsou vejcovité, s okrouhlým či hranatým průřezem, nahloučené při koncích větví a kryté střechovitě se překrývajícími šupinami. Listy jsou střídavé, jednoduché, s opadavými nenápadnými palisty. Čepel listů je nejčastěji laločnatá, řidčeji celistvá se zubatým okrajem nebo celokrajná. Žilnatina je zpeřená, s postranními žilkami buď paralelními, nevětvenými a běžícími až k listovému okraji, nebo větvenými a spojujícími se

před dosažením listového okraje. Květy jsou drobné, v jednopohlavních květenstvích. Samčí květenství jsou jehnědy. Samičí květenství jsou chudokvěté jehnědy nebo strboušky, vyvíjející se v paždí listů blíže konci větévky. Na bázi samičího květu je miskovitá číška. Plodem je nažka (označovaná též jako oříšek) podepřená zveličelou dřevnatou číškou a nazývaná žalud. Plody dozrávají v prvním nebo až ve druhém roce (Nekolová 2002, Němec 2005).

3.6.2. Makroskopické znaky

Je to kruhovitě pórovitá dřevina. Běl je úzká (1- 3 cm), nažloutlá až světlehnědá, jádro mohutné, světle až tmavě hnědé. Má znatelné nestejně široké letokruhy. Jarní cévy se jeví na příčném řezu jako dírky o světlosti 0,2 až 0,5 mm, letní cévy jsou řidší a užší 0,1 - 0,2 mm. V podélných řezech se cévy jeví jako trhlínky a čárky, které jsou obzvláště patrné v jádře, kde bývají cévy vyplněné thylami. Hlavní dřeňové paprsky jsou široké vybíhající od dřeně a vedlejší jsou kratší, úzké, četné a okem neviditelné. Dřeňové paprsky se jeví na radiálním řezu jako dlouhé a široké pásy často zkřivených lesklých „zrcadel“ šikmo napříč letokruhů, na tangenciálním řezu jako dlouhé, úzké a tmavé proužky a čáry. Pro velký obsah tříslovin patří mezi naše nejtrvanlivější dřeviny. Dubové dřevo pod vodou černá. Dobře se opracovává, ale hůře se suší a obtížně se impregnuje (Němec 2005, Nutsch 1999).



Obr. 15 - Řez radiální



Obr. 16 - Řez tangenciální

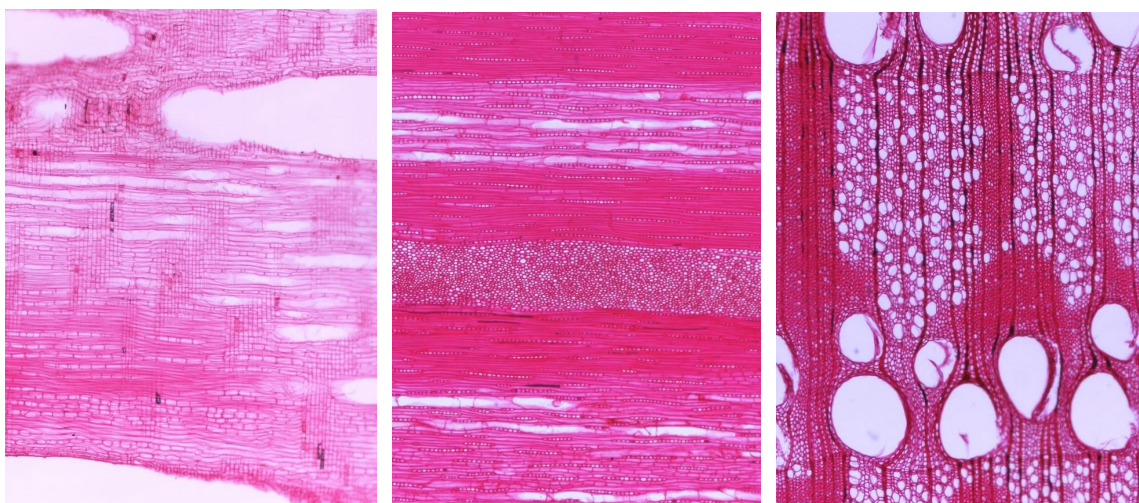


Obr. 17 - Řez příčný

(Vavrčík 2003)

3.6.3. Mikroskopické znaky

Anatomická stavba všech druhů dubu je velmi podobná. Tracheje (cévy) jsou velmi široké s jednoduchou nebo mřížkovou perforací. Seřazeny jsou jednotlivě nebo tvoří skupinky po 2 až 4. Perforace jarních cév je většinou jednoduchá, úzké cévy mají mřížkovou perforaci. Průměr jarních cév se pohybuje v rozpětí 0,1 - 0,4 mm, letních cév 0,01 - 0,05 mm. Tracheidy (cévice) jsou v dubovém dřevě početně zastoupeny hlavně v letním dřevě. Librifórní vlákna jsou u dubu vyvinutá jako buňky převládající hlavně v podélném směru. Zastoupení librifórních vláken se pohybuje v rozpětí 40 - 60%. Dřevní parenchym je tvořen z krátkých tenkostěnných buněk. Je uspořádán v nepravidelných jednořadových pásech. Tvoří široké vrstvy zejména v jarním dřevě. Jeho zastoupení je v rozpětí 2,8 - 8,1%. V dubovém dřevě se vyskytují dva druhy dřevňových paprsků. Široké dřevňové paprsky jsou tvořeny z 12 - 30 řad buněk, úzké dřevňové paprsky z jednoho nebo dvou řad buněk. Podíl dřevňových paprsků ve dřevě se pohybuje kolem 20% (Požgaj et al. 1997, Balabán 1955, www.tuzvo.sk).



Obr. 18 - Řez radiální

Obr. 19 - Řez tangenciální

Obr. 20 - Řez příčný

zvětšeno 40krát (fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev) [1.3.2013]

3.6.4. Základní fyzikální a mechanické vlastnosti dubového dřeva

	Značení	hodnota	jednotky
Hustota w=0%	ρ_0	0,696	g.cm^{-3}
Lineární sesychání	β_L	0,15	%
Radiální sesychání	β_R	4,2	%
Tangenciální sesychání	β_T	8,5	%
Objemové sesychání	β_V	13,7	%
Souč. tep. vodivosti lineární	λ_L	0,348	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Souč. tep. vodivosti radiální	λ_R	0,200	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Souč. tep. vodivosti tangenciální	λ_T	0,210	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Pevnost v tlaku podél vláken	σ_L	59,8	MPa
Pevnost v ohybu	Σ	85,2	MPa
Rázová houževnatost	Q	4,7	J.cm^{-2}

Tabulka č. 6 - Základní fyzikální a mechanické vlastnosti dubového dřeva

(Požgaj et al. 1997)

Základními vlastnostmi dubového dřeva jsou tvrdost, pevnost, houževnatost a trvanlivost. Z našich dřev nejdéle vzdoruje nejen povětrnostním podmínkám, ale i střídání vlhka a sucha. Dřevo dubu z hlediska trvanlivosti na vzduchu lze zařadit mezi velmi trvanlivé dřeviny. Z hlediska trvanlivosti v kontaktu se zemí, kde hrozí riziko poškození všemi typy hnilob, je zařazen mezi trvanlivé dřeviny. Nechráněné a neimpregnované dřevo dubu vydrží 40 - 120 let. Pod střechou má trvanlivost 100 až 200 let. Pod vodou je to 300 - 800 let a vždy suché dřevo dubu vydrží 600 - 1000 let.

Dubové dřevo je významná surovina pro mechanické zpracování. Dubové řezivo a přířezy se zpracovávají pro potřeby nábytkářského průmyslu, hlavně pro výrobu sedacího a stolového nábytku. Lepené dubové dřevo je velkoplošný materiál určený pro potřeby výroby skříňového nábytku, drahých interiérových výrobků (např. schodišť, zábradlí a jiných stavebně - truhlářských výrobků, oken a dveří). Důležité je pro výrobu klasických i mozaikových podlah. Nejvyšší sortimenty dubového dřeva jsou určeny pro výrobu dekoračních dřív. Díky jeho odolnosti a trvanlivosti se používá na stavbu lodí, vodních staveb, mostních konstrukcí, výrobu sudů pro kvalitní vína a destiláty, dále různých kádí

a sloupů. Je vhodným materiálem na řezbářské a soustružnické práce. Využívá se také na sportovní potřeby, ve výrobcích pro dopravní prostředky. Tenké a nekvalitní sortimenty dubového dřeva nacházejí své využití v celulózo-papírenském průmyslu, pro výrobu velkoplošných materiálů atd. Dub je jednou z velmi žádaných a ceněných dřevin na trhu. Výrobky z dubu však také v některých případech podléhají módním trendům (Němec 2005, Požgaj et al. 1997, www.tuzvo.sk).



Obr. 21 - Ukázka barevné změny tepelně modifikovaného dubu, podmínky jsou popsané v kapitole 5.2 (foto Hasenkopf)

4. Vlastnosti dřeva

Dřevo má svoje nenahraditelné vlastnosti, které ho zařazují mezi materiály s širokým uplatněním. Vlastnosti se dělí na fyzikální a mechanické.

4.1. Fyzikální vlastnosti

Jsou to ty vlastnosti dřeva, které můžeme zkoumat, bez narušení chemického složení a celistvosti posuzovaného materiálu. V první řadě je nutné si uvědomit, že dřevo je výrazně anizotropní materiál, což znamená, že má v různých směrech velice odlišné vlastnosti.

4.1.1. Hustota

Hustota dřeva vyjadřuje podíl mezi hmotností a objemem. Nejčastěji se vyjadřuje v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a označuje se řeckým písmenem ρ . Hustota dřeva je důležitá při jeho mechanickém a chemickém zpracování. Také je důležitá ve stavebnictví, kde je potřeba nízká hmotnost při vysoké pevnosti (Požgaj et al. 1997).

Vypočítá se z podílu hmotnosti m_w a objemu V_w . Hmotnost i objem dřeva musí mít stejnou vlhkost.

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

Hustota dřeva se zvyšuje s vlhkostí, ale hmotnost a objem dřeva nerostou stejným způsobem. Zatímco hmotnost dřeva roste se zvyšující se vlhkostí až do maximálního nasycení (maximální vlhkosti dřeva), objem se zvyšuje jen do meze hygroskopicity. Přepočtový vztah mezi ρ_0 a ρ_{12} vychází z definic absolutní vlhkosti a bobtnání dřeva, protože zvětšování hmotnosti dřeva v rozsahu vody vázané je spojeno s jeho objemovým bobtnáním.

Závislost mezi hustotou a mechanickými vlastnostmi dřeva je složitá, protože pevnost dřeva nezávisí pouze na množství dřevní substance v objemové jednotce, ale také na anatomické stavbě dřeva.

Mezi moduly pružnosti a hustotou dřeva existuje kladná lineární závislost. Zvýšení hustoty dřeva o $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ způsobí zvětšení modulu pružnosti ve směru vláken o 2-5 %, napříč vláken o 1-9 %. Vliv hustoty se nejvíce projevuje u suchého dřeva.

Pevnost dřeva se s rostoucí hustotou obecně zvyšuje. Vztah mezi hustotou a pevností dřeva ale nemusí být vždy významný. Jasnější vztah mezi strukturou, hustotou a mechanickými vlastnostmi dřeva můžeme zjistit analyzováním makroskopické stavby letokruhů (Gandelová et al. 2002, Požgaj et al. 1997).

Konvenční hustota je veličinou velmi vhodnou pro technologické výpočty v lesním a dřevozpracujícím průmyslu. Pomocí této veličiny můžeme přepočítat zásobu mokrého dřeva v objemových jednotkách na hmotnost sušiny a naopak (uplatnění při váhové přejímce dřeva) (Gandelová et al. 2002).

Min	Max	Průměr	Jednotky	Vlhkost	Zdroj
0,393	0,823	0,644	g.cm^{-3}	15-20	Lexa et al. 1952
0,43	0,96	0,69	g.cm^{-3}	15	Krzysik 1957
0,42	0,96	0,68	g.cm^{-3}	12	Balabán 1955
0,43	0,96	0,69	g.cm^{-3}	15	Kollmann 1951
-	-	0,725	g.cm^{-3}	12	Gandelová 2002
-	-	0,690	g.cm^{-3}	12-15	Wagenführ 2000

Tabulka č. 7 - Porovnání hustoty dubu z různých zdrojů

4.1.2. Sesychání

Sesychání dřeva můžeme definovat jako proces, při kterém se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa v důsledku ztráty vody vázané. Volná voda se ze dřeva vypařuje poměrně rychle a nevyvolává žádné zmenšení rozměru, i když se zmenšuje jeho hmotnost. Vypařování vázané vody je mnohem pomalejší a je spojené se sesycháním dřeva, které začne od okamžiku, kdy vlhkost dřeva začne klesat pod BNV.

Proces sesychání je způsoben vypařováním vody vázané, proto se přibližují fibrily k sobě. Sesychání však není stejné ve všech směrech. V podélném směru dřevo sesychá nejméně a v tangenciálním směru nejvíce, a to až 1,5 - 2krát více než ve směru radiálním (Lexa 1952, Požgaj et al. 1997).

Hodnoty sesychání (%)				Vlhkost (%)	Zdroj
Podélné	Radiální	Tangenciální	Objemové		
0,4	4	7,8	12,6	Čerstvé – 0	Lexa et al. 1952
0,15	4,2	8,5	13,7	Čerstvé – 0	Požgaj et al. 1997
-	4	7,8	-	Čerstvé – 0	Balabán 1955
0,4	4	7,8	12,2	Čerstvé – 0	Kollmann 1951
-	4 - 4,6	7,8 - 10	12,6 – 15,6	Čerstvé – 0	Wagenführ 2000

Tabulka č. 8 - Porovnání sesychání dubu z různých zdrojů

4.1.3. Navlhání

Dřevo je navlhavý materiál, který má schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. Dřevo dosáhne při daných podmínkách (relativní vzdušná vlhkost a teplota) rovnovážné vlhkosti dřeva. Pokud je vlhkost dřeva nižší než stav vlhkostní rovnováhy dřevo přijímá - absorbuje vodu ve formě vodní páry, pokud je vyšší, nastává opačný proces a dřevo ztrácí vodu, což nazýváme desorpce. Rozdíl sorpčních izoterm, závislosti relativní vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě, nazýváme hystereze sorpce. Průběh sorpční izotermy je na obrázku 4 (Gandelová et al. 2002).

4.2. Mechanické vlastnosti

Je to schopnost dřeva vzdorovat účinkům vnějších mechanických sil. Dřevo má v různých směrech různé mechanické vlastnosti. Využívají se při používání dřeva jako konstrukčního materiálu.

4.2.1. Rázová houževnatost v ohybu

Cílem takového namáhání je zjistit velikost práce, která se spotřebuje na přeražení dřeva za daných podmínek. Práce spotřebovaná na přeražení tělesa se vyjadřuje v $J.cm^{-2}$. Kvalitu dřeva můžeme charakterizovat podle typu a tvaru zlomu po přeražení. Dřevo s vysokou houževnatostí vytváří vláknitý zlom. Křehké dřevo má typický tupý, nevláknitý schodovitý zlom. Dřevo listnáčů je v přeražení průměrně dvakrát odolnější než dřevo jehličnatých dřevin. Při zkoušení dřeva rázovou zkouškou se musí uvažovat s tím, že celková práce spotřebovaná na přeražení tělesa se skládá ze dvou veličin. Práce spotřebovaná na ohyb tělesa a práce spotřebovaná na otačení řezné hrany kladiva. Proto je důležité používat tělesa s velkým štihlostním poměrem (Požgaj et al. 1997, ČSN 49 0117).

Rázová houževnatost	Jednotky	Vlhkost %	Zdroj
4,7	$J.cm^{-2}$	10-12	Požgaj et al. 1997
7,7	$J.cm^{-2}$	12	Gandelová 2002
6,0	$J.cm^{-2}$	12	Wagenführ 2000

Tabulka č. 9 - Porovnání rázové houževnatosti z různých zdrojů

4.2.2. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken

Tlaková pevnost dřeva ve směru vláken je z praktického hlediska velmi důležitou vlastností dřeva. Působením tlaku na zkušební těleso podél vláken dojde k deformaci, projevující se zkrácením délky. Charakter deformace závisí na jakosti, stavbě dřeva, hustotě a vlhkosti (Gandelová et al. 2002).

Pevnost v tlaku ve směru vláken se pohybuje v rozpětí od 30 do 70 MPa. Nejvyšší průměrnou pevnost má dřevo akátu, habru a dubu. Variabilita pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny kolísá v rozpětí od 8 do 16 % (Požgaj et al. 1997).

Pevnost v tlaku ve směru vláken	Jednotky	Vlhkost	Zdroj
520	$kp.cm^{-2}$	15	Lexa et al. 1952
650	$kp.cm^{-2}$	12	Kollmann 1951
59,8	MPa	10-12	Pažgaj et al. 1997
61	MPa	12	Wagenführ 2000

Tabulka č. 10 - Porovnání meze pevnosti v tlaku ve směru vláken z různých zdrojů

(1 MPa = 10,197214 $kp.cm^{-2}$)

5. Metodika práce

5.1. Výběr a příprava vzorků

Materiál potřebný k výrobě vzorků na zjištění vlivu tepelné modifikace na vlastnosti dřeva dubu poskytla firma TIMLESS TIMBER, s.r.o. Velká nad Veličkou. Tato firma provedla i tepelnou úpravu poloviny vybraného materiálu. Pro analýzu bylo vybráno dubové dřevo, jehož vlastnosti jsou popsány v kapitole výše. (kap. 3.6.)

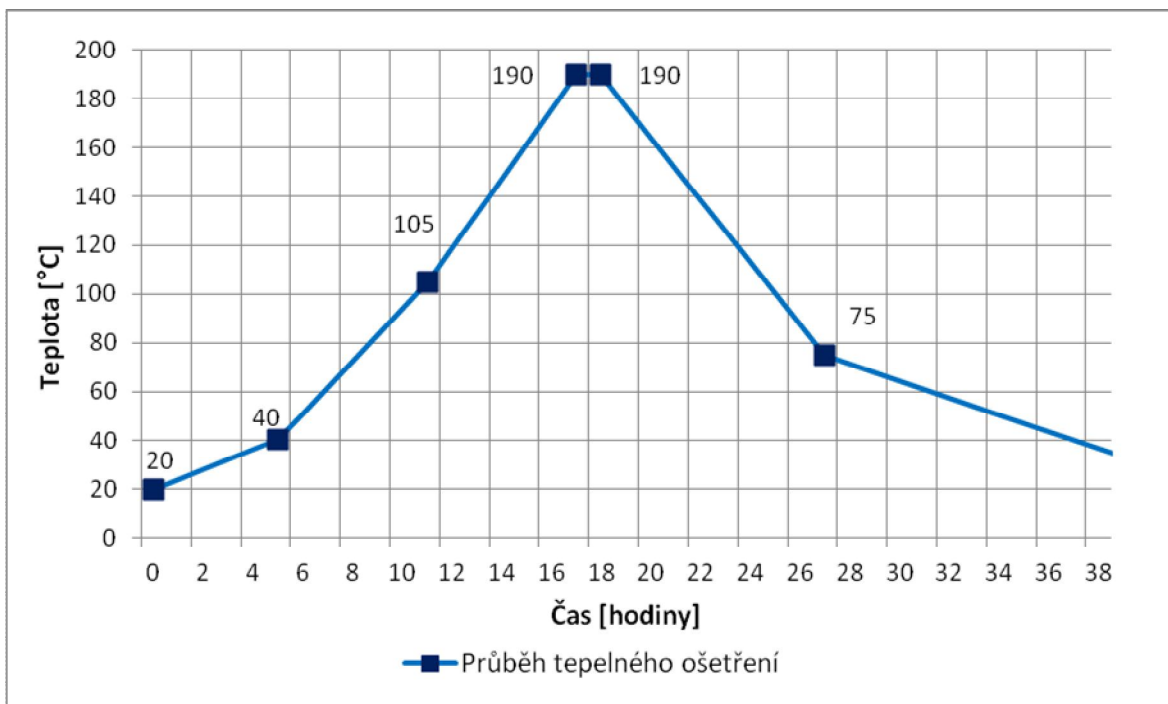
Vybrané dubové prkno bylo přeříznuto na dvě stejné poloviny. Jedna polovina byla odložena pro následné další zpracování a druhá polovina byla tepelně upravena v zařízení na tepelnou úpravu dřeva. Poté byly obě poloviny převezeny do dílen Fakulty lesnické a dřevařské na České zemědělské univerzitě v Praze, kde došlo k rozřezání na přířezy, které se ponechaly při relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 20 °C pro ustálení vlhkosti. Poté byly z přířezů vyrobené vzorky potřebné k provedení zkoušek (Šimek 2012).

5.2. Tepelné ošetření materiálu

Samotná tepelná úprava byla provedena v zařízení pro tepelnou úpravu dřeva firmy Timless Timber Tec, které firma Timless Timber s.r.o. provozuje. Toto zařízení je určeno k tepelnému ošetření dřeva technologií ThermoWood v atmosféře vodní páry.

Výhodou tohoto zařízení je stlačení upraveného materiálu a zabránění tak tvarové deformaci a kroucení. Každá vrstva narovnaného dřeva je proložena kovovými pláty, které zajišťují přenos tlaku, stabilizaci dřeva a přenos tepla.

Samotná tepelná úprava dubového dřeva použitého na vzorky byla provedena při následujících podmínkách. Náplň pece 7 m³ dřeva s počáteční vlhkostí přibližně 11 %. První fáze - ohřev - trvala 5,5 hodiny s dosaženou teplotou 40 °C. Následné sušení trvalo 6 hodin při dosažení teploty 105 °C. Další ohřev na teplotu úpravy 190 °C trval 6 hodin. Samotná tepelná úprava trvala 1 hodinu za teploty 190 °C. Poslední fáze ochlazení trvala 9 hodin, při ní klesla teplota na 75 °C a poté se pec vypne a otevřou se dveře. Dřevo se dále chladí samovolně, až dosáhne teploty přibližně 30 °C, kdy se vyndává z pece (Šimek 2012).



Graf č. 1 - Průběh tepelné úpravy dubu použitého k odběru vzorků v této diplomové práci



Obr. 22 - Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou (Timless Timber)

Ostatní obrázky technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou jsou v příloze obr. 30 a 31.

5.3. Stanovení fyzikálních a mechanických zkoušek

5.3.1. Fyzikální zkoušky

5.3.1.1. Hustota

Měření hustoty proběhlo na 437 tělesech. Neupraveného dubu se měřilo 307 vzorků a tepelně modifikovaného 130 vzorků. Zkoušené vzorky byly získány i z těles, na kterých se zkoušela rázová houževnatost, aby se zjistila závislost na hustotě. Vzorky se vyhotovily do tvaru pravoúhlého hranolu se čtvercovou základnou 20 mm x 20 mm a délkou 30 mm. Hmotnost zkoušených těles se zjistila na váze s přesností 0,01 g. Rozměry se změřily pomocí posuvného měřítka s přesností 0,01 mm. Hustota byla vypočtena při vlhkosti, která byla momentálně ve zkušební podle vzorce:

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} \cdot 10^6 \quad [\text{g.cm}^{-3}]$$

Kde: ρ_w hustota dřeva při vlhkosti W,
 m_w hmotnost zkoušeného tělesa v g, při vlhkosti W,
 a_w, b_w, l_w jsou rozměry zkoušeného tělesa v mm, při vlhkosti W.

Hustota dřeva byla přepočítána na vlhkost 12 % podle vzorce:

$$\rho_{12} = \rho_w \cdot \left[1 - \frac{(1-K) \cdot (W-12)}{100} \right] \quad [\text{g.cm}^{-3}]$$

Kde: K koeficient objemového sesychání při změně vlhkosti o 1 % K = 0,85

Konvenční hustota při maximálním objemu byla spočtena na 40 vzorcích neupraveného a 38 vzorcích upraveného dřeva podle vzorce:

$$\rho_{KV \max} = \frac{m_0}{a_{\max} \cdot b_{\max} \cdot l_{\max}} \quad [\text{g.cm}^{-3}]$$

Kde: m_0 hmotnost zkušební tělesa v suchém stavu v g
 $a_{\max}, b_{\max}, l_{\max}$ rozměry zkušební tělesa při maximálně nabobtnalém dřevě v mm (ČSN 49 0108).



Obr. 23 - Váha Sartorius BP 3100 S
(foto Hasenkopf)



Obr. 24 - Sušárna Binder
(foto Hasenkopf)

5.3.1.2. Sesychání dřeva

Pro zjištění hodnot sesychání bylo postupováno podle normy ČSN 49 0128. Na této zkoušce bylo měřeno 40 vzorků neupraveného dubu a 40 vzorků tepelně modifikovaného dubu o rozměrech 20x20x30 mm. Jednalo se o stejné vzorky, které byly použity na měření hustoty. Všech 80 vzorků se ponořilo do vody a zatížilo, aby bylo přibližně 10 mm pod hladinou vody. Zkušební tělesa se nesmí dotýkat stěn ani dna nádoby. Po pěti dnech se vyměnila voda a vzorky se nechaly namočené až do ustálení rozměrů, které se kontrolovaly po 3 dnech. Jakmile se rozměry po dvou následujících měřeních nezměnily, vzorky se vyndaly z vody, osušily a změřily ve středu každého vzorku pomocí posuvného měřítka ve všech třech směrech s přesností 0,01 mm. Poté se nechaly aklimatizovat ve zkušebně při stálých podmínkách $t = 20 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $w_r = 65 \pm 5 \text{ } \%$. Po dosažení rovnovážného stavu se vzorky vložily do sušárny. Sušení se ukončilo, když tělesa dosáhla rovnovážného stavu při teplotě $103 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Poté se vzorky opět změřily na stejném místě ve všech třech směrech s přesností 0,01 mm (ČSN 49 0128).



Obr. 25 - Posuvné měřítko (foto Hasenkopf)

Hodnotu procentuálního sesychání při změně vlhkosti z maximální na nulovou vlhkost můžeme vyjádřit vztahem:

$$\beta_{\max} = \frac{l_{\max} - l_0}{l_{\max}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\beta_{V \max} = \frac{(l_{r \max} \cdot l_{t \max} \cdot l_{a \max}) - (l_{rn} \cdot l_{tn} \cdot l_{an})}{(l_{r \max} \cdot l_{t \max} \cdot l_{a \max})} \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde:

$l_{r \max}$, $l_{t \max}$, $l_{a \max}$ rozměry zkušební tělesa v radiálním, tangenciálním a podélném směru při vlhkosti nad bodem nasycení buněčných stěn v mm

l_{rn} , l_{tn} , l_{an} rozměry zkušební tělesa v radiálním, tangenciálním a podélném směru při nulové vlhkosti v mm (ČSN 49 0128).

5.3.1.3. Navlhání

Zkouška probíhala na 40 vzorcích neupraveného a 40 vzorcích upraveného dubu. Zkušební tělesa o rozměrech 20x20x30 mm se opatrně vysušila při teplotě 103±2 °C. Poté se tělesa vložila do klimatizované komory - inkubátoru CLIMACELL 707 tím způsobem aby ležela na podélné ploše. Přitom se nesmí ostatními plochami dotýkat jiných těles nebo stěn komory. Zkušební těleso se nechalo v klimatizační komoře do ustálení hmotnosti. Poté se těleso zvažilo s přesností 0,01 g. Zkušební tělesa se postupně vystavovala těmto klimatizačním podmínkám: teplota vzduchu vždy 20 ± 2°C a relativní vlhkost vzduchu se postupně měnila na 33%, 54%, 75%, 90% (ČSN 49 0104).

Hodnotu procentuálního navlhání můžeme vyjádřit vztahem:

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

Kde:

m_w hmotnost vzorku při daných podmínkách

m_0 hmotnost vzorku při nulové vlhkosti (ČSN 49 0104)



Obr. 26 - Uložení vzorků v klimatizační komoře (foto Hasenkopf)

5.3.2. Mechanické zkoušky

5.3.2.1 Zjišťování rázové houževnatosti v ohybu

Měření bylo provedeno na 86 vzorcích pomocí Charpyho kladiva (obr. 27 a 28) podle normy ČSN 49 0117. Ve středu délky zkušebního tělesa byla změřena posuvným měřítkem výška a šířka tělesa. Zkoušené těleso, které bylo symetricky uložené na podporách se přerazilo pomocí kladiva jedním úderem na radiální plochu. Práce pohlcená zkušebním tělesem se měřila s přesností 1 J. Rázová houževnatost A_w se počítala podle vzorce:

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

Kde: Q práce vynaložená na přeražení tělesa v J,

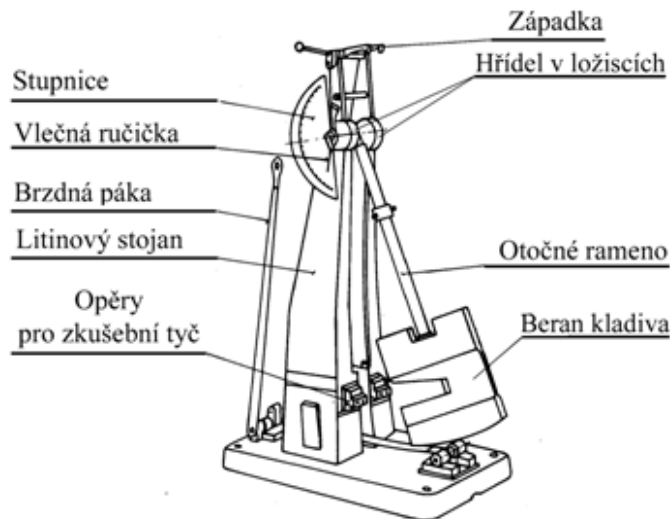
b, h rozměry tělesa v radiálním a tangenciálním směru v cm.

Poté se rázová houževnatost přepočítala na vlhkost 12 % a zaokrouhlila na $0,1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ podle vzorce:

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

Kde: α opravný vlhkostní koeficient, pro všechny dřeviny 0,02,

w vlhkost dřeva v % (Požgaj et al. 1997, ČSN 49 0117).



Obr. 27 - Schéma Charpyho kladiva
(ime.fme.vutbr.cz) [2.1.2013]



Obr. 28 - Charpyho kladivo
(foto Hasenkopf)

5.3.2.2. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken

V této zkoušce se zjišťuje maximální zatížení, kdy dojde k destrukci zkušebního vzorku. Následně se vypočítá mez pevnosti v tlaku ve směru vláken. Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN 49 0110. Zkoušce bylo podrobena 30 neupravených a 30 upravených vzorků o rozměrech 20x20x30 mm, u kterých bylo naměřeno maximální zatížení. U všech těles se v polovině jejich výšky změřily rozměry s přesností na 0,01 mm. Následně byly vzorky vloženy do přístroje, kde byly rovnoměrně zatěžovány při konstantní rychlosti posuvu vrchní zátěžové hlavy. Nastavení stroje bylo provedeno tak, aby postup souhlasil s normou, tedy aby porušení tělesa proběhlo za $(1 \pm 0,5)$ min od začátku zatěžování daného zkušebního tělesa. Následně byla vypočítána mez pevnosti ve směru vláken podle vzorce:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{a \cdot b} \quad [\text{MPa}]$$

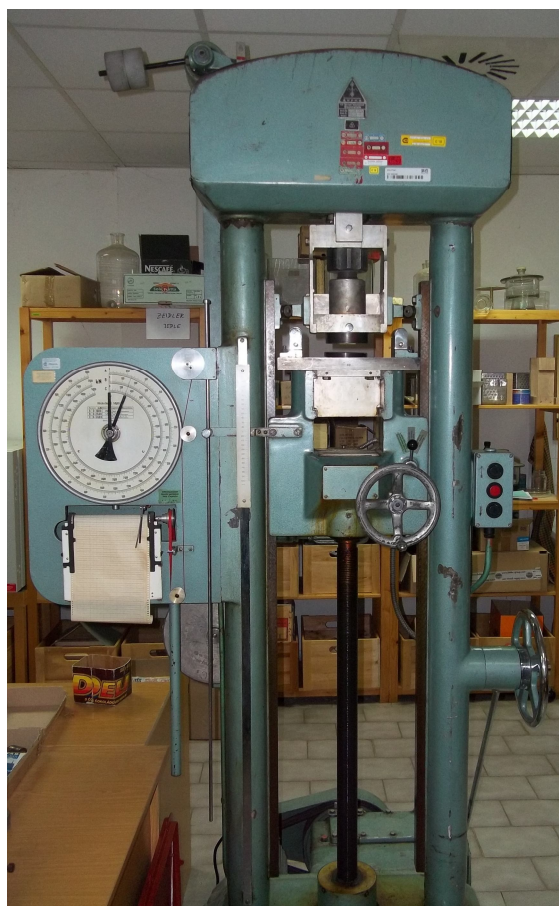
Kde: F_{\max} maximální zatížení v N
 a, b průřez vzorku v mm

Poté se mez pevnosti přepočítala na vlhkost 12 % podle vzorce:

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

Kde: α opravný vlhkostní koeficient, pro všechny dřeviny 0,04,

w vlhkost dřeva v % (Požgaj et al. 1997, ČSN 49 0110).



Obr. 29 - Zkušební stroj (foto Hasenkopf)

5.4. Zpracování a vyhodnocování dat

Průběh zkoušek, vyhodnocení výsledků a zaokrouhlování probíhalo podle pokynů v normách. Poté byly zjištěny příslušné statistické hodnoty: aritmetický průměr, medián, minimum, maximum, směrodatná odchylka a variační koeficient. Také byla zjišťována regresní analýza, index determinace a analýza rozptylu.

5.4.1. Statistické zpracování dat

Aritmetický průměr

Definice aritmetického průměru je součet všech hodnot vydělený jejich počtem.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

kde μ - průměrná hodnota

N - rozsah souboru

X_i - zjištěné hodnoty (iostat.vse.cz).

Medián

Je hodnota středního členu. Pokud by byl sudý počet, medián by byl průměrem dvou hodnot ve středu, označuje se písmenem \tilde{x} .

Minimum

Minimum je matematická funkce, jejíž funkční hodnota představuje nejnižší hodnotu ze všech vstupních parametrů.

Maximum

Maximum je matematická funkce, jejíž funkční hodnota představuje nejvyšší hodnotu ze všech vstupních parametrů.

Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je jednou z nejpoužívanějších měr kolísavosti výkonnosti fondu. Vyjadřuje rozptyl hodnot kolem střední hodnoty a vypovídá o tom, jak se hodnoty od této střední hodnoty (průměru) liší.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

kde x_i - hodnota i-tého pozorování

n - počet pozorování

\bar{x} - průměrná hodnota všech pozorování (iostat.vse.cz).

Variační koeficient

Variační koeficient se definuje jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Obvykle se vyjadřuje v procentech. Variační koeficient má smysl jen tehdy, nabývá-li znak x jen nezáporných hodnot.

$$V = \frac{s}{x} \cdot 100 \quad [\%]$$

Variační koeficient bývá u jednotlivých vlastností materiálů poměrně konstantní. Při zjišťování fyzikálních a mechanických vlastností dřeva se variační koeficient pohybuje: pro hustotu 6 - 9 %, pro rázovou houževnatost 25 - 35 % (Doležal 1973).

Regresní analýza

Regresní analýza je označení statistických metod, pomocí nichž odhadujeme hodnotu jisté náhodné veličiny na základě znalosti jiných veličin (iastat.vse.cz).

Index deteminace

Index determinace udává kvalitu regresního modelu, přesněji vyjádřeno udává, kolik procent rozptylu vysvětlované proměnné je vysvětleno modelem. Nabývá hodnot od nuly do jedné, přičemž hodnoty blízké nule značí špatnou kvalitu regresního modelu a hodnoty blízké jedné značí dobrou kvalitu regresního modelu (iastat.vse.cz).

Analýza rozptylu

Analýza rozptylu (ANOVA) byla provedena v softwaru STATISTICA Version 10. Anova představuje případ analýzy rozptylu, kdy analyzujeme účinek jednoho faktoru na zkoumanou závisle proměnnou. V případě jednofaktorové analýzy rozptylu jde o zjišťování rozdílů průměrů mezi více skupinami (iastat.vse.cz).

6. Výsledky a diskuze

6.1. Fyzikální vlastnosti

6.1.1. Hustota

6.1.1.1. Hustota při 12% vlhkosti

Hustota neupraveného dubu byla měřena na 307 vzorcích. Průměrná hustota dřeva při vlhkosti 12 % byla vypočtena $0,707 \text{ g.cm}^{-3}$. Ostatní spočtené hodnoty jsou v tabulce č. 11. Variační koeficient byl vypočítán 7,26 %, Doležal (1973) uvádí interval 6 – 9 % pro hustotu. Zjištěné hodnoty jednotlivých prken jsou v tabulce č. 12.

Balabán (1955) udává hustotu při 12 % vlhkosti pro dubové dřevo $0,68 \text{ g.cm}^{-3}$, Krzysik (1957) a Kollmann (1951) $0,687 \text{ g.cm}^{-3}$ a Gandelová (2002) $0,725 \text{ g.cm}^{-3}$. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s naměřenými výsledky.

Počet vzorků [ks]	307
Aritmetický průměr [g.cm^{-3}]	0,707
Medián [g.cm^{-3}]	0,697
Minimum [g.cm^{-3}]	0,483
Maximum [g.cm^{-3}]	0,917
Směrodatná odchylka [g.cm^{-3}]	0,051
Variační koeficient [%]	7,26

Tabulka č. 11 - Zjištěné hodnoty hustoty neupraveného dubu

Prkno	Počet těles	Průměr	Medián	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
1	30	0,750	0,754	0,656	0,833	0,049	6,48
2	48	0,700	0,708	0,482	0,778	0,050	7,10
3	24	0,719	0,735	0,671	0,774	0,033	4,61
4	40	0,736	0,738	0,665	0,804	0,037	5,05
5	27	0,681	0,676	0,633	0,732	0,027	3,93
6	60	0,684	0,684	0,622	0,737	0,027	3,90
7	49	0,668	0,670	0,634	0,707	0,018	2,70
8	29	0,766	0,746	0,679	0,917	0,071	9,31

Tabulka č. 12 - Zjištěné hodnoty hustoty neupraveného dubu pro jednotlivá prkna

Zjištěné hodnoty pro tepelně upravený dub jsou v tabulce č. 13 a pro jednotlivá prkna v tabulce č. 14. Hustota tepelně upraveného dubu při 12 % vlhkosti vychází o $0,023 \text{ g.cm}^{-3}$ (3,1 %) vyšší než neupraveného. Směrodatná odchylka u tepelně modifikovaného dřeva dubu byla spočtena vyšší o $0,043 \text{ g.cm}^{-3}$ a variační koeficient

o 5,69 %. Na základě statistického vyhodnocení ANOVA byla prokázána odlišnost hustoty neupraveného a tepelně modifikovaného dřeva.

Počet vzorků [ks]	131
Aritmetický průměr [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,730
Medián [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,708
Minimum [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,599
Maximum [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,910
Směrodatná odchylka [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,094
Variační koeficient [%]	12,94

Tabulka č. 13 - Zjištěné hodnoty hustoty tepelně upraveného dubu

Prkno	Počet těles	Průměr	Medián	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
1	14	0,785	0,777	0,723	0,863	0,051	6,52
2	13	0,818	0,821	0,795	0,837	0,013	1,59
3	14	0,801	0,797	0,769	0,846	0,021	2,67
4	22	0,853	0,852	0,801	0,910	0,035	4,14
5	11	0,680	0,674	0,652	0,729	0,027	4,04
6	13	0,654	0,656	0,618	0,676	0,017	2,65
7	8	0,631	0,626	0,616	0,648	0,014	2,17
8	18	0,664	0,665	0,616	0,706	0,028	4,18
9	18	0,611	0,611	0,599	0,633	0,009	1,40

Tabulka č. 14 - Zjištěné hodnoty hustoty tepelně upraveného dubu pro jednotlivá prkna

6.1.1.2. Konvenční hustota

Konvenční hustota neupraveného dřeva byla spočtena na 40 vzorcích. Aritmetický průměr byl spočítán $0,590 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, ostatní hodnoty jsou v tabulce č. 15.

Gandelová (2002) popisuje hodnotu konvenční hustoty pro dub $610 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a Požgaj et al. (1997) udává hodnotu $0,608 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s naměřenými výsledky.

Počet vzorků [ks]	40
Aritmetický průměr [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,590
Medián [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,597
Minimum [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,535
Maximum [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,655
Směrodatná odchylka [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,031
Variační koeficient [%]	5,21

Tabulka č. 15 - Zjištěné hodnoty konvenční hustoty neupraveného dubu

Konvenční hustota měřená na 38 vzorcích tepelně modifikovaného dřeva dubu byla spočtena $0,636 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, což je o $0,046 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (7,8 %) vyšší než u neupraveného dřeva.

Počet vzorků [ks]	38
Aritmetický průměr [g.cm ⁻³]	0,636
Medián [g.cm ⁻³]	0,605
Minimum [g.cm ⁻³]	0,570
Maximum [g.cm ⁻³]	0,744
Směrodatná odchylka [g.cm ⁻³]	0,062
Variační koeficient [%]	9,702

Tabulka č. 16 - Zjištěné hodnoty konvenční hustoty tepelně upraveného dubu

6.1.2. Sesychání

6.1.2.1. Maximální sesychání v radiálním směru

Maximální sesychání v radiálním směru bylo měřeno na 40 vzorcích neupraveného dubu. Aritmetický průměr byl spočítán 5,47 %, směrodatná odchylka 0,53 % a variační koeficient 9,74 %, ostatní hodnoty jsou v tabulce č. 17.

Požgaj et al. (1997) udává hodnotu pro sesychání v radiálním směru 4,2 %. Lexa et. al (1952), Balabán (1955) i Kollmann (1951) udávají hodnotu 4 % a Wagenführ (2000) uvádí interval 4 – 4,6 %. Tyto hodnoty jsou přibližně o 1 % nižší než naměřené výsledky.

Počet vzorků [ks]	40
Aritmetický průměr [%]	5,47
Medián [%]	5,45
Minimum [%]	4,43
Maximum [%]	6,74
Směrodatná odchylka [%]	0,53
Variační koeficient [%]	9,74

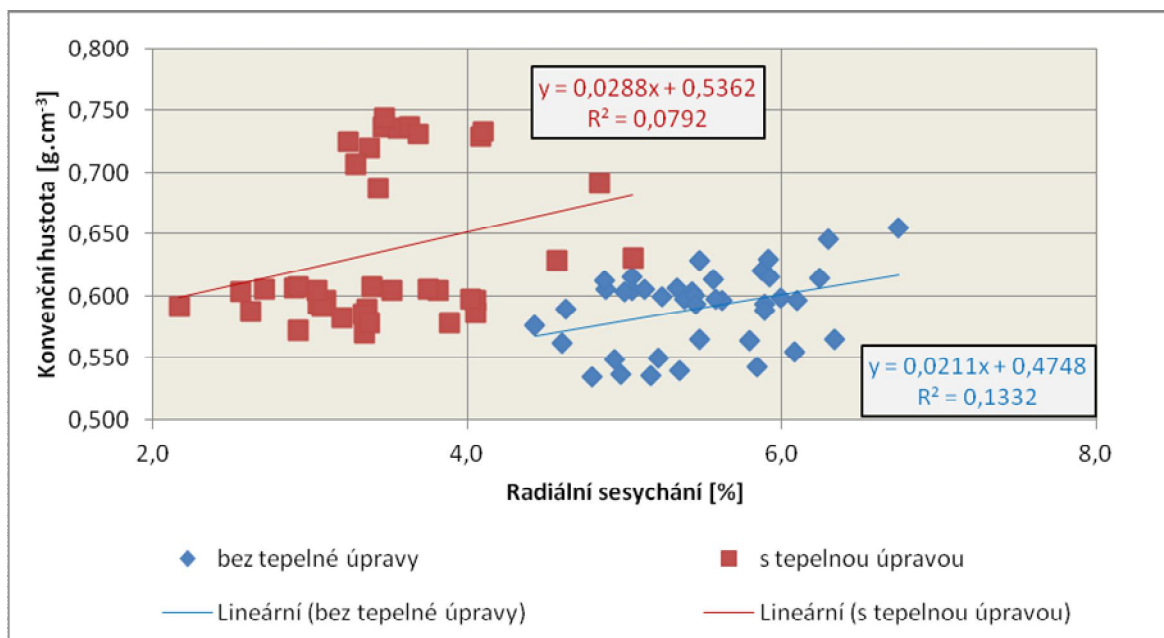
Tabulka č. 17 - Hodnoty maximálního sesychání v radiálním směru pro neupravený dub

Maximální sesychání v radiálním směru bylo měřeno na 38 vzorcích tepelně modifikovaného dubu. Aritmetický průměr byl spočítán 3,47 %, směrodatná odchylka 0,60 % a variační koeficient 17,34 %, ostatní hodnoty jsou v tabulce č. 18. Tepelně modifikovaný dub má oproti neupravenému o 36 % menší radiální sesychání.

Počet vzorků [ks]	38
Aritmetický průměr [%]	3,47
Medián [%]	3,39
Minimum [%]	2,17
Maximum [%]	5,05
Směrodatná odchylka [%]	0,60
Variační koeficient [%]	17,34

Tabulka č. 18 - Hodnoty maximálního sesychání v radiálním směru pro tepelně upravený dub

Závislost maximálního sesychání v radiálním směru v závislosti na hustotě je 7,92 % pro tepelně modifikovaný dub (rovnice regrese je $y=0,0288x+0,5362$). Pro neupravený dub je závislost 13,32 % (rovnice regrese je $y=0,0211x+0,4748$). Obě funkce jsou přímo úměrné, což je vidět v grafu č. 2.



Graf č. 2 - Závislost maximálního sesychání v radiálním směru na hustotě pro upravený a neupravený dub

6.1.2.2. Maximální sesychání v tangenciálním směru

Maximální sesychání v tangenciálním směru bylo měřeno na 40 vzorkách neupraveného dubu. Aritmetický průměr byl spočítán 8,18 %, směrodatná odchylka 0,79 % a variační koeficient 9,67 %, ostatní hodnoty jsou v tabulce č. 19.

Požgaj et al. (1997) udává hodnotu pro sesychání v tangenciálním směru 8,5 %. Lexa et. al (1952), Balabán (1955) i Kollmann (1951) udávají hodnotu 7,8 % a Wagenführ (2000) uvádí interval 7,8 – 10 %. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s naměřenými výsledky.

Počet vzorků [ks]	40
Aritmetický průměr [%]	8,18
Medián [%]	7,92
Minimum [%]	6,93
Maximum [%]	9,78
Směrodatná odchylka [%]	0,79
Variační koeficient [%]	9,67

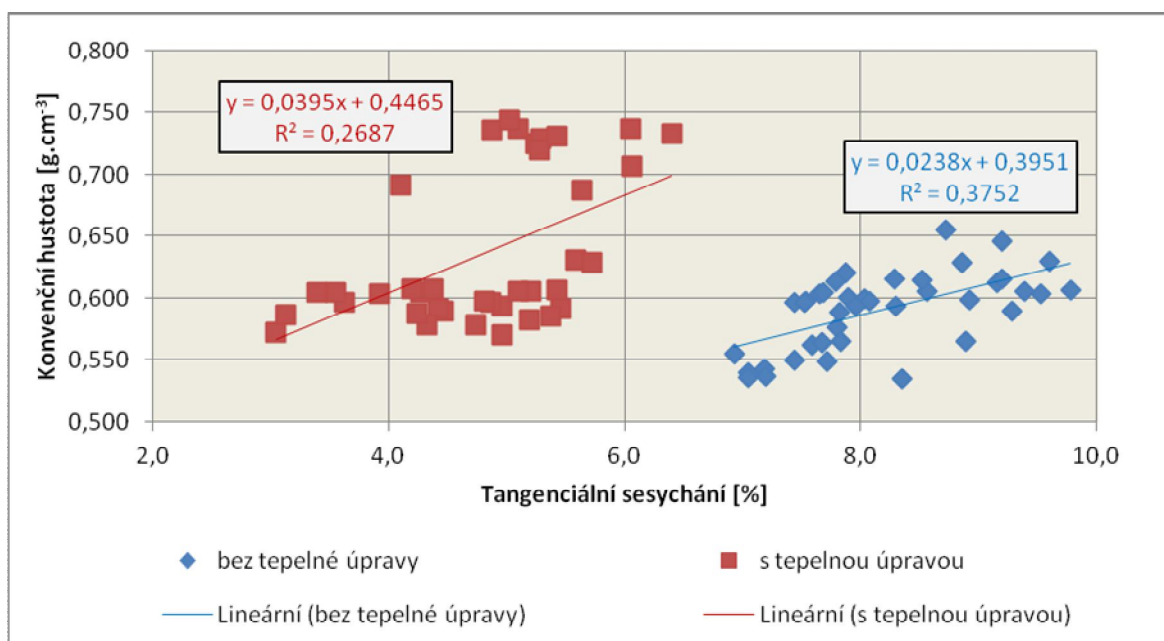
Tabulka č. 19 - Hodnoty maximálního sesychání v tangenciálním směru pro neupravený dub

Maximální sesychání v tangenciálním směru bylo měřeno na 38 vzorkách tepelně modifikovaného dubu. Aritmetický průměr byl spočítán 4,81 %, směrodatná odchylka 0,81 % a variační koeficient 16,86 %, ostatní hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 20. Tepelně modifikovaný dub má oproti neupravenému o 41 % menší tangenciální sesychání.

Počet vzorků [ks]	38
Aritmetický průměr [%]	4,81
Medián [%]	4,96
Minimum [%]	3,04
Maximum [%]	6,40
Směrodatná odchylka [%]	0,81
Variační koeficient [%]	16,86

Tabulka č. 20 - Hodnoty maximálního sesychání v tangenciálním směru pro tepelně upravený dub

Závislost maximálního sesychání v tangenciálním směru v závislosti na hustotě je 26,87 % pro tepelně modifikovaný dub (rovnice regrese je $y=0,0395x+0,4465$). Pro neupravený dub je závislost 37,52 % (rovnice regrese je $y=0,0238x+0,3951$). Obě funkce jsou přímo úměrné, což je vidět v grafu č. 3.



Graf č. 3 - Závislost maximálního sesychání v tangenciálním směru na hustotě pro upravený a neupravený dub

6.1.2.3. Maximální objemové sesychání

Maximální objemové sesychání bylo měřeno na 40 vzorkách neupraveného dubu. Aritmetický průměr byl spočítán 13,67 %, směrodatná odchylka 0,82 % a variační koeficient 5,98 %, ostatní hodnoty jsou v tabulce č. 21.

Požgaj et al. (1997) udává hodnotu pro objemové sesychání 13,7 %, Lexa et. al (1952) uvádí hodnotu 12,6 %, Kollmann (1951) uvádí hodnotu 12,2 % a Wagenführ (2000) uvádí interval 12,6 – 15,6 %. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s naměřenými výsledky.

Počet vzorků [ks]	40
Aritmetický průměr [%]	13,67
Medián [%]	13,46
Minimum [%]	12,26
Maximum [%]	15,37
Směrodatná odchylka [%]	0,82
Variační koeficient [%]	5,98

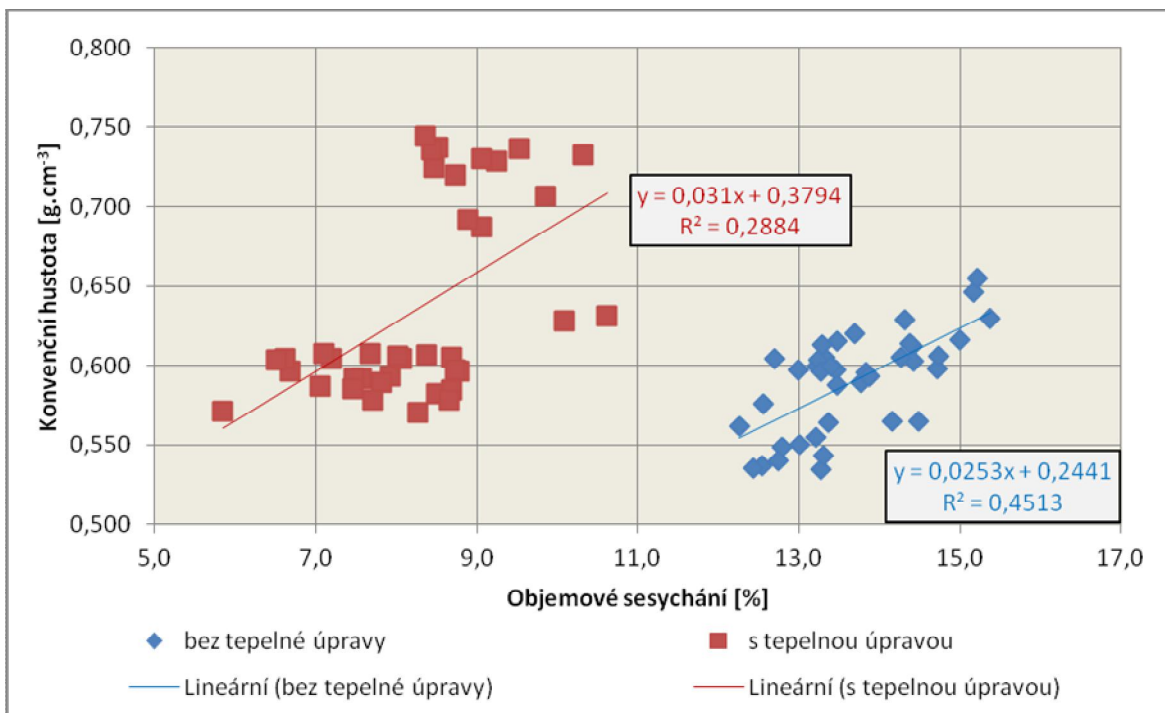
Tabulka č. 21 - Hodnoty maximálního objemového sesychání pro neupravený dub

Maximální objemové sesychání bylo měřeno na 38 vzorkách tepelně modifikovaného dubu. Aritmetický průměr byl spočítán 8,28 %, směrodatná odchylka 1,07 % a variační koeficient 12,91 %, ostatní hodnoty jsou uvedené v tabulce č. 22. Tepelně modifikovaný dub má oproti neupravenému o 39 % menší objemové sesychání. ThermoWood Handbook (2003) uvádí, že se může zlepšit rozměrová stabilita o 50 - 90 % v závislosti na úpravě.

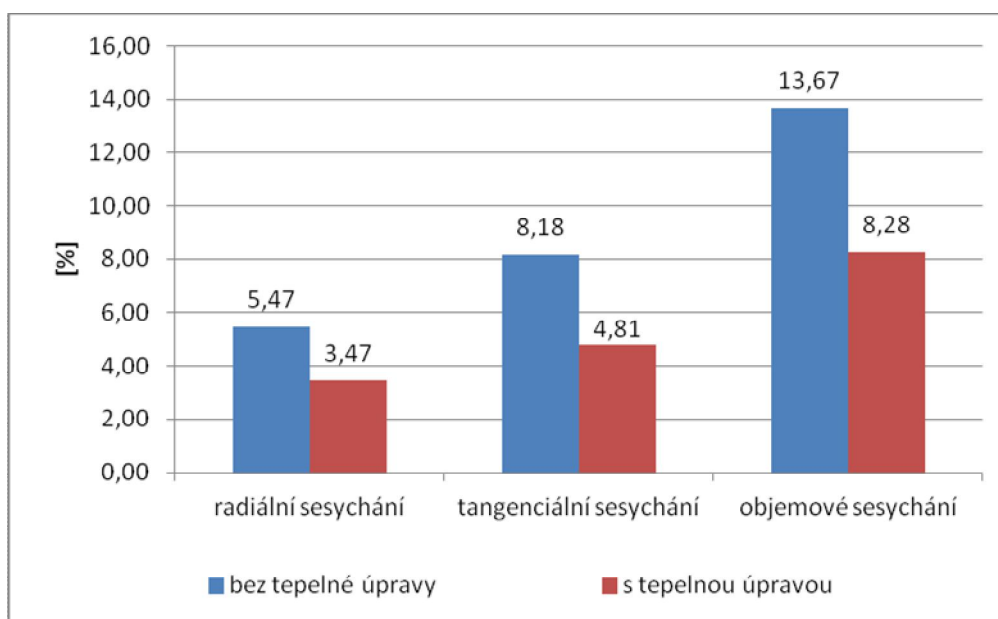
Počet vzorků [ks]	38
Aritmetický průměr [%]	8,28
Medián [%]	8,41
Minimum [%]	5,85
Maximum [%]	10,62
Směrodatná odchylka [%]	1,07
Variační koeficient [%]	12,91

Tabulka č. 22 - Hodnoty maximálního objemového sesychání pro tepelně upravený dub

Závislost maximálního objemového sesychání v závislosti na hustotě je 28,84 % pro tepelně modifikovaný dub (rovnice regrese je $y=0,031x+0,3794$). Pro neupravený dub je závislost 45,13 % (rovnice regrese je $y=0,0253x+0,2441$). Obě funkce jsou přímo úměrné, což je vidět v grafu č. 4.



Graf č. 4 - Závislost maximálního objemového sesychání na hustotě pro upravený a neupravený dub



Graf č. 5 - Porovnání radiálního, tangenciálního a objemového sesychání upraveného a neupraveného dubu

6.1.3. Navlhání

Navlhání bylo měřeno na 40 vzorkách neupraveného dubu. Spočtené hodnoty pro jednotlivé podmínky jsou uvedeny v tabulce č. 23.

	33 %	54 %	75 %	90 %
Počet vzorků [ks]	40	40	40	40
Aritmetický průměr [%]	4,43	7,58	12,21	22,19
Medián [%]	4,41	7,58	12,22	22,08
Minimum [%]	4,17	7,13	11,62	21,12
Maximum [%]	4,77	7,90	12,81	24,02
Směrodatná odchylka [%]	0,13	0,17	0,23	0,67
Variační koeficient [%]	2,95	2,24	1,88	3,02

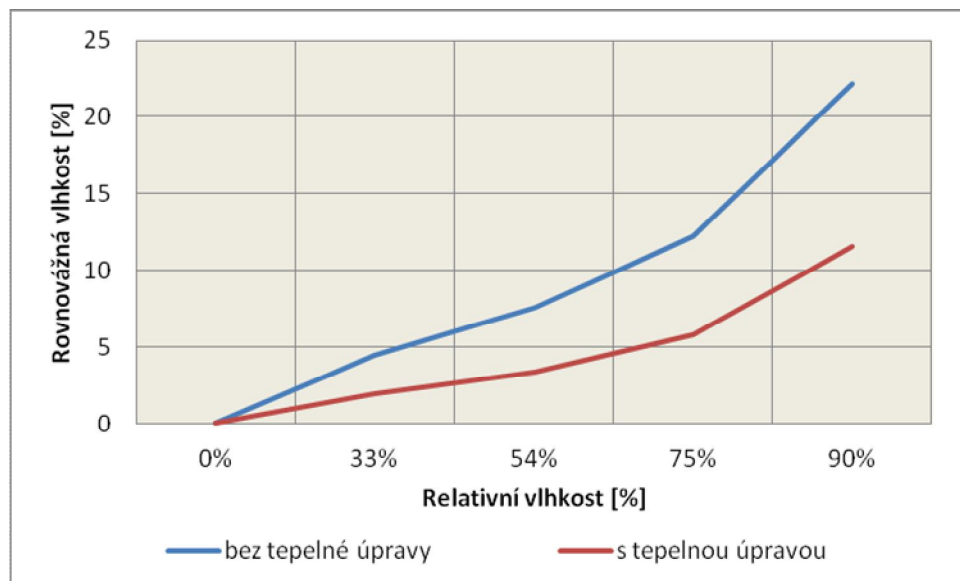
Tabulka č. 23 - Hodnoty navlhání pro neupravený dub při teplotě vzduchu $20 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu 33%, 54%, 75%, 90%

Navlhání bylo měřeno na 40 vzorkách tepelně upraveného dubu. Spočtené hodnoty pro jednotlivé podmínky jsou uvedeny v tabulce č. 24

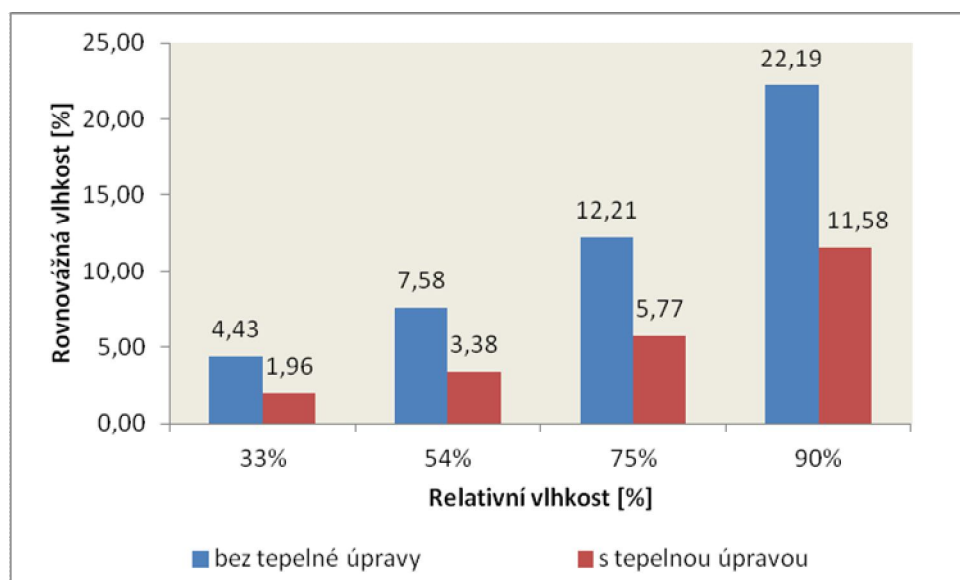
	33 %	54 %	75 %	90 %
Počet vzorků [ks]	40	40	40	40
Aritmetický průměr [%]	1,96	3,38	5,77	11,58
Medián [%]	1,94	3,32	5,59	11,14
Minimum [%]	1,50	2,86	5,03	9,77
Maximum [%]	2,38	4,06	7,48	15,08
Směrodatná odchylka [%]	0,21	0,30	0,60	1,42
Variační koeficient [%]	10,53	8,84	10,40	12,25

Tabulka č. 24 - Hodnoty navlhání pro tepelně upravený dub při teplotě vzduchu $20 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu 33%, 54%, 75%, 90%

Tepelně modifikované dřevo dubu má přibližně o 50 % nižší rovnovážnou vlhkost, což je vidět v následujících grafech č. 6 a 7. ThermoWood Handbook (2003) uvádí snížení hygroskopicity o polovinu v závislosti na úpravě.



Graf č. 6 - Vliv relativní vlhkosti na rovnovážnou vlhkost pro upravený a neupravený dub



Graf č. 7 - Vliv relativní vlhkosti na rovnovážnou vlhkost pro upravený a neupravený dub

6.2. Mechanické vlastnosti

6.2.1. Rázová houževnatost v ohybu

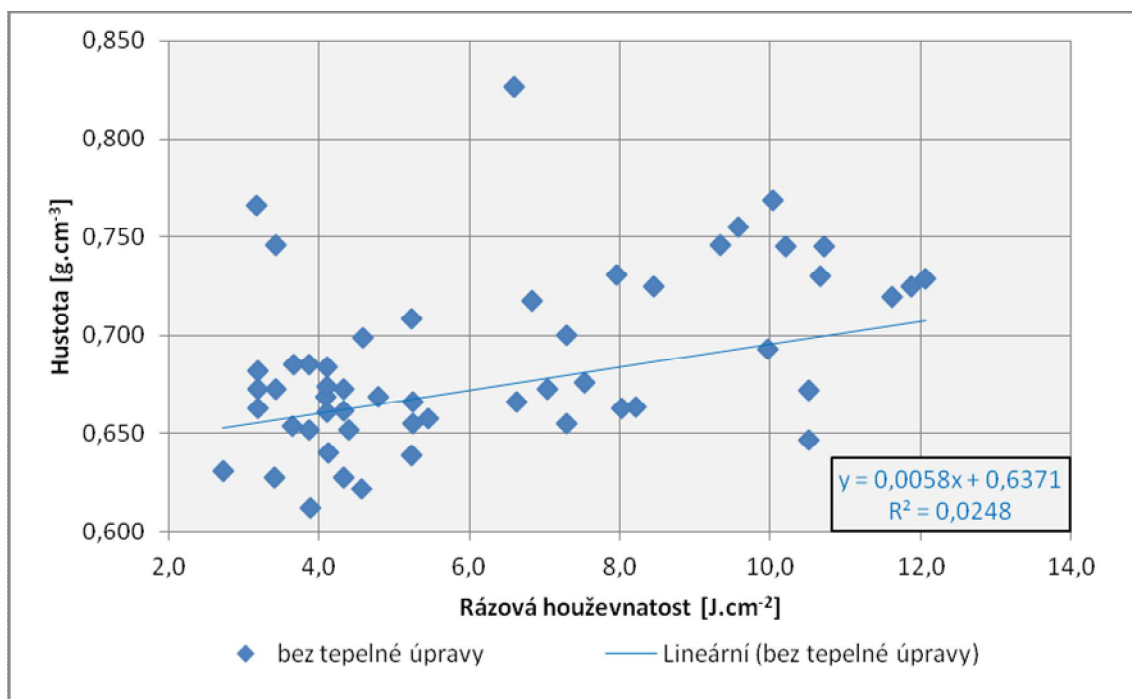
Rázová houževnatost neupraveného dubu byla měřena na 54 vzorcích. Průměrná rázová houževnatost dřeva byla vypočtena $6,3 \text{ J.cm}^{-2}$, ostatní hodnoty jsou uvedené v tabulce č. 25. Směrodatná odchylka byla spočtena $2,8 \text{ J.cm}^{-2}$ a variační koeficient 44,28 %. Doležal (1973) uvádí interval 25 - 35 % pro rázovou houževnatost v ohybu.

Požgaj et al. (1997) udává rázovou houževnatost $4,7 \text{ J.cm}^{-2}$ při vlhkosti 10 – 12 %. Wagenführ (2000) udává rázovou houževnatost $6,0 \text{ J.cm}^{-2}$ a Gandelová (2002) $7,7 \text{ J.cm}^{-2}$ při vlhkosti 12 % pro dub.

Počet vzorků [ks]	54
Aritmetický průměr [J.cm^{-2}]	6,3
Medián [J.cm^{-2}]	5,2
Minimum [J.cm^{-2}]	2,7
Maximum [J.cm^{-2}]	12,1
Směrodatná odchylka [J.cm^{-2}]	2,8
Variační koeficient [%]	44,28

Tabulka č. 25 - Hodnoty rázové houževnatosti neupraveného dubu

Závislost rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro neupravené dřevo je pouze 2,48 % (rovnice regrese je $y=0,0058x+0,6371$) a funkce je přímo úměrná, což je vidět v grafu č. 8.



Graf č. 8 - Závislost rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro neupravený dub

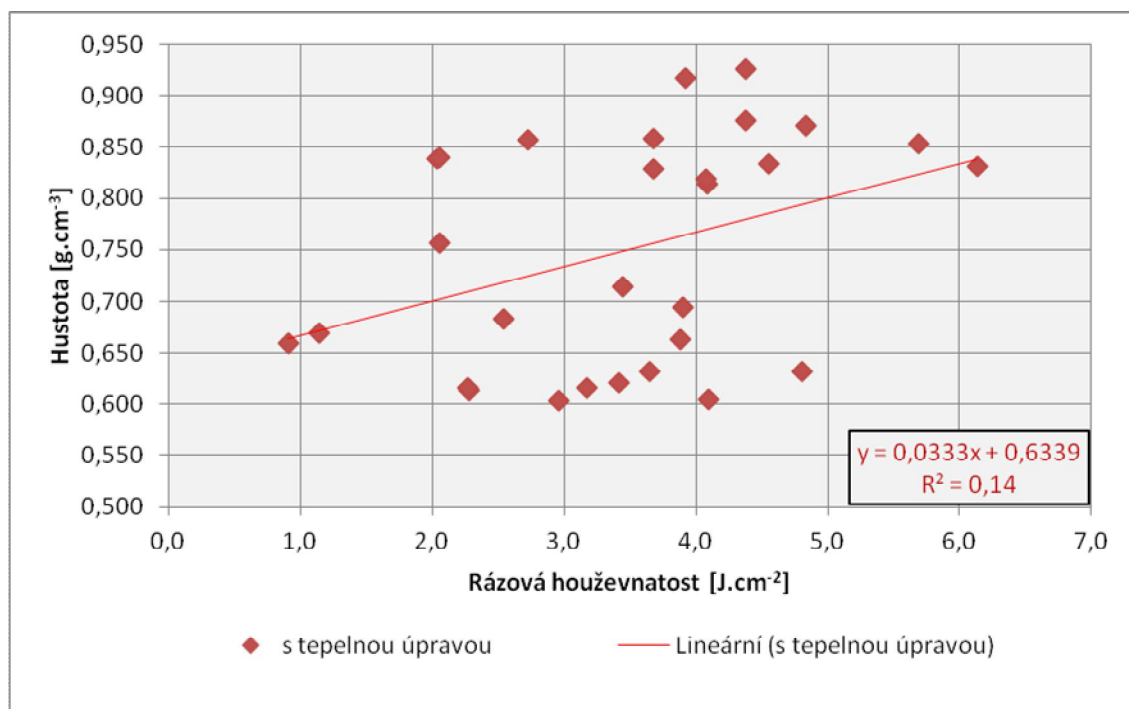
Rázová houževnatost tepelně modifikovaného dřeva dubu byla provedena na 33 vzorkách. Aritmetický průměr byl spočítán $3,5 \text{ J.cm}^{-2}$, což je o $2,8 \text{ J.cm}^{-2}$ (45 %) menší hodnota než u neupraveného dubu. ThermoWood Handbook (2003) uvádí snížení rázové houževnatosti o 25 % v závislosti na úpravě.

Směrodatná odchylka u tepelně modifikovaného dřeva dubu byla spočtena nižší o $1,6 \text{ J.cm}^{-2}$ a variační koeficient o 9,4 %. Vzorčky se rozpadly po provedení zkoušky na více kousků, což poukazuje na jeho zvýšenou křehkost. Na základě statistického vyhodnocení ANOVA byla prokázána odlišnost rázové houževnatosti neupraveného a tepelně modifikovaného dřeva.

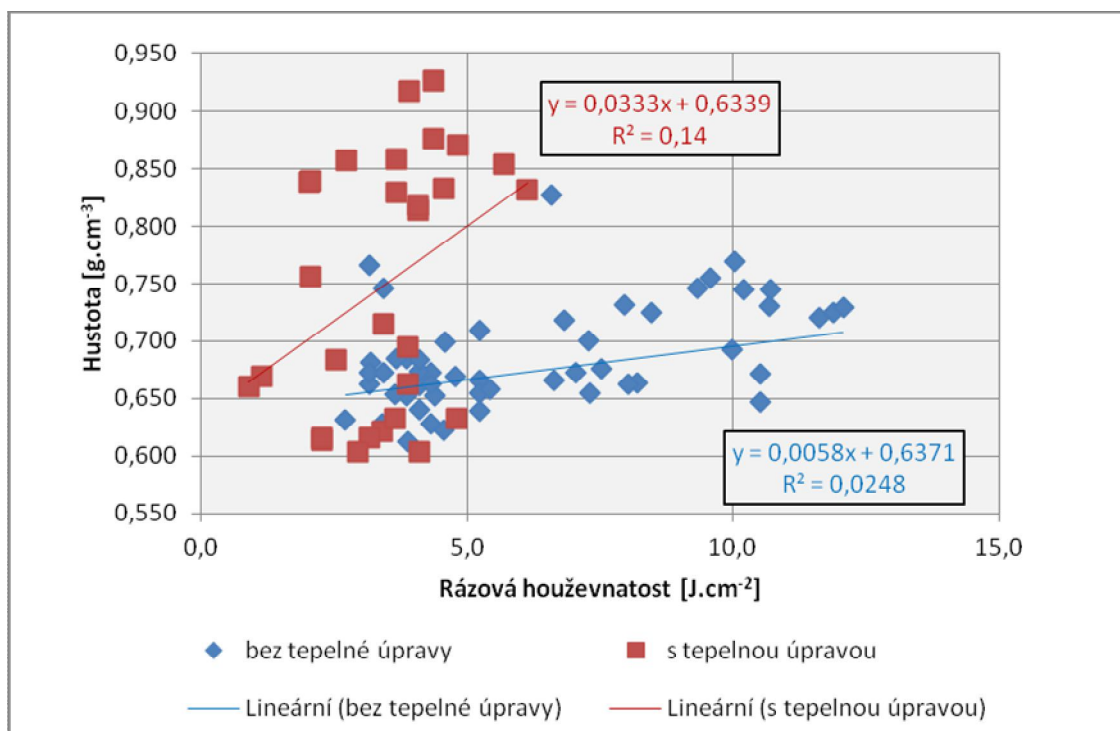
Počet vzorků [ks]	33
Aritmetický průměr [J.cm^{-2}]	3,5
Medián [J.cm^{-2}]	3,7
Minimum [J.cm^{-2}]	0,9
Maximum [J.cm^{-2}]	6,1
Směrodatná odchylka [J.cm^{-2}]	1,2
Variační koeficient [%]	34,91

Tabulka č. 26 - Hodnoty rázové houževnatosti tepelně upraveného dubu

Závislost rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro tepelně modifikované dřevo je 14 % (rovnice regrese je $y=0,0333x+0,6339$) a funkce je přímo úměrná, což je vidět v grafu č. 9.



Graf č. 9 - Závislost rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro tepelně modifikovaný dub



Graf č. 10 - Porovnání závislosti rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro neupravený a tepelně modifikovaný dub

6.2.2. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken

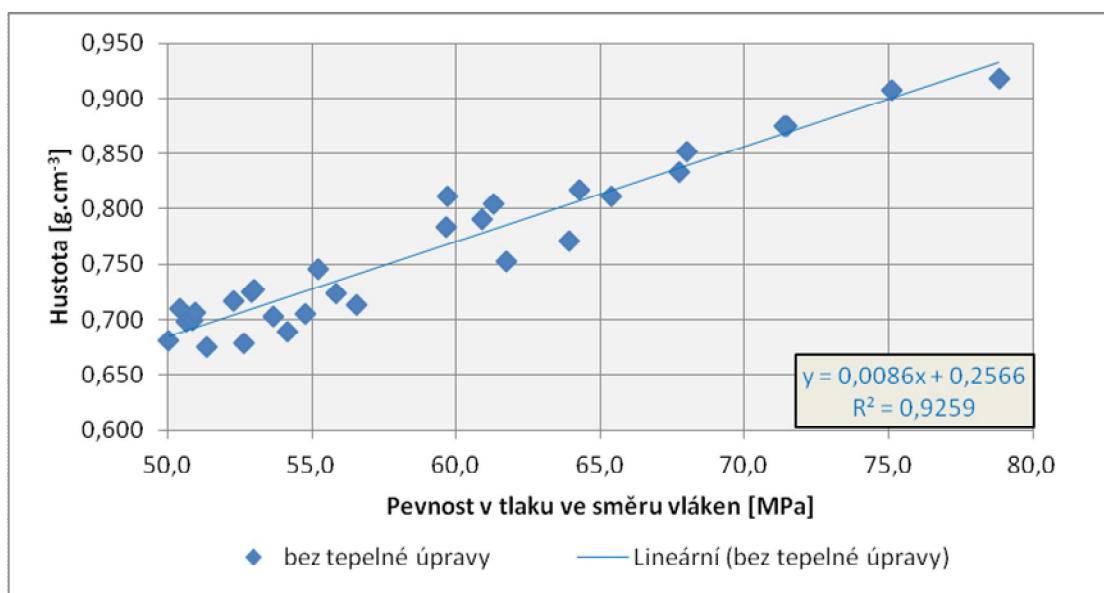
Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken byla měřena na 30 vzorcích neupraveného dubu. Průměrná mez pevnosti byla vypočtena 59,2 MPa. Směrodatná odchylka byla spočtena 8,1 MPa a variační koeficient 13,69 %, ostatní hodnoty jsou v tabulce č. 27.

Požgaj et al. (1997) udává mez pevnosti v tlaku 59,8 MPa při vlhkosti 10 – 12 %. Lexa et al. (1952) udává mez pevnosti 57,1 MPa při 12 % vlhkosti, Wagenführ (2000) udává 61 MPa a Kollmann (1951) udává hodnotu při téže vlhkosti 63,7 MPa. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s naměřenými výsledky.

Počet vzorků [ks]	30
Aritmetický průměr [MPa]	59,2
Medián [MPa]	56,2
Minimum [MPa]	50,0
Maximum [MPa]	78,8
Směrodatná odchylka [MPa]	8,1
Variační koeficient [%]	13,69

Tabulka č. 27 - Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken neupraveného dubu

Pevnost v tlaku ve směru vláken v ohybu v závislosti na hustotě pro neupravený dub je přímo úměrná (rovnice regrese je $y=0,0086x+0,2566$), což je vidět v grafu č. 11.



Graf č. 11 - Závislost meze pevnosti v tlaku ve směru vláken na hustotě pro neupravený dub

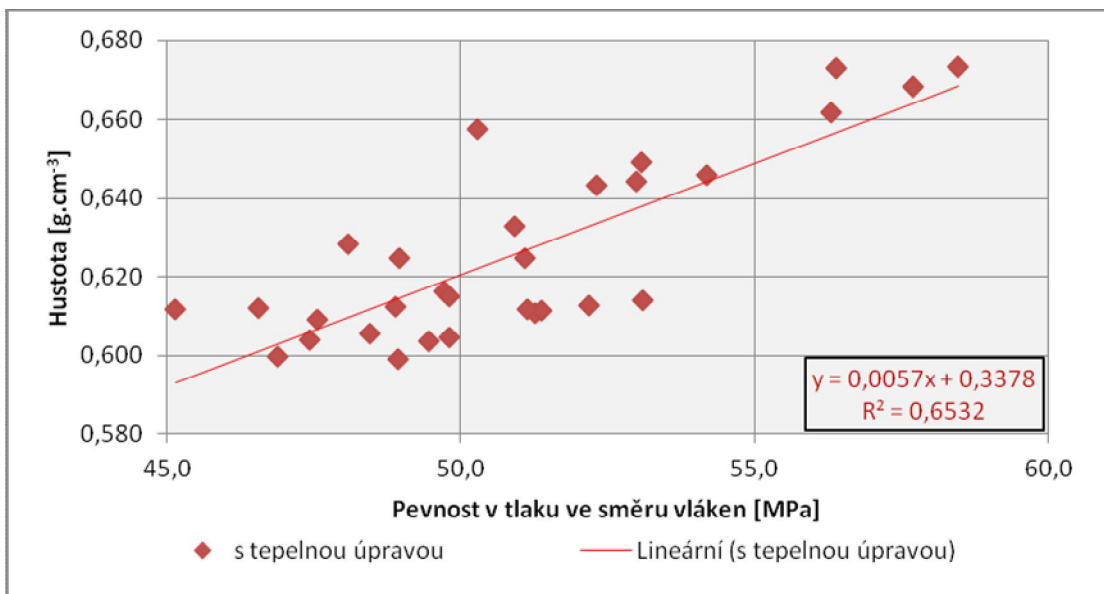
Pevnost v tlaku ve směru vláken tepelně modifikovaného dřeva dubu byla provedena na 30 vzorkách. Aritmetický průměr byl spočítán 50,9 MPa, což je o 8,3 MPa (13,9 %) menší hodnota než u neupraveného dubu. ThermoWood Handbook (2003) uvádí, že se může za určitých podmínek pevnost v tlaku zvýšit až o 30 %.

Směrodatná odchylka u tepelně modifikovaného dřeva dubu byla spočtena nižší o 4,8 MPa a variační koeficient o 7,2 %. Na základě statistického vyhodnocení ANOVA byla prokázána odlišnost meze pevnosti v tlaku mezi neupraveným a tepelně modifikovaným dřevem.

Počet vzorků [ks]	30
Aritmetický průměr [MPa]	50,9
Medián [MPa]	56,2
Minimum [MPa]	45,1
Maximum [MPa]	58,5
Směrodatná odchylka [MPa]	3,3
Variační koeficient [%]	6,47

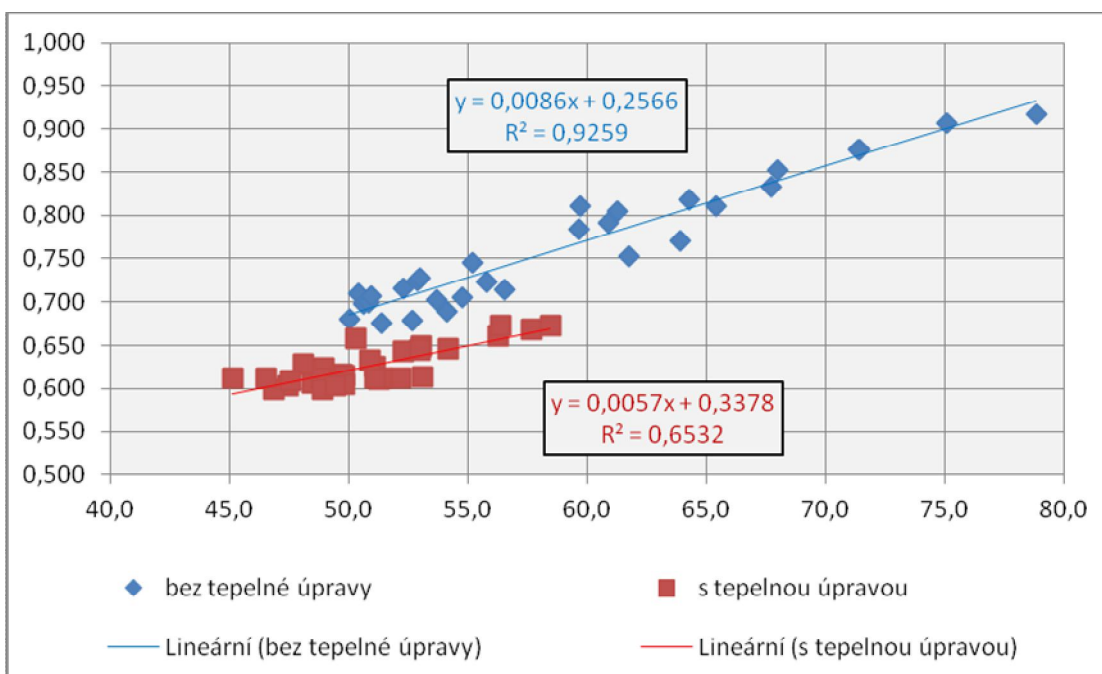
Tabulka č. 28 - Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken pro tepelně upravený dub

Pevnost v tlaku ve směru vláken v závislosti na hustotě pro tepelně modifikovaný dub je přímo úměrná (rovnice regrese je $y=0,0057x+0,3378$), což je vidět v grafu č. 12.



Graf č. 12 - Závislost meze pevnosti v tlaku ve směru vláken na hustotě pro tepelně modifikovaný dub

Závislost meze pevnosti v tlaku na hustotě pro neupravené dřevo je 92,59 %, pro tepelně modifikované dřevo je závislost 65,32 %, což je vidět v grafu č. 13.



Graf č. 13 - Porovnání závislosti pevnosti v tlaku na hustotě pro neupravený a tepelně modifikovaný dub

7. Závěr

V této diplomové práci jsem zkoumal vliv tepelné modifikace na vlastnosti dřeva dubu. Zjišťoval jsem fyzikální a mechanické vlastnosti. Z fyzikálních vlastností jsem zjišťoval hustotu, radiální, tangenciální a objemové sesychání a navlhání. Z mechanických jsem zjišťoval rázovou houževnatost v ohybu a mez pevnosti v tlaku ve směru vláken. Veškeré zkoušky jsem prováděl podle norem ČSN.

Průměrná hustota neupraveného dubu při vlhkosti 12% byla spočítána $0,707 \text{ g.cm}^{-3}$ a tepelně modifikovaného $0,730 \text{ g.cm}^{-3}$. Hustota se tepelnou modifikací zvýšila o $0,023 \text{ g.cm}^{-3}$ (3,1 %), což není z praktického hlediska příliš velká změna.

Významným efektem tepelného působení na dřevo je pokles rovnovážné vlhkosti a následný pokles bobtnání a sesychání. Důvodem poklesu rovnovážné vlhkosti po tepelné modifikaci dřeva je skutečnost, že buněčné stěny absorbují méně vody jako důsledek chemických změn. Hygroskopicitata je velmi důležitá vlastnost, která ovlivňuje i jiné vlastnosti dřeva, hlavně rozměrovou stabilitu a odolnost vůči biologickým škůdcům. Rovnovážná vlhkost byla zjištěna téměř poloviční než u rostlého dřeva.

Neupravený dub má průměrnou hodnotu radiálního sesychání 5,47 %, tangenciálního sesychání 8,18 % a objemového sesychání 13,67 %. Tepelně modifikované dřevo dubu má průměrnou hodnotu radiálního sesychání 3,47 %, tangenciálního sesychání 4,81 % a objemového sesychání 8,28 %. Toto je z hlediska praxe velmi podstatná informace, protože tepelně modifikované dřevo má skoro o polovinu lepší rozměrovou stabilitu oproti neupravenému dřevu. Proto se tepelně modifikované dřevo používá tam, kde je důležitá stabilita rozměrů jako třeba parkety v interiéru nebo u terasových podlah v exteriéru.

Rázová houževnatost neupraveného dřeva byla zjištěna $6,3 \text{ J.cm}^{-2}$ a tepelně modifikovaného $3,5 \text{ J.cm}^{-2}$. Z toho vyplývá, že modifikované dřevo má o $2,8 \text{ J.cm}^{-2}$ (45 %) sníženou houževnatost a je tím pádem křehčí.

Pevnost v tlaku ve směru vláken byla zjištěna 59,2 MPa pro neupravené dřevo a pro tepelně modifikované dřevo 50,9 MPa, takže se snížila pevnost o 8,3 MPa (13,9 %).

U sesychání, rázové houževnatosti i pevnosti dřeva v tlaku byla prokázána rostoucí závislost na hustotě. Na základě statistického vyhodnocení ANOVA byla prokázána odlišnost neupraveného a tepelně modifikovaného dřeva u všech zkoušek.

Za největší přínos své diplomové práce považuji zjištění celkových hodnot tepelně modifikovaného dubu, které jsou k dispozici pro výrobce i potencionální zákazníky, protože Thermowood je relativně nový materiál se širokým rozsahem uplatnění.

8. Použité zdroje

8.1. Literatura

- Balabán K., Nauka o dřevě - 1. část Anatomie dřeva, Státní zemědělské nakladatelství, Praha 1955, 220 s.
- Doležal J.: Matematickostatistické metody v dřevařském průmyslu, Praha: SNTL, 1973. 204 s.
- Fengel, D. 1966. Über die Veränderungen des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200 °C - Dritte Mitteilung: Thermisch und mechanisch bedingte Strukturveränderungen bei Fichtenholz. Holz, Roh- Werkstoff 24 (11), 529-536.
- Gandelová L., Horáček P., Šlezingerová J.: Nauka o dřevě, MZLU v Brně, 2002.
- Kačíková D., Kačík F., Chmecké a machanické zmeny dreva pri termickej úprave, TU vo Zvolene 2011, ISBN 978-80-228-2249-7
- Kolektiv autorů: Dřevařská technická příručka, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970, 743s.
- Kollmann F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe - Erste Band. Berlin: Springer-Verlag, 1951, 1050 s.
- Král P., Hrázský J., Využití nového materiálu ThermoWood, Materiály pro stavbu 1/2005
- Krzysik F.: Nauka o drewnie, Państwowe wydawnictwo rolnicze i leśne, Warszawa 1957, 900 s.
- Lexa J., Nečesaný V., Paclt J., Tesarová M., Štofko J.: Technologia dreva I.- Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva, Bratislava: Práca, 1952, 436 s.
- McGinnes, E. A., Kandeel, S. A., Szopa, P. S. 1971. Some structural changes observed in the transformation of wood into charcoal. Wood and Fiber 3, 77-83.
- Nekolová R.: Listnaté dřeviny od A do Ž - I díl, Praha: Libuše Kumpánová, 2002.
- Němec, J.: Dřevo-historický lexikon, Praha: Grada Publishing a.s., 2005.
- Nutsch W. a kol.: Příručka pro truhláře, Praha: Sobotáles, 1999, 540 s., ISBN 80-85920-60-3
- Peschel P., Nutsch W., Nennewitz I., Seifert G.: Dřevařská příručka – tabulky, technické údaje, Sobotáles Praha, Praha 2002, 323 s., ISBN 80-85920-84-0
- Požgaj A., Chovanec D., Kurjatko S., Babiak M.: Štruktúra a vlastnosti dreva, Bratislava: PRIRODA a.s., 1997, 485 s, ISBN 80-07-00960-4
- Reinprecht L., Vidholdová Z.: Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie, TU Zvolen 2008, ISBN 978-80-228-1920-6 (a)

Reinprecht L.: Ochrana dřeva, TU Zvolen 2008, ISBN 978-80-228-1863-6 (b)
Šimek P.: Diplomov práce: Vliv vybraných faktorů na granulometrick sloen třísky
při rovinnm frzovn termicky modifikovaného dřeva, 2012
Wagenführ R.: Holzatlas, Leipzig: Fachbuchverlag, 2000, 707 s.

8.2. Elektronick dokumenty

Thermowood Handbook. Helsinki: Finnish Thermowood Association,[2003]. Dostupné
z www: <www.thermowood.fi>
Vavrek H: Anatomick stavba dřeva - multimedln vukov systém, verze 1.04a, MZLU
v Brně, Brno 2003. Dostupné z www: <thuja.mendelu.cz >
Mikroskopick atlas dřevin. Dostupné z www:<http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev >
IASTAT – Interaktivní učebnice statistiky. Dostupné z www: < iastat.vse.cz>

Přednáška:

Evgeny Razumov Docent ATT MarSTU: Термо модифицирование древесины (Терпел
prava dřeva) [31.1.2012]

Webov stránky:

<http://www.prokom.cz> [5.2.2013]

<http://www.tuzvo.sk> [4.2.2013]

8.3. Normy

ČSN 49 0101: Všeobecn požiadavky na fyzikální a mechanické skúšky, 1980
ČSN 49 0103: Zistovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach, 1979
ČSN 49 0104: Metóda zistovania nasákavosti a navlhavosti, 1987.
ČSN 49 0108: Zistovanie hustoty, 1993.
ČSN 49 0110: Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien, 1979.
ČSN 49 0117: Rzov hzvevnatos v ohybe, 1982.
ČSN 49 0126: Metóda zistovania napuvavosti, 1988.
ČSN 49 0128: Metóda zistovania zoschavosti, 1989.

9. Seznam obrázků

- Obr. 1 - Změny v chemické struktuře dřeva při teplotách 120 - 230 °C a jejich vliv na vlastnosti thermowoodu (Razumov 2012, Reinprecht 2008a).
- Obr. 2 - Změna hustoty tepelně upravené borovice po dobu 3 hodin při teplotách 160-240 °C. Průměrná hustota $T < 160$ °C je 560 kg.m^{-3} (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 3 - Vliv relativní vlhkosti na obsah vlhkosti tepelně modifikovaného smrkového dřeva (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 4 - Sorpční izoterma pro a)neupravené dřevo b)modifikované dřevo (Reinprecht 2008a).
- Obr. 5 - Radiální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 6 - Tangenciální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 7 - Tepelně zpracovaný dub v závislosti na teplotě (www.boisdurablesdebourgogne.fr) [4.3.2013]
- Obr. 8 - Změna ohybové pevnosti borového dřeva v závislosti na tepelné úpravě (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 9 - Pevnost dřeva v tlaku tepelně upraveného smrkového dřeva, který měl průměrnou hustotu 420 kg.m^{-3} (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 10 - Změna modulu pružnosti borového dřeva v závislosti na tepelné úpravě (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 11 - Závislost tvrdosti podle Brinella borového dřeva na teplotě ošetření po dobu 3 hodin (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 12 - Poměrný úbytek hmotnosti ošetřené borovice napadené *Coniophora puteana* k neupravenému dřevu. Čas úpravy 3 hodiny (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 13 - Hodnoty měnící se vlhkosti tepelně upravené borovice při teplotě 225 °C po dobu 6 hodin vystavené venkovní expozici (ThermoWood Handbook 2003).
- Obr. 14 - Schéma výrobního procesu Thermowood (ThermoWood Handbook 2003)
- Obr. 15 - Řez radiální (Vavrčík 2003)
- Obr. 16 - Řez tangenciální (Vavrčík 2003)
- Obr. 17 - Řez příčný (Vavrčík 2003)
- Obr. 18 - Řez radiální zvětšeno 40krát (fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev) [1.3.2013]
- Obr. 19 - Řez tangenciální zvětšeno 40krát (fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev) [1.3.2013]
- Obr. 20 - Řez příčný zvětšeno 40krát (fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev) [1.3.2013]

- Obr. 21 - Ukázka barevné změny tepelně modifikovaného dubu, podmínky jsou popsány v kapitole 5.2 (foto Hasenkopf)
- Obr. 22 - Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou (Timless Timber)
- Obr. 23 - Váha Sartorius BP 3100 S (foto Hasenkopf)
- Obr. 24 - Sušárna Binder (foto Hasenkopf)
- Obr. 25 - Posuvné měřítko (foto Hasenkopf)
- Obr. 26 - Uložení vzorků v klimatizační komoře (foto Hasenkopf)
- Obr. 27 - Schéma Charpyho kladiva (ime.fme.vutbr.cz) [2.1.2013]
- Obr. 28 - Charpyho kladivo (foto Hasenkopf)
- Obr. 29 - Zkušební stroj (foto Hasenkopf)
- Obr. 30 - Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou
- Obr. 31 - Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou

10. Seznam tabulek

- Tabulka č. 1 - Hodnoty tepelné vodivosti borovice po tepelném zpracování v 230 °C po dobu 3 a 5 hodin (ThermoWood Handbook 2003).
- Tabulka č. 2 - Hodnoty tepelné vodivosti smrku po tepelném zpracování v 230 °C po dobu 3 a 5 hodin (ThermoWood Handbook 2003).
- Tabulka č. 3 - Tvrdost podle Janka pro dub v MPa (Gandelová et al. 2002).
- Tabulka č. 4 - Změny vlastností způsobené tepelnou úpravou u listnatých dřevin typu Thermo-S a Thermo-D (Král 2005).
- Tabulka č. 5 - Změny vlastností způsobené tepelnou úpravou u jehličnatých dřevin typu Thermo-S a Thermo-D (Král 2005).
- Tabulka č. 6 - Základní fyzikální a mechanické vlastnosti dubového dřeva (Požgaj et al. 1997).
- Tabulka č. 7 – Porovnání hustoty dubu z různých zdrojů
- Tabulka č. 8 - Porovnání sesychání dubu z různých zdrojů
- Tabulka č. 9 - Porovnání rázové houževnatosti z různých zdrojů
- Tabulka č. 10 - Porovnání meze pevnosti v tlaku ve směru vláken z různých zdrojů
- Tabulka č. 11 - Zjištěné hodnoty hustoty neupraveného dubu

- Tabulka č. 12 - Zjištěné hodnoty hustoty neupraveného dubu pro jednotlivá prkna
- Tabulka č. 13 - Zjištěné hodnoty hustoty tepelně upraveného dubu
- Tabulka č. 14 - Zjištěné hodnoty hustoty tepelně upraveného dubu pro jednotlivá prkna
- Tabulka č. 15 - Zjištěné hodnoty konvenční hustoty neupraveného dubu
- Tabulka č. 16 - Zjištěné hodnoty konvenční hustoty tepelně upraveného dubu
- Tabulka č. 17 - Hodnoty maximálního sesychání v radiálním směru pro neupravený dub
- Tabulka č. 18 - Hodnoty maximálního sesychání v radiálním směru pro tepelně upravený dub
- Tabulka č. 19 - Hodnoty maximálního sesychání v tangenciálním směru pro neupravený dub
- Tabulka č. 20 - Hodnoty maximálního sesychání v tangenciálním směru pro tepelně upravený dub
- Tabulka č. 21 - Hodnoty maximálního objemového sesychání pro neupravený dub
- Tabulka č. 22 - Hodnoty maximálního objemového sesychání pro tepelně upravený dub
- Tabulka č. 23 - Hodnoty navlhání pro neupravený dub při teplotě vzduchu $20 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu 33%, 54%, 75%, 90%
- Tabulka č. 24 - Hodnoty navlhání pro tepelně upravený dub při teplotě vzduchu $20 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu 33%, 54%, 75%, 90%
- Tabulka č. 25 - Hodnoty rázové houževnatosti neupraveného dubu
- Tabulka č. 26 - Hodnoty rázové houževnatosti tepelně upraveného dubu
- Tabulka č. 27 - Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken neupraveného dubu
- Tabulka č. 28 - Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken pro tepelně upravený dub

11. Seznam grafů

- Graf č. 1 - Průběh tepelné úpravy dubu použitého k odběru vzorků v této diplomové práci
- Graf č. 2 - Závislost maximálního sesychání v radiálním směru na hustotě pro upravený a neupravený dub
- Graf č. 3 - Závislost maximálního sesychání v tangenciálním směru na hustotě pro upravený a neupravený dub
- Graf č. 4 - Závislost maximálního objemového sesychání na hustotě pro upravený a neupravený dub

Graf č. 5 - Porovnání radiálního, tangenciálního a objemového sesychání upraveného a neupraveného dubu

Graf č. 6 - Vliv relativní vlhkosti na rovnovážnou vlhkost pro upravený a neupravený dub

Graf č. 7 - Vliv relativní vlhkosti na rovnovážnou vlhkost pro upravený a neupravený dub

Graf č. 8 - Závislost rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro neupravený dub

Graf č. 9 - Závislost rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro tepelně modifikovaný dub

Graf č. 10 - Porovnání závislosti rázové houževnatosti v ohybu na hustotě pro neupravený a tepelně modifikovaný dub

Graf č. 11 - Závislost meze pevnosti v tlaku ve směru vláken na hustotě pro neupravený dub

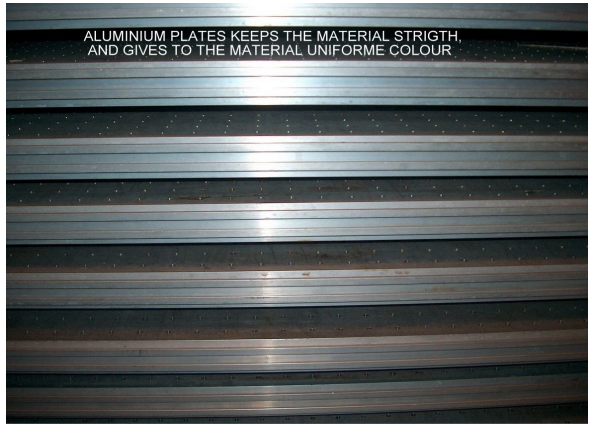
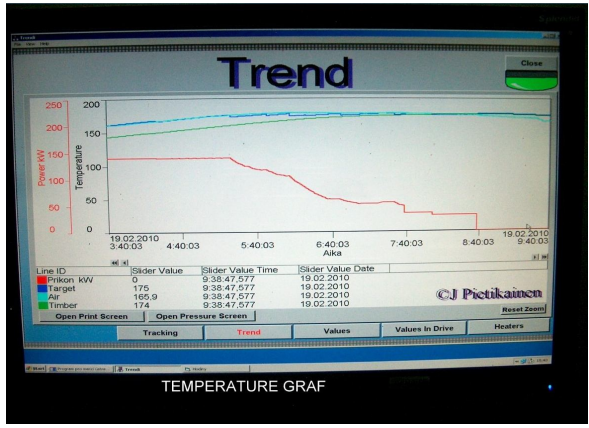
Graf č. 12 - Závislost meze pevnosti v tlaku ve směru vláken na hustotě pro tepelně modifikovaný dub

Graf č. 13 - Porovnání závislosti pevnosti v tlaku na hustotě pro neupravený a tepelně modifikovaný dub

12. Přílohy



Obr. 31 Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou (Timless Timber)



Obr. 32 Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou (Timless Timber).