

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



Vybrané vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Diplomová práce

Autor: Bc. Veronika Vondrová

Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Gaff, Ph.D.

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Veronika Vondrová

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vybrané vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Název anglicky

Selected properties of thermally modified wood

Cíle práce

Cílem práce je experimentálním způsobem zjistit vliv jednotlivých stupňů termické úpravy vybraných dřevin na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky.

Metodika

1. Úvod

2. Cíle práce

3. Analýza současného stavu:

- Teorie výroby termicky modifikovaného dřeva
- Teorie zjišťování vybraných fyzikálních vlastností dřeva
- Teorie zjišťování vybraných mechanických vlastností dřeva

4. Metodika práce:

- Výběr a příprava zkušebních vzorků
 - Charakteristika technologie pro termickou úpravu dřeva
 - Charakteristika zařízení na měření vybraných fyzikálních vlastností dřeva
 - Charakteristika zařízení na měření vybraných mechanických vlastností dřeva
 - Experimentální část a sledování vlivu jednotlivých stupňů termické úpravy vybraných dřevin na sledované charakteristiky
 - Výsledky a vyhodnocení
-

– Přínos pro vědu a praxi

6) Závěr



Doporučený rozsah práce

80

Klíčová slova

Termicky modifikované dřevo, Thermowood, tvrdost materiálu, barevnost materiálu

Doporučené zdroje informací

Mahmood, MR et al., 2013.: Thermal Stability and Decay Resistance Properties of Tropical Wood Polymer Nanocomposites (WPNC)

Mburu, F., et al. 2007.: Evaluation of thermally modified *Grevillea robusta* heartwood as an alternative to shortage of wood resource in Kenya: Characterisation of physicochemical properties and improvement of bio-resistance

REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.

Yan, YT., et al. 2015.. Enhancement of mechanical and thermal properties of Poplar through the treatment of glyoxal-urea/nano-SiO₂

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

Ing. Lukáš Kaplan

Elektronicky schváleno dne 25. 2. 2016

doc. Ing. Milan Gaff, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 2. 2016

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 19. 04. 2017

"Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **«Vybrané vlastnosti termicky modifikovaného dřeva»** vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědoma, že zveřejněním diplomové 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..... dne.....

.....

Veronika Vondrová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za vedení, vstřícný a milý přístup, poskytnutí studijních materiálů, důležitých rád a odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce a za čas, který mi po celou dobu řešení práce věnoval.

Dále bych chtěla poděkovat všem, kteří jakkoliv přispěli k vypracování mé diplomové práce. Velké díky patří také mým rodičům a celé rodině, kteří mě během celého studia aktivně podporují.

Abstrakt

Tato práce se zabývá posouzením vlivu termické modifikace na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti smrku, dubu a teaku. Na zkušebních tělesech byl zjišťován účinek termické úpravy na změnu barvy, účinek rozdílné termické úpravy na hodnoty přírůstků rozměrů, hmotnosti a změnu vlhkosti ve stavu ze suchého dřeva po jeho úplné nasycení vodou, rázová houževnatost, tvrdost podle Brinella, mez pevnosti v tlaku ve směru a napříč vláken a ohybové charakteristiky. Zkoušky probíhaly dle normalizovaných postupů.

Porovnáním neupravených a termicky upravených zkušebních vzorků bylo zjištěno, že teplota termické úpravy je významným faktorem, který ovlivňuje jak vybrané fyzikální, tak i mechanické vlastnosti dřeva. Po zpracování naměřených dat bylo zjištěno, že teplota termické úpravy 160°C způsobuje ve dřevě zásadní změny, které mají až už pozitivní nebo negativní charakter na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.

Klíčová slova:

Termicky modifikované dřevo, Thermowood, tvrdost materiálu, barevnost materiálu

Abstract

This study evaluates the influence of the thermal modification on selected physical and mechanical properties of spruce, oak and teak. On the test pieces was determined the effect of thermal treatment to change color, the effect of different thermal treatment to the value of increment size, weight and relative humidity change in the state of dry wood after complete saturation with water, impact bending strength, Brinell hardness, ultimate compressive strength in the fiber direction and across the fibers direction and bending characteristics. Tests were carried out according to standardized procedures.

Comparing the untreated and thermally modified test pieces it was found that the temperature of the thermal treatment is a significant factor that affects both the selected physical and mechanical properties of the wood. After processing the measured data it was found that the temperature of the thermal treatment of 160°C causes in the wood major changes that have either a positive or a negative character on the physical and mechanical properties of the wood.

Keywords

Thermally modified wood, Thermowood, material hardness, color material

Obsah

Cíl práce.....	18
1 Termická modifikace jako nástroj ochrany dřeva.....	19
1.1 Modifikační ochrana dřeva	21
1.1.1 Termicky modifikované dřevo.....	22
1.1.2 Podstata, cíle a definice termicky modifikovaného dřeva	23
1.1.3 Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.....	25
1.2 Změny struktury dřeva při termické modifikaci	26
1.2.1 Vliv termických úprav na chemickou strukturu dřeva.....	28
1.2.1.1 Změny celulózy při termickém působení	30
1.2.1.2 Změny hemicelulóz při termickém působení	30
1.2.1.3 Změny ligninu při termickém působení	31
1.2.1.4 Změny extraktivních látek při termickém působení.....	31
1.2.2 Anatomické změny termicky modifikovaného dřeva.....	32
1.2.2.1 Trhliny	33
1.3 Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva	33
1.3.1 Fyzikální vlastnosti termicky upraveného dřeva	34
1.3.1.1 Hygroskopicitá	34
1.3.1.2 Rozměrová stabilita	35
1.3.1.3 Hustota.....	36
1.3.1.4 Barevnost a vůně	37
1.3.1.5 Tepelně – izolační vlastnosti	39
1.3.1.6 Akustické vlastnosti.....	39
1.3.2 Mechanické vlastnosti termicky upraveného dřeva.....	39
1.3.2.1 Rázová houževnatost	40
1.3.2.1.1 Faktory ovlivňující rázovou houževnatost dřeva	41
1.3.2.1.2 Rázová houževnatost termicky upraveného dřeva.....	41
1.3.2.2 Tvrdost.....	42
1.3.2.2.1 Tvrdost termicky upraveného dřeva.....	43
1.3.2.3 Pevnost dřeva.....	44
1.3.2.3.1 Pevnost dřeva v tlaku	44
1.3.2.3.2 Pevnost termicky upraveného dřeva v tlaku	46
1.3.2.4 Pevnost dřeva v ohybu.....	47
1.3.2.4.1 Faktory ovlivňují pevnost dřeva.....	48
1.3.2.4.2 Ohybová pevnost termicky upraveného dřeva.....	49
1.3.2.5 Pružnost dřeva	50

1.3.2.5.1	Pracovní digram	50
1.3.2.5.2	Modul pružnosti ve statickém ohybu	51
1.3.2.5.3	Dynamický modul pružnosti	52
1.3.2.5.4	Faktory ovlivňující moduly pružnosti	52
1.3.2.5.5	Vztah mezi pevností v ohybu a modulem pružnosti ve statickém ohybu	52
1.3.2.5.6	Modul pružnosti termicky upraveného dřeva	53
1.3.3	Trvanlivost tepelně upraveného dřeva	53
1.3.3.1	Biologická odolnost	54
1.3.3.2	Povětrnostní odolnost	54
1.3.3.3	Protipožární odolnost	54
2	Technologie výroby termicky upraveného dřeva	56
2.1.1	Materiál na výrobu termicky upraveného dřeva	56
2.2	Principy technologií výroby termicky upraveného dřeva	57
2.2.1	ThermoWood®	57
2.2.1.1	Výroba ThermoWood dřeva	58
2.2.1.1.1	Klasifikace tepelných úprav ThermoWood	59
2.2.2	Plato®Wood	60
2.2.3	OHT-Wood	61
2.2.4	Le Bois Perdure	61
2.2.5	RetificatedWood	61
3	Popis dřevin použitých pro výzkum	63
3.1	Smrk (<i>Picea abies</i> L.)	63
3.1.1	Dendrologický popis smrku	63
3.1.2	Stavba dřeva smrku	63
3.1.2.1	Makroskopická stavba dřeva smrku	63
3.1.2.2	Mikroskopická stavba dřeva smrku	64
3.2	Dub (<i>Quercus robur</i> L.)	64
3.2.1	Dendrologický popis dubu	64
3.2.2	Stavba dřeva dubu	64
3.2.2.1	Makroskopická stavba dřeva dubu	64
3.2.2.2	Mikroskopická stavba dřeva dubu	65
3.3	Teak (<i>Tectona grandis</i> Linn.)	65
3.3.1	Dendrologický popis teaku	66
3.3.2	Stavba dřeva teaku	66
3.3.2.1	Makroskopická stavba dřeva teaku	66
3.3.2.2	Mikroskopická stavba dřeva teaku	66

4	Metodika práce	67
5	Metodika experimentálních prací	68
5.1	Příprava zkušebních vzorků.....	68
5.1.1	Účinek termické úpravy na barevné změny.....	68
5.1.2	Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasákivost a hustotu dřeva během procesu nasákání	71
5.1.3	Tvrдость podle Brinella	71
5.1.4	Pevnost v tlaku.....	72
5.1.5	Rázová houževnatost	73
5.1.6	Ohybové charakteristiky	75
5.2	Označení zkušebních vzorků	75
5.2.1	Označení zkušebních vzorků pro experiment účinek termické úpravy na barevné změny	75
5.2.2	Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasákivost a hustotu dřeva během procesu nasákání	75
5.2.3	Označení zkušebních vzorků pro experiment tvrдость podle Brinella	76
5.2.4	Označení zkušebních vzorků pro experiment pevnost v tlaku	76
5.2.5	Označení zkušebních vzorků pro experiment rázová houževnatost	76
5.2.6	Označení zkušebních vzorků pro experiment ohybové charakteristiky ...	76
5.3	Měření.....	77
5.3.1	Účinek termické úpravy na barevné změny.....	77
5.3.2	Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasákivost a hustotu dřeva během procesu nasákání	78
5.3.3	Tvrдость podle Brinella	81
5.3.4	Pevnost dřeva v tlaku	85
5.3.4.1	Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken	85
5.3.4.2	Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken	86
5.3.5	Rázová houževnatost	87
5.3.6	Ohybové charakteristiky	89
5.3.7	Zpracování výsledků v softwaru statistika 12.....	93
6	Výsledky a diskuze	94
6.1.1	Vyhodnocení výsledků účinku termické úpravy na barevné změny	94
6.1.2	Vyhodnocení výsledků účinků rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasákivost a hustotu dřeva během procesu nasákání	99
6.1.3	Vyhodnocení výsledků tvrđosti podle Brinella	108
6.1.4	Vyhodnocení výsledků pevnosti v tlaku.....	112

6.1.5	Vyhodnocení výsledků rázové houževnatosti.....	121
6.1.6	Vyhodnocení výsledků ohybových charakteristik	124
7	Závěr	134
7.1	Účinek termické úpravy na barevné změny.....	134
7.2	Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasákivost a hustoty dřeva během procesu nasákání	134
7.3	Tvrdost podle Brinella	136
7.4	Pevnost v tlaku.....	137
7.5	Rázová houževnatost	138
7.6	Ohybové charakteristiky	139
7.7	Závěr - celkové shrnutí	140
	Seznam použité literatury a zdrojů	141

Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka termicky modifikovaného dřeva.....	23
Obr. 2 Změna modulu pevnosti v čase při působení.....	20
Obr. 3 Změna modulu pružnosti v čase při.....	25
Obr. 4 Sorpční a desorpční vlastnosti neupraveného dřeva a dřeva upraveného	26
Obr. 5 Chemické změny ve dřevě během termických úprav	29
Obr. 6 Schématické znázornění změn složek dřeva, které nastávají vlivem teploty	32
Obr. 7 Porovnání anatomické struktury neupraveného dřeva a termicky upraveného dřeva	33
Obr. 8 Změny v chemické struktuře dřeva při teplotách 120-230 °C	34
Obr. 9 Vliv relativní vlhkosti na obsah vlhkosti u termicky upraveného smrkového dřeva.....	35
Obr. 10 Radiální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti.....	36
Obr. 11 Tangenciální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti.....	36
Obr. 12 Změna hustoty borovicového dřeva tepelně upraveného	37
Obr. 13 Barevné změny tepelně upraveného borovicového dřeva v řepkovém oleji	38
Obr. 14 Barevné změny tepelně upravovaného borovicového dřeva.	38
Obr. 15 Zkouška tvrdosti podle Brinella – tvar a obrys kuličky.....	42
Obr. 16 Stupnice tvrdosti podle Brinella	43
Obr. 17 Závislost tvrdosti dřeva borovice na teplotě ošetření, metoda podle Brinella... ..	44
Obr. 18 Pracovní diagramy pevnosti v tlaku napříč vláken.....	46
Obr. 19 Pevnost v tlaku termicky upraveného smrkového dřeva	47
Obr. 20 Změna ohybové pevnosti borového dřeva v závislosti na teplotě úpravy	49
Obr. 21 Obecný tvar pracovního diagramu	50
Obr. 22 Modul pružnosti a jeho změny u borovicového dřeva	53
Obr. 23 Schéma výrobní technologie ThermoWood	59
Obr. 24 Rozměry zkušebních těles na posouzení barevných změn termicky upraveného dřeva.....	68
Obr. 25 Grafické znázornění průběhu termické úpravy vzorků použitých pro experiment	69
Obr. 26 Rozměry zkušebního tělesa	71
Obr. 27 Rozměry zkušebních těles používaných pro pevnost v tlaku	72
Obr. 28 Rozdělení vzorků podle teploty	72
Obr. 29 Vážení zkušebních vzorků používaných pro pevnost v tlaku.....	73
Obr. 30 Příprava zkušebních vzorků pro rázovou houževnatost a ohybových charakteristik.....	74
Obr. 31 Vážení vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti a ohybových charakteristik	74
Obr. 32 Grafické znázornění metody CIE L*a*b*	77
Obr. 33 Model zkoušení Brinellovy zkoušky tvrdosti.....	81
Obr. 34 Tvrdoměr Duravision-30 pro měření tvrdosti podle Brinella)	82
Obr. 35 Princip zkoušení Brinellovou metodou	82
Obr. 36 Upnutí zkušebního vzorku do přístroje	83
Obr. 37 Testování vzorků na pevnost v tlaku ve směru vláken.....	85
Obr. 38 Princip Charpyho kladiva	87
Obr. 39 Charpyho kladivo používané při zkoušení.....	84
Obr. 40 Umístění zkušebního vzorku na	88
Obr. 41 Zatížení ohybem	90

Obr. 42 Znáznornění průběhu změny souřadnice L^* v závislosti na teplotě termické úpravy	94
Obr. 43 Znáznornění průběhu změny souřadnice a^* v závislosti na teplotě termické úpravy	95
Obr. 44 Znáznornění průběhu změny souřadnice b^* v závislosti na teplotě termické úpravy	96
Obr. 45 Znáznornění průběhu celkové změny souřadnice ΔE v závislosti na teplotě termické úpravy	97
Obr. 46 Vliv druhu dřeviny na tvrdost podle Brinella	110
Obr. 47 Vliv teploty termické úpravy na tvrdost podle Brinella	111
Obr. 48 Interakce obou sledovaných faktorů působení termické úpravy a druhu dřeviny na tvrdost.....	111
Obr. 49 Vliv druhu dřeviny na hodnoty pevnosti v tlaku ve směru vláken.....	113
Obr. 50 Vliv teploty termické úpravy na hodnoty pevnosti v tlaku ve směru vláken ..	114
Obr. 51 Společné působení druhu dřeviny a termické úpravy na pevnost v tlaku ve směru vláken	114
Obr. 52 Porovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku ve směru vláken.....	115
Obr. 53 Vliv druhu dřeviny na pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru	116
Obr. 54 Vliv teploty termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru.....	117
Obr. 55 Společné působení druhu dřeviny a termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vláken.....	117
Obr. 56 Porovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru.....	118
Obr. 57 Vliv druhu dřeviny na pevnost v tlaku napříč vláken v radiálních směru.....	119
Obr. 58 Vliv teploty termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru.....	120
Obr. 59 Společné působení druhu dřeviny a termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vláken.....	120
Obr. 60 Porovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v radiálním směru	121
Obr. 61 Vliv druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti.....	123
Obr. 62 Vliv teploty termické úpravy na hodnoty rázové houževnatosti	123
Obr. 63 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti	124
Obr. 64 Vliv druhu dřeviny na hodnoty modulu pružnosti.....	126
Obr. 65 Vliv teploty termické úpravy na hodnoty modulu pružnosti.....	126
Obr. 66 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty modulu pružnosti.....	127
Obr. 67 Vliv druhu dřeviny na hodnoty meze úměrnosti ve statickém ohybu	129
Obr. 68 Vliv teploty termické úpravy na meze úměrnosti ve statickém ohybu.....	129
Obr. 69 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty meze úměrnosti ve.....	130
Obr. 70 Vliv druhu dřeviny na hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu.....	132
Obr. 71 Vliv teploty termické úpravy na meze pevnosti ve statickém ohybu	132
Obr. 72 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu.....	133

Seznam tabulek

Tab. 1 Základní způsoby modifikace rostlého dřeva	21
Tab. 2 Vstupní technologické parametry termické úpravy vzorků smrku.....	70
Tab. 3 Vstupní technologické parametry termické úpravy vzorků dubu.....	70
Tab. 4 Vstupní technologické parametry termické úpravy vzorků teaku	70
Tab. 5 Kritéria vyhodnocování celkové změny barvy ΔE^*	78
Tab. 6 Parametry tvrdost podle Brinella	83
Tab. 7 Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice L^*	95
Tab. 8 Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice a^*	95
Tab. 9 Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice b^*	96
Tab. 10 Vyhodnocení celkové změny barvy	97
Tab. 11 Změna souřadnic barevného prostoru L^* , a^* a b^* a celková změna barevného prostoru ΔE^*	98
Tab. 12 Průměrné hodnoty přírůstků sledovaných charakteristik po 96 hodinách.....	99
Tab. 13 Statistické hodnocení vlivu tepelného zpracování na hodnotách přírůstků sledovaných	100
Tab. 14 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách zvýšení.....	103
Tab. 15 Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella.....	109
Tab. 16 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na tvrdost podle Brinella.....	109
Tab. 17 Srovnání účinků jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu na hodnotách tvrdosti	112
Tab. 18 Hodnoty pevnosti v tlaku ve směru vláken a napříč vláken	112
Tab. 19 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na pevnost v tlaku ve směru vláken.....	113
Tab. 20 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty pevnosti v tlaku	115
Tab. 21 Statistické zhodnocení vlivu faktorů pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru	116
Tab. 22 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty pevnosti v tlaku	118
Tab. 23 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na pevnost v tlaku napříč vláken v radiálních směru.....	119
Tab. 24 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty pevnosti v tlaku	121
Tab. 25 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na teplotě, druhu dřeviny a hustotě	122
Tab. 26 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na rázovou houževnatost.....	122
Tab. 27 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty rázové houževnatosti.....	124
Tab. 28 Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na teplotě, druhu dřeviny a hustotě	125
Tab. 29 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na modul pružnosti	125
Tab. 30 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách modulu pružnosti.....	127
Tab. 31 Základní statistická analýza pro výpočet meze úměrnosti	128
Tab. 32 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na mez úměrnosti ve statickém ohybu..	128
Tab. 33 Srovnání účinků jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu na hodnotách meze úměrnosti	130

Tab. 34	Základní statistická analýza pro výpočet meze pevnosti ve statickém ohybu.	131
Tab. 35	Statistické zhodnocení vlivu faktorů na mez pevnosti ve statickém ohybu	131
Tab. 36	Srovnání účinků jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu na hodnotách meze pevnosti	133

Úvod

Vedle kamene je dřevo nejstarším materiálem, který začal člověk používat k nejrůznorodějším cílům. Doprovází člověka od nepaměti, i přes vývoj nedřevěných moderních materiálů je v mnoha odvětvích lidské činnosti nenahraditelné. Dřevo má v dnešní době nesmírnou přednost, že je přírodní materiál, který je při vhodném hospodaření dobře obnovitelný a zásoby jsou takřka nevyčerpatelné. Vzhledem ke své dostupnosti, dobré obrobiteľnosti a užitným vlastnostem se stalo dřevo jedním z nejpoužívanějších materiálů, jak v minulosti, tak v současnosti, kdy tento trend pokračuje a dřevo je stále oblíbenějším materiálem. Do popředí se dřevo dostává vůči jiným materiálům také pro svůj přírodní charakter, a stylem dnešní doby, kdy je opět moderní návrat k přírodě a ekologii jako takové. Dřevo je využíváno zejména pro svou širokou škálu použití, ať už na dřevěné konstrukce, stavby, nábytek nebo jiné prvky do interiéru a exteriéru. Vzhledem k lepší dostupnosti posledních let se zvyšuje obliba tropických dřevin, hlavně z důvodu vlastností, kterými jsou tropické dřeviny známé a které jsou většinou lepší než u dřevin tuzemských.

Vytyčenými cíli této diplomové práce je experimentálně prokázat, jaký dopad má teplota během termické úpravy na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva vybraných dřevin. Porovnáním zjištěných výsledků vzorků neupravených a termicky upravených při různých teplotách, bude možné vyvodit, jaký stupeň termické úpravy má pozitivní či negativní vliv na tyto vybrané vlastnosti.

Cíl práce

Cílem práce je experimentálním způsobem zjistit vliv jednotlivých stupňů termické úpravy vybraných dřevin na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky.

Cíl práce možno rozdělit do několik bodů:

1. Zjištění vlivu termické modifikace na vybrané fyzikální vlastnosti dřeva u vybraných druhů dřevin.
2. Zjištění vlivu termické modifikace na vybrané mechanické vlastnosti dřeva u vybraných druhů dřevin.
3. Zhodnocení zjištěných výsledků a jejich porovnání

Navrhnutá metodika práce je orientovaná na zjištění jak fyzikálních, tak i mechanických vlastností dřeva. Zaměřili jsme se na vlastnosti, které mají široké praktické uplatnění a rozhodují o vhodnosti použití termicky modifikovaného dřeva pro daný účel použití.

Diplomová práce je součástí tří projektů realizovaných na KZZD a to:

1. CIGA číslo 2016 – 4309: Termická úprava tropických a domácích dřevin s experimentálním ověřením jejich protipožární odolnosti a obrobitelnosti
2. IGA číslo A 13 – 16: Spotřeba elektrické energie při výrobě Thermowoodu
3. IGA číslo A 12 - 16: Termická úprava tropických dřevin, které jsou výsledkem spolupráce katedry s praxí, tedy s dodavateli termicky modifikovaných dřevin na domácím trhu.

1 Termická modifikace jako nástroj ochrany dřeva

Každý druh dřeva má své určité vlastnosti, které ovlivňují jeho použití. Důležitá vlastnost dřeva je jeho přirozená trvanlivost v interiérových a exteriérových expozicích. Trvanlivost dřeva je dostatečná nebo nedostatečná. Zvýšení trvanlivosti dřeva se dosáhne například pomocí chemické ochrany dřeva. V současnosti se do popředí dostávají metody modifikační ochrany dřeva, kdy se stále více dbá na co nejmenší dopad na životní prostředí, aby byl výrobek ekologicky nezávadný, snadno zlikvidovatelný atd. Tyto vlastnosti splňuje právě tepelně modifikované dřevo nazývané termodřevo.

Základní úlohou ochrany dřeva je potlačit procesy degradace dřeva a prodloužení životnosti výrobků ze dřeva. Jedná se o opatření, která zachovávají nebo i zlepšují užitkové vlastnosti dřeva a výrobků z něho zhotovených. Pojem ochrana dřeva v širším slova smyslu zahrnuje všechna organizační opatření, konstrukční řešení a technologické operace, kterými zamezujeme vzniku příznivých podmínek pro napadení. Cílem ochrany dřeva je tedy omezení negativního působení okolního prostředí na dřevo na minimum. Z technického hlediska ochrana dřeva spočívá především v ochraně před vlhkostí, napadením biotickými škůdci a požárem.

Přirozená trvanlivost dřeva se v praxi nedá zcela přesně definovat, protože je ovlivněna několika různými faktory. Největší procento zaujímá struktura dřeva a její odlišnosti, které jsou zpravidla dané druhem dřeva, ale také klimatickými, půdními a jinými podmínkami při růstu stromu. Dále zaleží také na použití dřeva a jeho zatížení, poté jestli je umístěno v interiéru či exteriéru, ale také v jaké části světa a konkrétním podnebí se zrovna nachází. Přirozená trvanlivost dřeva je pro jednotlivé dřeviny zkoušena metodami, které jsou popsány v příslušných evropských normách a výsledky se porovnávají s výsledky referenčních dřevin. Vysoká přirozená trvanlivost a současně také vhodné užitné vlastnosti jsou typické pro některé druhy exotického dřeva, například teak, merbau, walaba. Pro průmyslové zpracování s dostatečnou odolností můžeme z evropských dřevin využívat smrk, akát bílý, dub zimní a letní. Z důvodů dosažení stejných, ne-li lepších vlastností, zvyšujeme trvanlivost těchto dřevin, abychom dosáhli vlastností, které můžeme najít u dřevin tropických (Reinprecht 2008; Reinprecht, a Vidholdová 2008).

K tomu, abychom dosáhli delší životnosti výrobků ze dřeva, je nutné, aby byla zvolena správná metoda ochrany. Trvanlivost dřeva je možné zvýšit několika druhy ochran:

- *Fyzikální ochrana dřeva* – těmito opatřeními se snažíme o vytvoření takových podmínek ve dřevě a jeho okolí, kdy bude maximálně omezen nebo znemožněn vznik a rozvoj jeho napadení biotickými anebo abiotickými činiteli. Dále již vzniklá ohniska destrukce dřeva likvidovat biotickými škůdci a poté realizovat preventivní ochranná opatření vůči novému napadení.
- *Konstrukční ochrana dřeva* – patří k preventivním opatření, kdy je zamezeno dlouhodobé vysoké vlhkosti dřevěných konstrukcí. Dřevo by tedy mělo být uloženo v takových expozicích, kde je omezené nebo vyloučené působení biotických činitelů. Mělo by na ni být pamatováno už při projektování, stavbě a rekonstrukcích budov. Zahrnuje především izolace proti vlhkosti, regulace klimatických podmínek v objektu jako je větrání a odvodu vlhkosti atd.
- *Chemická ochrana dřeva* – podstatou je využívání chemických prostředků na ochranu dřeva, ty se aplikují na povrch dřeva nebo do určité hloubky dřeva postříkem, nátěrem, máčením a jinými beztlakovými technologiemi. Pokud chceme dosáhnout většího průniku a příjmu do dřeva, využíváme i technologie podtlakové. Používá se zpravidla u nosných konstrukčních prvků – latě, střešní vazby a dřevěné konstrukce které jsou vystavené povětrnostním vlivům – venkovní obklady, dřevěné štíty, verandy, dřevěné balkony.
- *Modifikační ochrana dřeva* – touto metodou se záměrně mění struktura dřeva. Modifikace dřeva zachovává nebo zlepšuje trvanlivost a vybrané vlastnosti. Těmi jsou pevnost, pružnost, nízká hmotnost atd. Současně se snaží o snižování vlastností negativních, mezi které patří například rozměrová nestabilita a opotřebitelnost. Do modifikační ochrany dřeva je zahrnuta úprava chemická, enzymatická a termická (Reinprecht a Vidholdová 2008).

1.1 Modifikační ochrana dřeva

Hlavní úlohou modifikačních metod je záměrná změna struktury a tím cíleně vylepšené vlastnosti, kterými jsou biologická odolnost, termická odolnost, rozměrová stabilita, odolnost vůči agresivním chemikáliím, odpudivost vůči vodě, barevná stálost, pevnost, tvrdost apod. Způsoby, kterými se mění základní vlastnosti materiálu, se označují pojmem modifikace, ty je možné rozdělit na několik druhů, a to na mechanickou, chemickou, biologickou a termickou. Těmito změnami se prodlužuje životnost výrobků ze dřeva.

Modifikování dřeva není novinkou moderní doby, pomyslné základy můžeme najít již v pravěku a dávné historii. Na začátku 20. let se zpravidla modifikovalo biocidními látkami, využívala se látka CCA, což je zkratka pro měď-chrom-arsen. Tato látka je škodlivá jak pro zdraví člověka, tak i pro životní prostředí. V sedmdesátých letech 20. století byl v důsledku těchto faktorů vyvinut tlak na dřevařský průmysl a uživatele dřeva, aby hledali a zavedli do praxe vhodnější ekologické alternativní metody, které zvýší trvanlivost výrobků ze dřeva a zároveň budou šetrné k životnímu prostředí.

Jednou z nejvíce perspektivně rozšiřujících se způsobů modifikace je termická úprava, která je považována za typ modifikace šetrný k životnímu prostředí. V zásadě platí, že hlavní úlohou této přeměny dřeva je zvýšit odolnost méně trvanlivých druhů vůči různým abiotickým a biologickým činitelům (Reinprecht 2008; Čekovská *et al.* 2016; Hill 2006). V tab. 1 se uvádí druhy modifikačních metod a změny, které následují po aplikaci určité metody.

Tab. 1 Základní způsoby modifikace rostlého dřeva (Reinprecht 2008)

MODIFIKAČNÍ METODA	ZMĚNA STRUKTURY DŘEVA		
	Geometrická a morfologická	Anatomická	Molekulární
Mechanická	+	+	-
Chemická			
- vyplnění lumenů	-	+	-
- blokace OH skupin	-	(+)	+
Termická	-	(+)	+
Biologická	-	-	+

Poznámka: + → výrazná změna, (+) → nevýrazná změna, - → bez změny

1.1.1 Termicky modifikované dřevo

Termickou modifikací dřeva se upravují vlastnosti dřeva působením vysokých teplot. Naši předkové si byli této skutečnosti vědomi, a proto opalovali povrch dřeva v otevřeném ohni, kdy materiálu prodloužili životnost a dřevo se tak stalo odolnějším. Opalovali například konce plotových stojek a tím zvýšili jejich trvanlivost (Esteves a Pereira 2009).

Na vědecké úrovni se tepelné zpracování dřeva začalo zkoumat v průběhu třicátých let 20. století, kdy probíhalo v Německu, avšak jeho náročnost neumožňovala bezproblémové technologické zvládnutí. Tyto problémy se vyřešily až s příchodem moderních technologií v 90. letech 20. století, a ve Finsku se začalo produkovat modifikované dřevo s patentovaným názvem ThermoWood®. Primárním cílem průmyslové tepelné modifikace je přeměna domácích snadno dostupných dřevin na produkt, který se bude vlastnostmi podobat dřevinám tropickým (ThermoWood Handbook 2003; Reinprecht 2008).

Zájem o produkty na této bázi úpravy se v posledních letech zvětšuje a jejich využití se těší stále větší oblibě. Způsobeno je to zejména snižující se dostupností trvanlivého tropického dřeva, rostoucími požadavky na obnovitelné stavební materiály, úbytkem subtropických lesů a důrazem na minimalizaci použití toxických látek. V současnosti se na evropském trhu vyskytuje několik různých výrobců tepelně modifikovaného dřeva:

- Finsko - příprava v atmosféře vzduchu (ThermoWood),
- Holandsko - příprava v prostředí vodní páry (PlatoWood),
- Francie - příprava v prostředí inertních plynů (Bois Perdure a RetificatedWood),
- Německo - příprava v olejích (OHT-Wood, RoyalWood).

Nové způsoby se v současnosti rozvíjí v Dánsku pod názvem WTT a v Rakousku Huber Holz, oba způsoby využívají při výrobě horkou páru, ale WTT do procesu přidává ještě olej (Militz a Tjeerdsma 2002; Navi a Sandberg 2012; Reinprecht a Vidholdová 2008).

Každý výrobce má odlišnou technologii výroby, která se liší hlavně ve složení plyné atmosféry ohřívající dřevo. Dále také ve vlhkosti nebo použití oleje, jenž je využíván jako médium přenášející teplo. Modifikace se vždy provádějí ve 160°C – 260 °C rozmezí teplot (Militz a Tjeerdsma 2002; Reinprecht a Vidholdová 2008).



Obr. 1 Ukázka termicky modifikovaného dřeva (<http://www.thermowood.ca>)

1.1.2 Podstata, cíle a definice termicky modifikovaného dřeva

Hlavním modifikačním činitelem u procesu termické úpravy dřeva, jak již název napovídá, je teplo. Cíli těchto procesů je zvýšení odolnosti vůči vodě, biologickým činitelům, a vylepšení rozměrové stability dřeva. Dochází k částečnému odbourání a rozložení složek dřeva, které jsou odolné proti teplotě. Je dokázáno, že významnější změny v chemické struktuře dřeva se uskutečňují až při působení teplot nad 150-170°C za běžných tlakových, časových a dalších expozičních podmínek. Další podstatné změny ve struktuře dřeva nastávají v intervalu teplot od 180-280°C. Tepelně upravované dřevo postupně tmavne, stává se hydrofobnější, odolnější proti biologickým činitelům a ztrácí svou původní pevnost. Proces trvá i několik desítek hodin. Dřevo, které bylo vystavené vysoké teplotě déle, bývá křehčí, ale zároveň odolnější vůči vodě. Působením teplot nad hranici 180°C dochází ke znatelnému úbytku polysacharidických složek. Následkem toho je snižování hmotnosti dřeva. Pokud teploty překročí hranici 300°C, materiál většinou vzplane, dřevo se přemění na hořlavé plyny a zuhelnatěnou vrstvu až v popel. Dochází tedy ke znehodnocení materiálu (Reinprecht a Vidholdová 2008; Reinprecht 2008, Hill 2006; González-Peña *et al.* 2007).

Podstatou, při výrobě termicky upraveného dřeva jsou zásahy do chemické struktury dřeva, které se odehrávají v jedné nebo i ve více rovinách, a jsou vypsány dále v textu. Při těchto zásazích je nutné dbát na to, aby nedošlo k větším změnám v polymezech dřeva, hlavně v polymerizačním stupni celulózy, ten je nezbytný pro pevnost dřeva.

- blokace hydroxylových funkčních OH skupin dřeva, díky které dochází k poklesu hygroskopicity a zlepšení rozměrové stability dřeva,
- síťovací polykondenzační reakce v ligninosacharidové matici dřeva, kde dochází k poklesu hygroskopicity dřeva a vznikají i látky odpuzující biologické škůdce,
- změny ve struktuře hemicelulóz a některých extraktivních látek, tvoří se látky odpuzující biologické činitele,
- tvorba stabilních neprchavých degradačních zplodin z ligninosacharidové matrice dřeva i z extraktivních látek. Ty dokáží blokovat aktivitu hub, hmyz a jiné organismy. Vznikají látky s biocidním efektem.

Hlavními cíli termické modifikace dřeva je připravit takový materiál, který bude:

- podstatně více odolný vůči vodě a biologickým činitelům,
- rozměrově a tvarově stabilní, to je dosaženo snížením navlhavosti dřeva (absorpce vlhkosti je snížena o cca 30-90%),
- používaný i do míst s opakovaným kontaktem s vlhkostí, toho je dosaženo díky snížené vodopropustnosti
- mít zlepšené tepelně izolační vlastnosti dřeva a zároveň sníženou tepelnou vodivost dřeva, (termicky upravené dřevo rozehráté od slunce nepálí do nohou),
- již s odstraněnou pryskyřici
- vykazovat zachované nebo zlepšené estetické stránky, kterými jsou barva, textura, lesk a minimální podíl trhlín,
- mít významně prodlouženou životnost, ta je výrobcí udávána zhruba na 30 let bez jakékoliv následné impregnace,
- vhodný jako náhrada některých velmi trvanlivých a rozměrově stabilních exotických druhů dřeva,
- použitelný pro výrobu různých dřevařských výrobků do náročných exteriérů a interiérů.

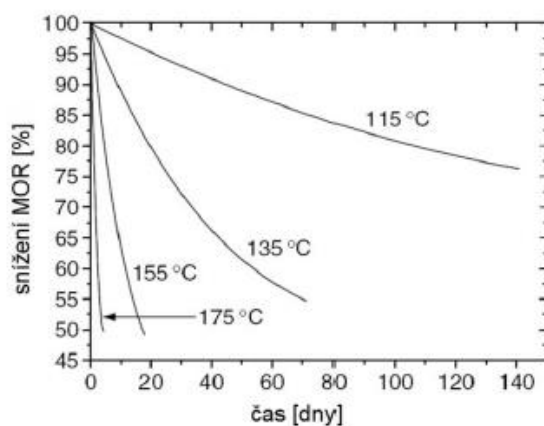
Zlepšené vlastnosti získané tímto procesem má upravovaný sortiment v celém svém průřezu, ty v něm zůstávají beze změn po celou dobu životnosti výrobku. Většina technologických postupů výroby termowoodu přispívá k úbytku rázové houževnatosti. Důležité je brát zřetel na to, že dřevo je po termické úpravě křehčí, má zvýšenou štípatelnost a nižší pevnost v ohybu a tahu, nemělo by se tedy využívat v konstrukcích nosného typu (Reinprecht a Vidholdová 2008; Reinprecht 2008).

1.1.3 Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

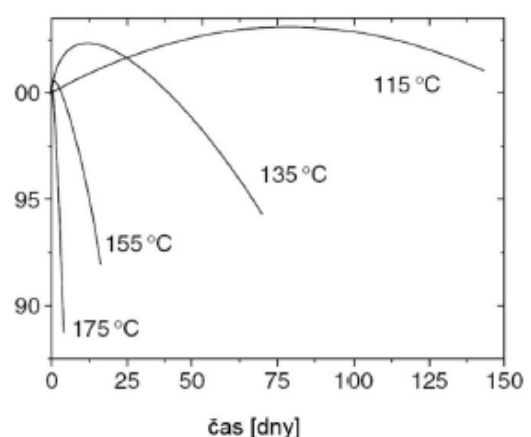
Pro další využití termicky modifikovaného dřeva je důležité si uvědomit, že při tepelné modifikaci dochází ke ztrátám hmoty z buněčných stěn a ke změnám rozměrů. Kdybychom srovnali průřezy stejně velikých vzorků upraveného a neupraveného dřeva, na upraveném vzorku dřeva by mělo být více tenčích vláken s pozměněnými vlastnostmi. Od toho se odvíjí i mechanické vlastnosti.

Bylo dokázáno, že úprava dřeva ve vysokých teplotách má za následek snížení meze pevnosti a houževnatosti. Podle studií dochází k rychlejšímu snížení pevnosti u listnatých dřevin.

Při krátkodobém působení teploty se modul pružnosti (obr. 3) nejprve zvyšuje a poté dochází k snižování. Rychlost snížení je v závislosti na teplotě, uvádí se, že při 8% a vyšším úbytku hmotnosti je pokles pružnosti už významného charakteru. Modul pevnosti v ohybu (obr. 2) se sníží okamžitě při použití vyšší teploty (Hill 2006; Rusche 1973).

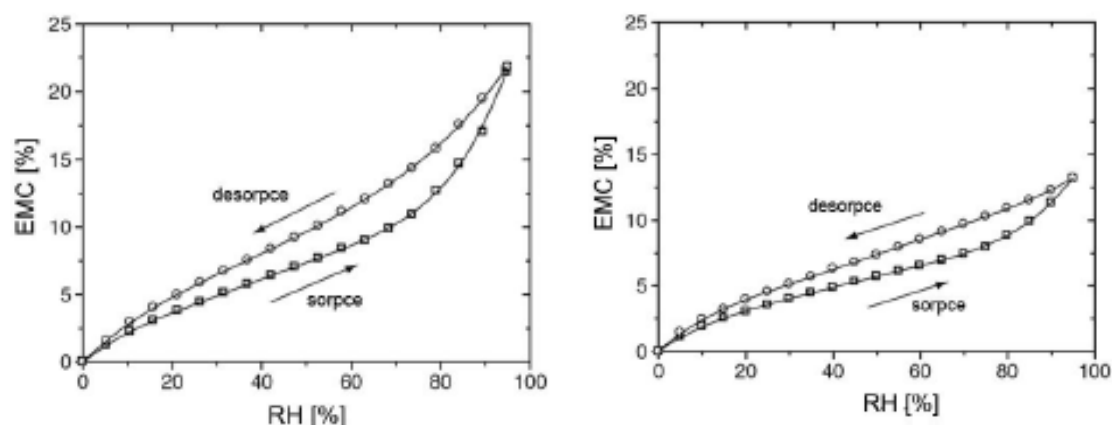


Obr. 2 Změna modulu pevnosti v ohybu v čase při působení vysoké teploty (Hill 2006)



Obr. 3 Změna modulu pružnosti v čase při působení vysoké teploty (Hill 2006)

Voda se poutá na hydroxylové skupiny a jejich množství je významně redukováno při tepelném ošetření následkem makromolekulárních změn v buněčné stěně. Voda má díky tomu méně možností, jak se do dřeva zapojit, výsledkem toho je snížení bobtnání a sesýchání. Upravené dřevo má tedy vyšší rozměrovou stálost. Na obr. 4 můžeme vidět, jak se snížil objem vody přijímané a odevzdané přibližně na polovinu oproti dřevu neupravenému (Hill 2006).



Obr. 4 Sorpční a desorpční vlastnosti neupraveného dřeva (vlevo) a dřeva upraveného (vpravo) v atmosféře dusíku při 250 °C po dobu dvou hodin (Hill 2006)

S přeměnou smáčivosti a minimalizováním počtu hydroxylových skupin dochází i ke snížení povrchového napětí. Tepelně modifikované dřevo má vylepšenou biologickou odolnost. Studie ukazují, že je možné využít ve třídách 1-3. Stupeň ochrany není ovšem dostatečný pro využití tam, kde přichází dřevo do kontaktu se zemí. Na první pohled je patrné ztmavnutí termicky upraveného dřeva. Míra ztmavnutí závisí na době a velikosti působící teploty a také na použitém prostředí (Hill 2006; Bekhta a Niemz 2003).

1.2 Změny struktury dřeva při termické modifikaci

Pokud dřevo projde procesem termické modifikace získává změny, které rozšiřují oblast jeho dalšího využití. Takto upravené dřevo můžeme použít například na okna, parkety, obklady, hudební nástroje apod. Vzhledem k tomu, že při tomto procesu dochází k poklesu pevnostních vlastností, jelikož termicky degradují jednotlivé složky dřeva, není toto dřevo vhodné k dalšímu použití jako konstrukční a stavební materiál. Z těchto důvodů se zkoumají změny vlastností, za které je termická modifikace

zodpovědná. Jsou to vlastnosti chemické, mechanické, fyzikální a biologické a jejich vzájemné souvislosti, které jsou důležité pro další rozhodování a optimální využití termicky upraveného dřeva (Gunduz 2009; Reinprecht a Vidholdová 2008).

Změny, které vznikají ve dřevě z důvodu působení zvýšené teploty, jsou výsledkem několika faktorů:

- druh dřeva, jeho tvar a počáteční vlhkost,
- intenzita přiváděného tepla, způsob ohřívání a délka působení,
- prostředí (inertní plyn, vzduch),
- tlak prostředí (vakuum, vlhkost).

Druh dřeva, jeho tvar a počáteční vlhkost mají svůj význam při průběhu termických reakcí. V suchém dřevě je vedení tepla výrazně nižší než v mokřém dřevě. Přenos tepla do vnitřních oblastí dřeva se zrychluje pařením nebo vařením dřeva ve vodě za tlaku normálního a zvýšeného. Je všeobecně známo, že listnaté dřeviny se modifikují termickými reakcemi intenzivněji a při nižších teplotách, a to z důvodu menšího podílu ligninu.

Intenzita působícího tepla je hlavním faktorem, jenž ovlivňuje změny ve struktuře dřeva při termické úpravě. Tyto změny struktury jsou intenzivnější, čím je vyšší teplota a delší čas trvání modifikace.

Přítomnost kyslíku má zásadní roli při termické degradaci dřeva. Reaguje se složkami dřeva, které jsou termicky aktivovány formou termooxidačních reakcí. Míra termického porušení a rozkladu všech složek dřeva se v přítomnosti kyslíku znásobuje. Pokud je ohřev realizován ve vakuu, inertní atmosféře nebo rostlinném oleji anebo ve vodě, kyslíku je ve dřevě méně a zároveň je zmenšen průběh termooxidačních reakcí.

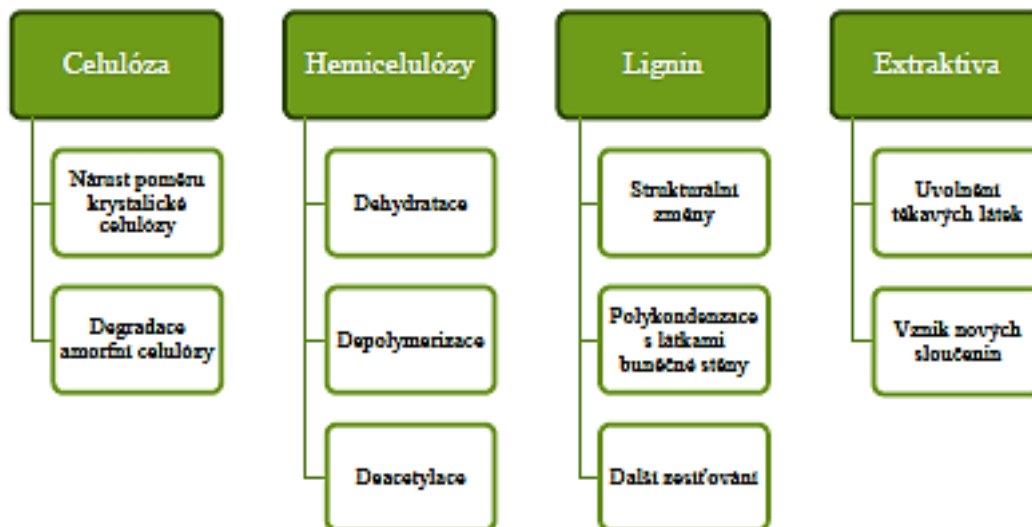
Tlak prostředí je závislý na zvoleném technologickém procesu úpravy. Tyto úpravy mohou být prováděny za sníženého tlaku – vakuum, nebo zvýšeného tlaku. Vytvořením vakua se zmenší počet molekul kyslíku, tím se potlačí termooxidační reakce a zároveň se omezí snížení polymerizačního stupně polysacharidů dřeva. Zvýšení tlaku prostředí je možné v uzavřených reaktorech.

Díky chemickým změnám, které ve dřevě při termických úpravách probíhají, se mění jak vlastnosti mechanické, tak i fyzikální, které jsou s nimi úzce spjaty. Technologické procesy výroby termicky upraveného dřeva je potřeba provádět tak, aby bylo dosaženo zjevných změn a současně byly minimalizovány nežádoucí účinky ohřevu dřeva při nejnižších ekonomických investicích (Kačíková a Kačík 2011).

1.2.1 Vliv termických úprav na chemickou strukturu dřeva

Jak již bylo uvedeno, účelem tepelné modifikace dřeva je získat změny v chemické struktuře dřeva, které povedou ke zvýšení rozměrové stability a s tím spojené snížení hygroskopicity a vylepšení odolnosti vůči biotickým škůdcům. Termická modifikace se odehrává v teplotním rozmezí od 180°C do 260°C. Při teplotách nižších než 140°C dochází k nevýznamným změnám v materiálových vlastnostech upravovaného dřeva. Naopak, pokud se překročí hranice 300°C, dojde k podstatnému snížení pevnostních vlastností modifikovaného materiálu neboli teplotní degradaci dřeva. Moderní postupy tepelné modifikace dřeva jsou redukovány maximální teplotou do 260°C (Hill 2006).

Dřevo je složitý celek odlišných látek. Základ tvoří přírodní polymery – celulóza, hemicelulóza a lignin. Celulóza a hemicelulóza představují polysacharidickou část dřeva, lignin zastupuje polyfenolický charakter. Vyjmenované složky tvoří hlavní součásti dřeva, procentuální zastoupení těchto složek v dřevním komplexu se pohybuje v rozmezí cca 90-97%. Sacharidická část je tvořena přibližně 70% a zbytek představuje lignin. V nepatrnějším procentuálním zastoupení ve dřevě jsou zahrnuty další anorganické a organické látky, které se nazývají doprovodnými látkami neboli akcesorickými látkami složek dřeva. Tyto látky tvoří 3-10% z dřevního komplexu. Tyto průměrné hodnoty zastoupení jednotlivých složek se mohou měnit v závislosti na druhu dřeviny a části stromu, ze kterého dřevo pochází. Přehled změn, které probíhají ve dřevě při tepelných úpravách, je vyobrazen na následujícím obr. 5 (Gandelová a Horáček 2012; Blažej *et al.* 1975).



Obr. 5 Chemické změny ve dřevě během termických úprav (Navi *et al.* 2012)

Postupným zahříváním dřeva nad 100°C dochází k uvolňování volné vody a prchavých extraktivních látek v buněčných stěnách. Při tomto zahřívání dochází v chemické struktuře dřeva ke změnám nevýznamným nebo méně významného charakteru. Následujícím zahříváním nad 140°C dochází k porušení vedlejších polymerních řetězců, vznikají významnější termolytické a termooxidační reakce. Tímto částečným odbouráváním hemicelulóz a ligninu se vytváří kyselina octová, metanol, kyselina mravenčí, vzniká voda a taktéž při teplotách nad 140°C začínají probíhat dehydratační reakce, při kterých dochází ke snižování počtu hydroxylových – OH skupin. Pokud se dále postupně teplota zvyšuje, uvolňuje se oxid uhličitý. Množství charakterizovaných reakcí roste s dalším nárůstem teploty. První stopy exotermických reakcí se začínají projevovat kolem 200°C teploty (Hill 2006; Reinprecht a Vidholdová 2008).

Jak uvádí Horáček (2001), v teplotním rozpětí od 170-240°C se již rozkládají hemicelulózy a jsou tedy nejméně odolnou složkou dřeva proti vlivu vysokých teplot. Stupeň rozkladu hemicelulóz vzrůstá v závislosti na teplotě a času umístění dřeva ve vysoké teplotě. Polymery hemicelulóz jsou zprvu depolymerizovány na monosacharidy a oligosacharidy, ty se poté štěpí na pentosany a hexosany. Pentosany a hexosany jsou hygrokopické méně, ačkoliv pentosany, které jsou zastoupeny v hemicelulózách tvrdých dřevin, se poddávají tepelné degradaci více než hexosany (Fengel a Wegener 1989).

1.2.1.1 Změny celulózy při termickém působení

Celulóza je nosnou oporou buněčných stěn dřeva. Na rozdíl od hemicelulózy je odolnější proti vysokým teplotám. Úmyslný tepelný rozklad celulózy při teplotách v rozpětí 170 +/- 60°C souvisí s dehydratačními a depolymerizačními reakcemi. Depolymerizační reakce v lineárních řetězcích amorfni celulózy směřují ke snížení ohybové a tahové pevnosti dřeva i ke snížení dalších mechanických vlastností. Při výrobě termicky upraveného dřeva je nezbytné potlačit všechny reakce depolymerizačního charakteru v celulózových řetězcích. Potlačení se zabezpečí například ohřevem dřeva v inertní atmosféře dusíku, pod hladinou rostlinných olejů nebo ve vakuu. Ohříváním dřeva se mění také vzájemný podíl krystalické a amorfni celulózy. Studiemi bylo dokázáno, že jestliže se dřevo ohřívalo na teploty v rozmezí 120-160°C, krystalický podíl vzrostl, ovšem při delším ohřevu a vyšších teplotách se sledoval pokles krystalického podílu. Ten však výrazněji narůstal v přítomnosti molekul vody. Změny v krystalickém obsahu celulózy jsou podstatné i z pohledu změn modulu pružnosti termicky upraveného dřeva, proto se modul pružnosti takto upraveného dřeva dá při některých výrobních technologiích i zvýšit (Kačíková a Kačík 2011; Reinprecht a Vidholdová 2008).

Do 250°C je tepelný rozpad celulózy jen velmi nízký. Významný rozpad nastává až při teplotách v rozpětí teplot od 250°C do 350°C. K degradaci celulózy dochází patrně již při poměrně nízkých teplotách do 200°C, ale její míra je ve srovnání s rozkladem hemicelulózy nepatrná. K termickému rozkladu je náchylnější amorfni část celulózy, ta má obdobné tepelné vlastnosti jako hemicelulóza s vyšším podílem hexosanů. Krystalická část celulózy je degradována nejintenzivněji v teplotním rozmezí 300-400°C. Stupeň rozkladu celulózy klesá s přítomností vody vázané, která zvyšuje schopnost přeměny celulózy amorfni na krystalickou (Horáček 2001; Hill 2006; Kim *et al.* 2001; Fengel a Wegener 1989).

1.2.1.2 Změny hemicelulózy při termickém působení

Polysacharidy, které doprovázejí celulózu v buněčných stěnách anatomických dřevních elementů, se nazývají hemicelulózami. Sdružují celulózové řetězce a váže se na ně lignin. Obsah hemicelulózy se pohybuje v rozmezí mezi 15–35%. Zastoupení je vyšší u listnatých dřevin než u jehličnatých (Gandelová a Horáček 2012).

Jako první z nejvýznamnějších složek dřeva se při termickém působení začínají měnit hemicelulózy, a to už při poměrně nízkých teplotách. Degradace probíhá ve větším intervalu teplot, intenzivněji především od 170°C do 280°C. Rozpad hemicelulózy nastává

deacetylací, při ní vzniká kyselina octová, jenž působí jako katalyzátor depolymerizačních reakcí a dále zrychluje rozkládání polysacharidů. Monomery vznikají při deacetylačních reakcích, ty vstupují do kondenzačních reakcí při vysokých teplotách za vzniku hydrofobnějších substancí. Vzhledem k předešlé hemicelulóze to má za důsledek zlepšení rozměrové stability a zvýšení hydrofobnosti dřeva. Dílčím odbouráváním hemicelulóz a dalších změn ve struktuře dřeva dochází ke zvětšení poklesu hmotnosti tepelně upraveného dřeva. Tento pokles narůstá se zvětšením teploty a prodlouženou dobou ohřevu (Reinprecht a Vidholdová 2008; Kačíková a Kačík 2011).

1.2.1.3 Změny ligninu při termickém působení

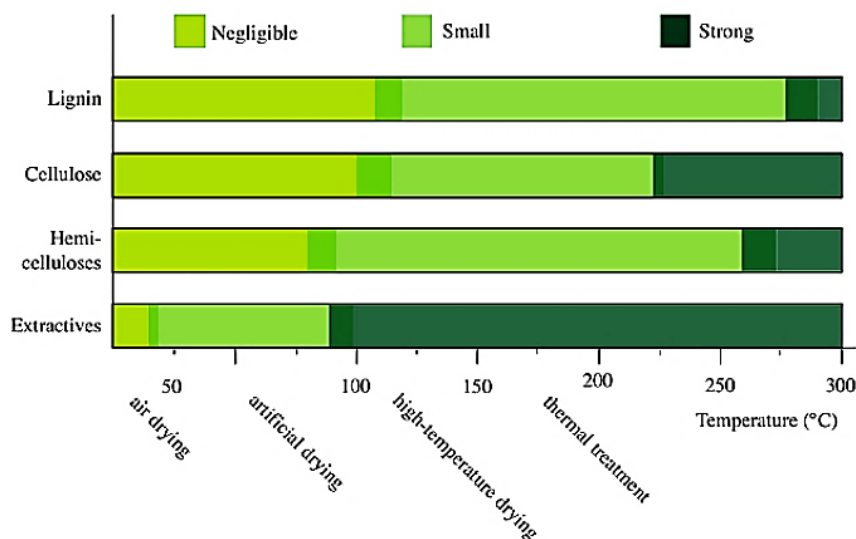
Lignin je nejstálější složkou dřeva a zajišťuje zdřevnatění buněčných stěn. Jeho zastoupení ve dřevě se pohybuje v rozmezí 15–35%. Větší obsah ligninu mají dřeviny jehličnaté, v listnatých dřevinách je zastoupen méně. Najdeme ho převážně ve střední lamelě, nicméně prostupuje i do ostatních vrstev. Poskytuje dřevu pevnost, je termoplastický a amorfní. Současně je nejodolnější součástí dřeva proti tepelnému působení, jak z hlediska fyzikálního, tak i chemického, jelikož kovalentní vazby nejlépe vzdorují termolýze a termooxidaci (Gandelová a Horáček 2012; Reinprecht a Vidholdová 2008).

K velmi mírnému rozpadu ligninu dochází při nižších teplotách, během kterých vznikají také fenolické látky. Průběhem zahřívání v rozmezí teplot od 50 do 200°C probíhají podobě jako u hemicelulóz a celulóz i u ligninu reakce endotermické. Nad 220°C se začínají uplatňovat exotermické reakce. Důsledkem endotermických reakcí je molekulové přeskupení a změkčení ligninu. Chemické reakce se začínají uskutečňovat v molekulách ligninu až při teplotách vyšších, a to okolo 180-260°C. Důležité reakce spjaté s rozpadem ligninu začínají probíhat při teplotě kolem 280°C a vyšších. Lignin degraduje vlivem působení vysokých teplot v teplotním rozmezí mezi 300-400°C (Reinprecht a Vidholdová 2008; Hill 2006; Horáček 2001).

1.2.1.4 Změny extraktivních látek při termickém působení

Extraktivní látky zaujímají méně než 5% extraktiv. Jsou to látky různých chemických povah, které ovlivňují mimo jiné fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva, barvu, vůni nebo opracování. I tyto látky podléhají různorodým chemickým, fyzikálním a chemicko-fyzikálním přeměnám. Pokud se dřevo ohřívá, většina tukových,

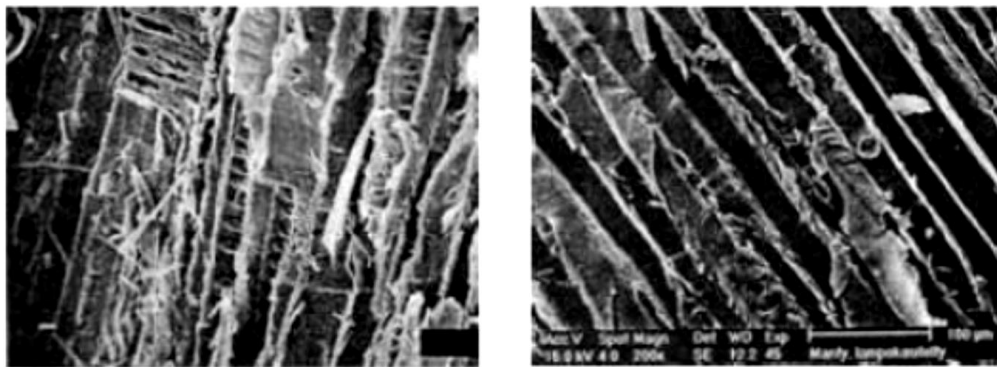
pryskyřičných a voskových látek se dostává do kapalného i plynného stavu a přecházejí k jeho vnějšímu povrchu. Vlivem vysokých teplot se některé extraktivní látky mění na prchavé organické komponenty a ze dřeva se jednoduše vypaří. Termicky modifikované dřevo má méně prchavých terpenů, ale obvykle obsahuje více kyseliny octové (Gandelová a Horáček 2012; Reinprecht a Vidholdová 2008; ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 6 Schématické znázornění změn složek dřeva, které nastávají vlivem teploty, bez ohledu na čas. Negligible – zanedbatelné změny, small – malé změny, strong – silné změny jsou barevně odlišeny. Uvedeny jsou i některé příklady sušení. Air drying – přirozené sušení, artificial drying – nucené sušení, high temperature drying – vysokoteplotní sušení a thermal treatment -- tepelná modifikace (Navi *et al.* 2012)

1.2.2 Anatomické změny termicky modifikovaného dřeva

Účinek zvýšených teplot při tepelné úpravě má za následek výrazné změny v anatomické struktuře dřeva. Dochází k trhlinám v buněčných stěnách, dvojtečkách a ztenčinách. Buněčné stěny jsou všeobecně tenčí, propustnější a křehčí z důvodu slabšího tmelícího efektu hemicelulóz a vazeb mezi polysacharidy a ligninem. Lom více opisuje letokruhy a je méně vláknitý. Ke vzniku trhlin mají větší sklon jehličnaté dřeviny, a to v tangenciálním směru. Náchylné jsou také dřeviny, které mají náhlý přechod mezi jarním a letním dřevem a dřeviny s úzkými letokruhy (Kačíková a Kačík 2011).



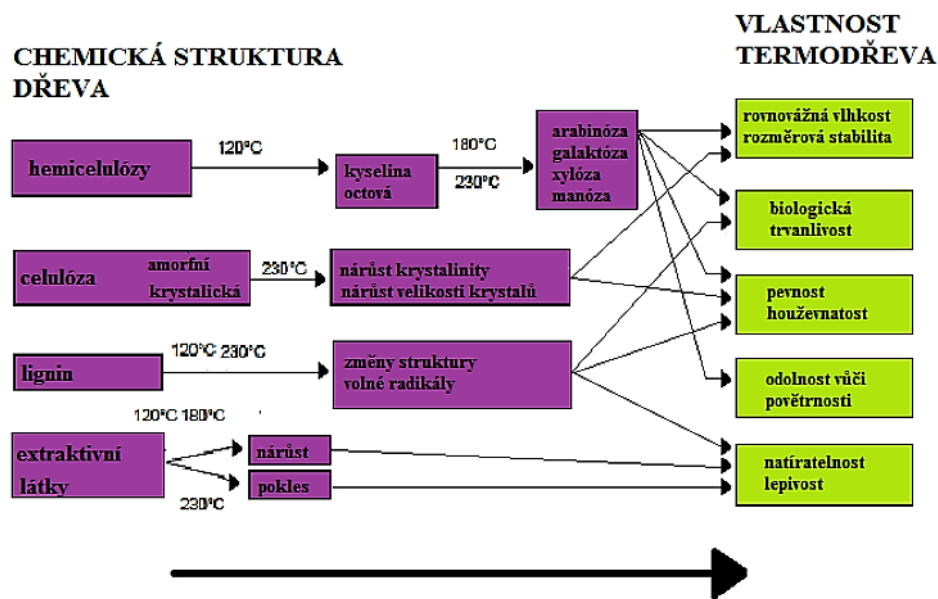
Obr. 7 Porovnání anatomické struktury neupraveného dřeva (vlevo) a termicky upraveného dřeva – borovice (vpravo) (ThermoWood Handbook 2003)

1.2.2.1 Trhliny

Buněčné stěny dřeva, které prošly termickou úpravou, a tudíž mají depolymerizované polysacharidy, jsou křehčí, a proto se v nich častěji vytvářejí nanotrhliny, mikrotrhliny a makrotrhliny, které jsou okem viditelné. Tvoří se trhliny různých velikostí ve dvojtečkách a jiných typech ztenčení, tím se narušují a narůstá propustnost pro tekutiny (Reinprecht a Vidholdová 2008).

1.3 Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva

Termické úpravy dřeva se obvykle realizují v prostředí s omezeným přístupem vzduchu, v přítomnosti vodních par nebo v dusíku, v olejích a jiných kapalinách, které umožňují přípravu materiálů, od kterých očekáváme určité vlastnosti, jako je zvýšená biologická odolnost vůči dřevokazným houbám, dřevokaznému hmyzu a jiným škůdcům. Zároveň se též zlepšuje rozměrová stabilita, snižuje se navlhavost, vylepšené jsou tepelně-izolační vlastnosti a upravené dřevo získává zajímavou barvu. Mírně však klesá pevnost. Takřka všechny změny, které se v tepelně upraveném dřevu odehrávají, jsou následkem změn v jeho chemické struktuře (obr. 8) (Reinprecht a Vidholdová 2008).



Obr. 8 Změny v chemické struktuře dřeva při teplotách 120-230 °C a jejich vliv na vlastnosti termodřeva (Reinprecht a Vidholdová 2008)

1.3.1 Fyzikální vlastnosti termicky upraveného dřeva

Mezi fyzikální vlastnosti dřeva řadíme hustotu, barevnost, akustické vlastnosti, hygroskopicitu, rozměrovou stabilitu a tepelně izolační vlastnosti (Reinprecht a Vidholdová 2008).

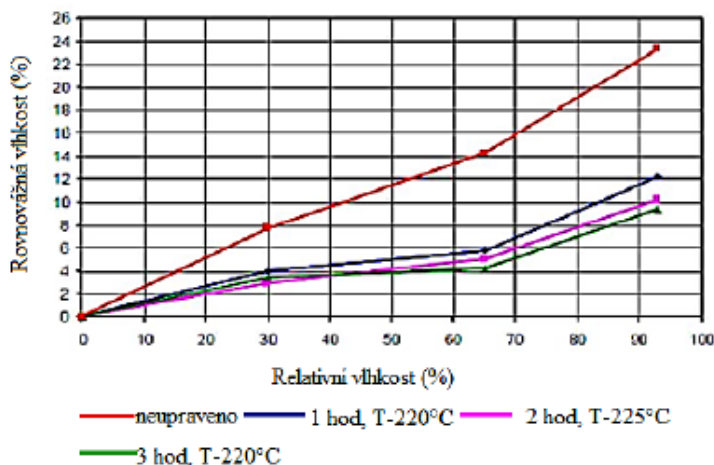
1.3.1.1 Hygroskopicita

Dřevo je hygroskopický materiál, což mu dává schopnost měnit svou vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. Nežádaným výsledkem změny obsahu vody ve dřevě jsou rozměrové změny – sesychání a bobtnání, a též změny pevnosti a pružnosti při mechanickém namáhání (Gandelová a Horáček 2012).

U tepelně upraveného dřeva se hygroskopicita snižuje. V porovnání s rostlým dřevem má tepelně modifikované dřevo nižší hygroskopicitu. To je dáno odbouráním určitého podílu hemicelulóz a také prostorovou blokadí hydrofobních-OH funkčních skupin, migrací a distribucí lipidních látek. Hygroskopicita je představována rovnovážnou vlhkostí dřeva. S rostoucí teplotou rovnovážná vlhkost klesá (Reinprecht 2008; Hill 2006).

Tepelné působení omezuje obsah rovnovážné vlhkosti, při teplotách kolem 220°C se hodnota nasákavosti snižuje přibližně na polovinu vůči neupravenému dřevu. Jestliže jsou hodnoty relativní vlhkosti vyšší, rozdíl mezi hodnotami vlhkosti dřeva je vyšší. Na obr. 9 jsou vyobrazeny změny obsahu rovnovážní vlhkosti při působení teplot

v rozmezí 220-225°C v časovém intervalu působení 1-3 hodiny při různých vlhkostech (Reinprecht a Vidholdová 2008; Kačíková a Kačík 2011).



Obr. 9 Vliv relativní vlhkosti na obsah vlhkosti u termicky upraveného smrkového dřeva při různých podmínkách úpravy technologií ThermoWood (ThermoWood Handbook 2003)

1.3.1.2 Rozměrová stabilita

Termicky upravené dřevo má lepší rozměrovou stabilitu, to je významné v tom, že při změnách relativní vlhkosti vzduchu se jeho rozměry pozměňují méně než v rostlém dřevu. Lepší rozměrovou stabilitu můžeme odůvodnit odbouráním hemicelulóz, není ovšem možné vyloučit i jiné vlivy, jako je například tvorba esterových a etherových příčných vazeb v ligninu, respektive mezi ligninem a hemicelulózami. Díky nim se stává struktura buněčných stěn tepelně modifikovaného dřeva odolnější vůči vniknutí molekul vody (Reinprecht 2008; Reinprecht a Vidholdová 2008).

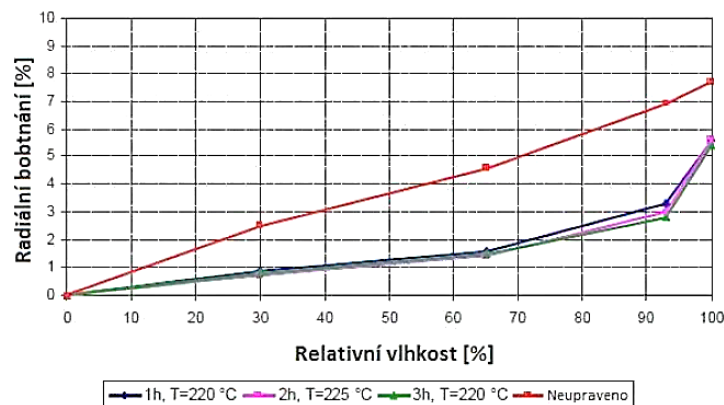
Podle Edvardse a Senslanda (1999) se už při sušení teplotou 110°C stává dřevo rozměrově stabilnější. Jako příklad můžeme uvést termicky upravené dřevo typ ThermoWood, u kterého se bobtnání a zpětné sesychání pohybuje v rozpětí 50-90% z původních hodnot dřeva, tj. ASE= 10-50%. Vylepšená rozměrová stabilita dřeva je charakterizována parametrem UVN – účinnosti proti bobtnání (ASE – Anti-Swelling Efficiency) (Reinprecht a Vidholdová 2008).

$$UVN = ASE = (\beta_{rost} - \beta_{mod}) / \beta_{rost} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1)$$

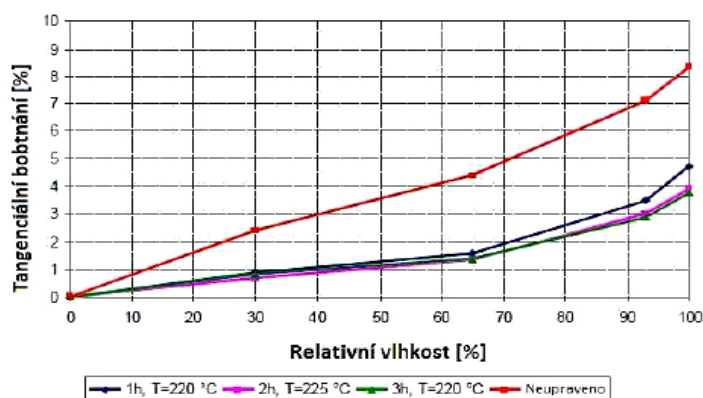
kde:

β_{rost} - koeficient objemového bobtnání rostlého dřeva,

β_{mod} - koeficient objemového bobtnání modifikovaného dřeva.



Obr. 10 Radiální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti, smrkové dřevo bylo termicky upravené technologií ThermoWood za různých podmínek (ThermoWood handbook, 2003)



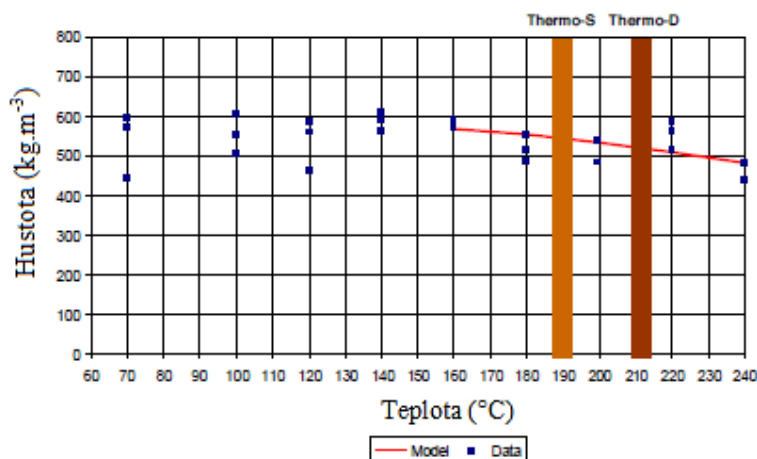
Obr. 11 Tangenciální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti, smrkové dřevo bylo termicky upravené technologií ThermoWood za různých podmínek (ThermoWood Handbook, 2003).

1.3.1.3 Hustota

Hustota dřeva je popisována podílem hmotnosti dřeva a jeho objemu. Používané jednotky jsou $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Objem i hmotnost jsou velmi výrazně ovlivněny vlhkostí dřeva. Přesto se jedná o jednu z nejvýznamnějších charakteristik dřeva, jež výrazně ovlivňuje velké procento fyzikálních a mechanických vlastností dřeva (Gandelová a Horáček 2012).

Tepelně modifikované dřevo má o něco málo nižší hustotu než neošetřené dřevo, poněvadž tepelnými úpravami dochází ke ztrátě hmotnosti. Během termických úprav se jisté složky dřeva odbourávají, mezi ně patří hlavně hemicelulózy a některé doprovodné látky. Též se zmenšuje objem dřeva, ale méně než jsou jeho příslušné hmotnostní úbytky. To se odráží zejména ve slabém poklesu hustoty tepelně upraveného dřeva. Smršťováním tepelně modifikovaného dřeva v příčném směru se zabývalo již

v několika vědeckých a odborných studiích. Poukázalo se současně na skutečnost, že vznikem napětí v tangenciálním a radiálním směru se někdy i rozměry v podélném směru zvětšují. Na obr. 12 můžeme vidět pokles hustoty s rostoucí teplotou úpravy na vzorcích borovicového dřeva upravených technologií ThermoWood (Reinprecht a Vidholdová 2008; Hill 2006; ThermoWood Handbook 2003).



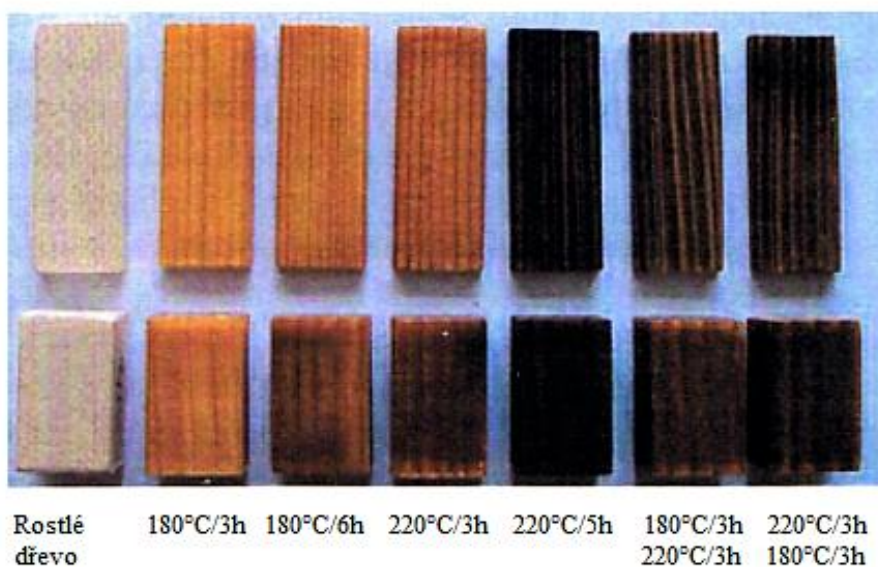
Obr. 12 Změna hustoty borovicového dřeva tepelně upraveného při teplotách od 160°C do 240°C po dobu 3 hodin (ThermoWood Handbook 2003)

1.3.1.4 Barevnost a vůně

Dřeviny jsou charakteristické různými barvami. Za barvu se považuje zrakový vjem, který závisí na spektrálním složení odražených světelných paprsků. Barevná charakteristika je závislá hlavně na chemickém složení dřeva v závislosti na světle. Významné je zbarvení dřeva u výroby nábytku, sportovních potřeb, hudebních nástrojů a například uměleckých děl. Jako taková může být barva ukazatelem kvality termicky modifikovaného dřeva a tím určovat jeho finální uplatnění na trhu (Gandelová a Horáček 2012; Hon a Shiraishi 2001; Boonstra 2008).

Tepelně upravené dřevo má svou charakteristickou barvu a vůni. Vlivem působení vyšších teplot se dřevo zbarvuje do žlutohnědých až hnědočerných barevných odstínů. Pokud se zvýší teplota a prodlouží čas ohřevu, výsledkem je tmavší zbarvení dřeva. Ohřev v atmosféře vzduchu vyvolává ve dřevě intenzivnější změny barevnosti v porovnání s ohřevem v dusíku. Při ohřevu v rostlinných olejích nastávají netradiční barevné změny barvy a lesku dřeva (obr. 13), důvodem toho jsou unikavé organické produkty (VOC), které vznikly degradací hemicelulóz. Termicky upravené dřevo, jenž má vyšší podíl těchto látek, je cítit po spálenině, což bývá někdy překážkou pro jeho další interiérové využití. Hnědého pravidelného zbarvení je dosaženo v celém průřezu tepelně

upravovaného materiálu a při mechanickém opracování jako např. řezání, frézování, broušení nebo frézování dřevu zůstává předešlý kakaový, kávový nebo jiný odstín. Tepelně upravené dřevo je často svou barvou podobné některým druhům tropických dřev, jako je například eben, teak, merbau a ipe. Testováním, které bylo zaměřeno na sledování barevnosti při přirozeném stárnutí termodřevu v povětrnostních podmínkách, poukázalo na fakt, že barevnost není stálá a povrch s postupem času vybledne a zšedne. Barevné změny při působení zvýšených teplot můžeme vidět na obr. 14 (Reinprecht 2008; Reinprecht a Vidholdová 2008; ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 13 Barevné změny tepelně upraveného borovicového dřeva v řepkovém oleji (Reinprecht a Vidholdová 2008)



Obr. 14 Barevné změny tepelně upravovaného borovicového dřeva. Teplota úprav začíná na 70°C a dále se pohybuje po 20°C od 100°C až po 240°C. Čas tepelného upravování je 3 hodiny (ThermoWood Handbook 2003).

1.3.1.5 Tepelně – izolační vlastnosti

U termicky upraveného dřeva je tepelná vodivost snížena o 10–30% v porovnání s dřevem, které upraveno není. Proto je vhodné používat termicky upravené dřevo například na obklady fasád, na okna, venkovní dveře a obložení saun (ThermoWood Handbook 2003).

1.3.1.6 Akustické vlastnosti

Mimo jiné má termicky upravené dřevo i zajímavé akustické vlastnosti. Při speciálních úpravách, které jsou podmíněné mírnějšími teplotními podmínkami, lze připravit druh termodřeva vhodného na výrobu hudebních nástrojů. Takto upravené dřevo se strukturou a vlastnostmi shoduje s dřevem, které je dlouhodobě přirozeně skladováno a vyznačuje se mírným nárůstem Yangova modulu pružnosti, a to díky mírnému poklesu hmotnosti, jež jsou následkem odbourávání hemicelulóz. Akustické vlastnosti takto upravených dřev se mnohdy shodují se dřevy vzácných historických hudebních nástrojů, čehož se využívá při restaurování. Dobrá rozměrová stabilita, kterou tepelnými úpravami dřevo získá, je důležitým faktorem pro výrobu hudebních nástrojů používaných v měnících se extrémních klimatických podmínkách (Barlow 1997; Reinprecht a Vidholdová 2008).

1.3.2 Mechanické vlastnosti termicky upraveného dřeva

Mechanickými vlastnostmi rozumíme schopnosti dřeva čelit účinkům vnějších sil. Vzájemné působení mezi vlhkostním a mechanickým namáháním v souvislosti s časem výrazně ovlivňuje deformovatelnost dřeva při různorodých druzích namáhání. Na reakce dřeva při mechanickém namáhání mají vliv vazby mezi chemickými složkami dřeva, anatomické stavby a geometrie tělesa. Změny závisí na druhu dřeviny a na podmínkách, při kterých úprava probíhá. Některé nepříznivé mechanické vlastnosti, které dřevo získá během termické úpravy, omezují jeho další využití pro konstrukční a stavební materiál (Gandelová a Horáček 2012; Kačíková a Kačík 2011).

Vliv na mechanické vlastnosti má výrazná redukce hygroskopicity (až na 50%). Z toho vyplývá značná stabilita struktury i rozměrů. Při nejvyšších teplotních úpravách dochází až k 20% snížení pevnosti v ohybu u jehličnatých dřevin, u listnatých tyto hodnoty dosahují až k 40%, tyto změny nastávají u průmyslově vyrobeného ThermoWoodu. Podobně snížené hodnoty vykazuje i pevnost v tahu. U mechanických

vlastností jako je smyková pevnost a houževnatost je tato tendence ještě výraznější. Při úpravě nižšími teplotními stupni se statický modul pružnosti snižuje o 5%, naopak dynamický modul pružnosti v ohybu se zvětšuje, a to až o 30-40%. Podobné zlepšení je možné pozorovat i u pevnosti v tlaku a tvrdosti. Mechanické vlastnosti u termicky upraveného dřeva při nízkých stupních úpravy mezi 160°C-170°C částečně narůstají, to je způsobeno nižším stupněm narušení struktury, který vede jen k poklesu hygroskopicity dřeva. Toto zlepšení je proto významné jen při srovnání se dřevem neupraveným za shodných okolních podmínek (Borůvka *et al.* 2015; Reinprecht a Vidholdová 2008).

1.3.2.1 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost je jednou z nejdůležitějších vlastností dynamického namáhání. Můžeme ji charakterizovat jako schopnost odolávat okamžitému maximálnímu namáhání neboli pohlcovat a rozptýlit energii rázovým ohybem. Pod tímto pojmem chápeme číselné znázornění velikosti práce, která je spotřebovaná na přeražení neboli zlomení dřeva za daných podmínek. Dřevo, které má vysokou rázovou pevnost, se nazývá pojmem houževnaté. Pokud je rázová pevnost naopak nízká, dřevo se charakterizuje jako křehké. Podle typu a tvaru zlomu po přeražení je možné popsat kvalitu dřeva. Dřevo, které má vysokou hodnotu houževnatosti, tvoří vláknitý neboli „štrapatý“ zlom. Typické pro křehké dřevo je nevláknitý, tupý schodovitý zlom, ten vznikne náhle a deformace je poměrně malá. Některé dřeviny mohou vykazovat relativně vysokou pevnost, ale při rázové houževnatosti se projeví jako křehké. Rázovou houževnatost ovlivňuje několik různých faktorů, nejvíc je ovlivněna hustotou, odklonem vláken, vlhkostí a teplotou dřeva (Požgaj *et al.* 1993; Bal a Bektas 2012; Bal 2016; Bučar a Merhar 2015; Kollmann 1957; Reinprecht a Vidholdová 2008).

Rázovou houževnatost stanovujeme pomocí přerážecích kladiv, například s použitím Charpyho kladiva. Princip tohoto kladiva je v rozdílu polohových energií před přeražením tělesa (bez překážky) a po přeražení tělesa, které je testováno. Polohová energie je vypočtena v podobě vydané práce na porušení zkušebního tělesa. Pro určení rázové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva využíváme vztah:

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

kde:

A_w – rázová houževnatost (přerážecí práce),

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J],

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

(Požgaj *et al.* 1993).

Pro stanovení rázové houževnatosti využíváme zpravidla tělesa se čtvercovým průřezem. Rázová houževnatost je zvláště závislá na dimenzích tělesa a vzdálenosti podpěr. Jak uvádí Požgaj, pro lepší pohlcení energie při zkoušení těles je vhodný poměr vzdálenosti podpěr k výšce testovaného tělesa v poměru $\frac{l_0}{h} \geq 12$, pro kvalitnější vstřebání energie při zkoušce. Na konečné velikosti rázové houževnatosti má svůj podíl mimo jiné i sklon dřevních vláken, teplota, nebo vlhkost. Rázovou houževnatost určujeme ve směru tangenciálním kolmo na vlákna. Výjimkou jsou listnaté a kruhovitě pórovité dřeviny, kde lze tuto vlastnost změřit i ve směru radiálním, jelikož je o 20-50% větší (Gandelová a Horáček 2012; Požgaj *et al.* 1993).

1.3.2.1.1 Faktory ovlivňující rázovou houževnatost dřeva

Významný vliv na rázovou houževnatost má umístění dřeva do teplot větších než 200°C. Dochází k pyrolýze dřeva, tím pádem se dřevo stává křehčím. Listnaté dřeviny jsou v přerážení v průměru dvakrát pevnější než jehličnaté dřeviny (Požgaj *et al.* 1993, Perelygin 1960).

1.3.2.1.2 Rázová houževnatost termicky upraveného dřeva

Termickou úpravou dochází k porušení stavebních polymerů. S fázemi jejich porušení se snižují hodnoty houževnatosti a pevnosti dřeva. Pevnost dřeva podléhá hustotě. Termicky modifikované dřevo má hustotu nižší, tím pádem i pevnost termicky modifikovaného dřeva je nižší v některých případech. Vlhkost ve dřevě též ovlivňuje pevnost dřeva, díky tomu má termicky upravené dřevo výhodu ve své nižší rovnovážné vlhkosti (ThermoWood Handbook 2003).

Pokud se ohřívá mokré dřevo, plastifikuje se lignin, ten se ale po usušení vrací do původního stavu. Tento jev je využíván u výroby ohýbaného nábytku. Všeobecně můžeme říct, že pevnost dřeva a houževnatost dřeva se snižují v souvislosti na použité dřevině a vybraném procesu výroby. Jestliže se pevnost a houževnatost sníží o 30–50%

je to pro většinu výrobků ze dřeva nepřijatelné. Nutností je tedy při termických úpravách dlouhodobě nepřesahovat teplotu 220°C a omezit přísun vzduchu. Dlouhodobější vystavení dřeva teplotám 220°C je nutné provádět bez přístupu kyslíku. Seborga a kol. (1953) svými studiemi určili, že při ohřevu dřeva na teplotu 300°C je velmi významný pokles houževnatosti o 90% při 30% úbytku hmotnosti (Reinprecht a Vidholdová 2008).

1.3.2.2 Tvrдост

Pod pojmem tvrdost rozumíme schopnost dřeva klást odpor proti vnikání cizího tělesa do jeho struktury. Tvrдост má význam například při opracování dřeva reznými nástroji při řezání, frézování, loupání atd., ale také při používání dřevěných výrobků tam, kde může dojít k poškození – poškrábání nebo oděru dřeva. Rozlišujeme tvrdost statickou a dynamickou. Nejčastěji se pro určení tvrdosti využívá Brinellova metoda, jež spadá do skupiny statické tvrdosti dřeva. Podstatou této metody je vlačování ocelové kuličky určitého průměru (obr. 15) statickým zatížením do čelních, tangenciálních a radiálních ploch dřeva. Ocelová kulička je daná průměrem 10 mm a je vlačována konstantní silou do dřeva, a to podle jeho tvrdosti. Pro velmi měkké dřeviny se využívá hodnota 100 N, pro středně tvrdé 500 N a pro tvrdé dřeviny 1000 N. Plocha otláčené se vypočítá z průměru plochy vytlačené do dřeva a kuličky. Tvrдост H_B je dána vztahem:

$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

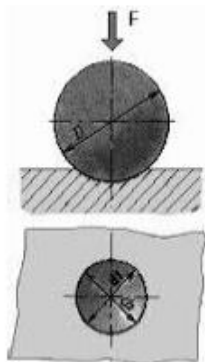
kde:

F – síla působící na kuličku [N],

D – průměr kuličky [mm],

D – průměr otláčené plochy ve dřevě [mm],

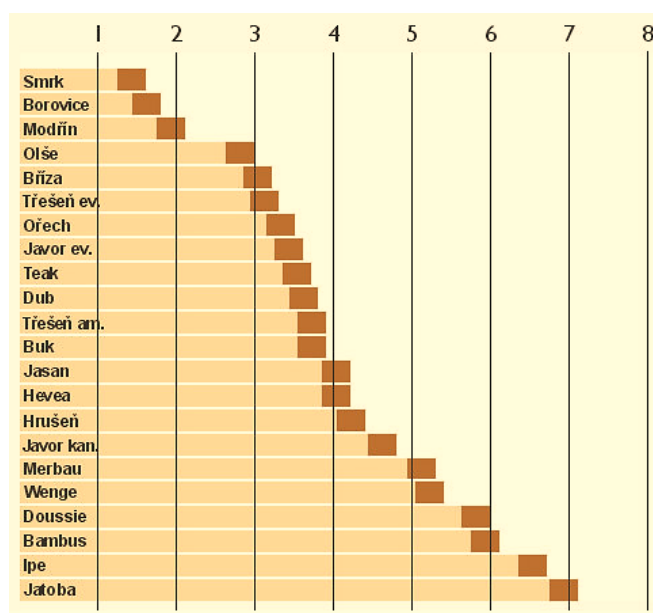
(Gandelová a Horáček 2012).



Obr. 15 Zkouška tvrdosti podle Brinella – tvar a obrys kuličky

Stupnice tvrdosti dle Brinella je zobrazena na obr. 16. V následujícím textu je základní rozdělení dřevin dle tvrdosti se zastoupením jednotlivých dřevin spadajících do určité třídy tvrdosti.

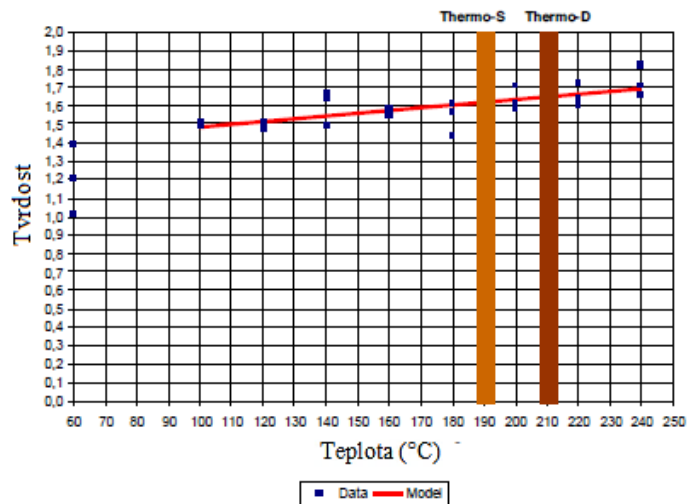
- MĚKKÁ DŘEVA – mají tvrdost 40 MPa nebo méně: smrk, borovice, jedle, olše, topol, lípa, vrba, osika, atd.
- TVRDÁ DŘEVA – mají tvrdost 40–80 MPa: dub, buk, jasan, jilm, ořech, bříza, ovocná dřeva, modřín, apod.
- VELMI TVRDÁ DŘEVA – mají tvrdost nad 80 MPa: akát, habr a některá exotická dřeva, např. pyinkado, padauk, eben.



Obr. 16 Stupnice tvrdosti podle Brinella (<http://www.debaboheemia.cz/>)

1.3.2.2.1 Tvrdost termicky upraveného dřeva

Termická úprava s teplotami v rozsahu 100-240°C tvrdost neovlivňuje, naopak ji může i zvýšit (obr. 17). V praxi je toto zlepšení ovšem zanedbatelné. Na zvýšení hodnot tvrdosti při teplotách pohybujících se pod 200°C má vliv vzrůstající podíl krystalické celulózy během rozkladu amorfních částí hemicelulóz (Gandelová a Horáček 2012; ThermoWood Handbook 2003; Reinprecht a Vidholdová 2008; Kocafe 2008).



Obr. 17 Závislost tvrdosti dřeva borovice na teplotě ošetření, metoda podle Brinella, délka úprav 3 hodiny (ThermoWood Handbook 2003)

1.3.2.3 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva můžeme charakterizovat jako odolnost (odpor) proti jeho stálému porušení. Je to jedna z nejdůležitějších mechanických vlastností. Číselně vyjadřujeme pevnost napětím, při kterém se poškodí jeho soudržnost. Data o pevnosti dřeva zjišťujeme pomocí zkoušek, u kterých se dodržují podmínky zkušebního postupu a sleduje se reálné napětí v okamžiku, kdy dojde k porušení tělesa (Požgaj *et al.* 1993, Gandelová a Horáček 2008).

1.3.2.3.1 Pevnost dřeva v tlaku

Vzhledem ke směru působící síly k orientaci vláken a letokruhům rozeznáváme:

1. Pevnost v tlaku ve směru vláken.
2. Pevnost v tlaku napříč vláken:
 - ve směru radiálním,
 - ve směru tangenciálním (Požgaj *et al.* 1993).

Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken

Tlaková pevnost ve směru vláken je z reálného hlediska nejvýznamnější a nejcharakterističtější vlastností dřeva. Jestliže působíme tlakem na těleso podél vláken, dochází k deformaci, která se projevuje zkrácením délky tělesa. Povaha deformace záleží na kvalitě dřeva a jeho stavbě. Významnými faktory jsou hustota a vlhkost dřeva.

Studiemi byla vyhodnocena průměrná hodnota meze pevnosti dřeva v tlaku na cca 50 MPa ve směru vláken při vlhkosti 12%. Jestliže se zatěžuje dřevo suché s vysokou hustotou a významnou pevností, vzniká porušení tělesa v podobě usmýknutí jedné části tělesa vůči druhé. Pokud zatěžujeme tělesa vlhká s nízkou hustotou a malou pevností, dojde k otlacení vláken na čelních plochách a následnému vybočení stran zatěžovaných těles (Požgaj *et al.* 1993, Gandelová a Horáček 2012).

Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken vypočítáme ze vztahu pro normálové napětí:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{a \cdot b} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

kde:

F_{\max} - maximální zatížení [N],

a,b - průřez vzorku v [mm] (Požgaj *et al.* 1993).

Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken

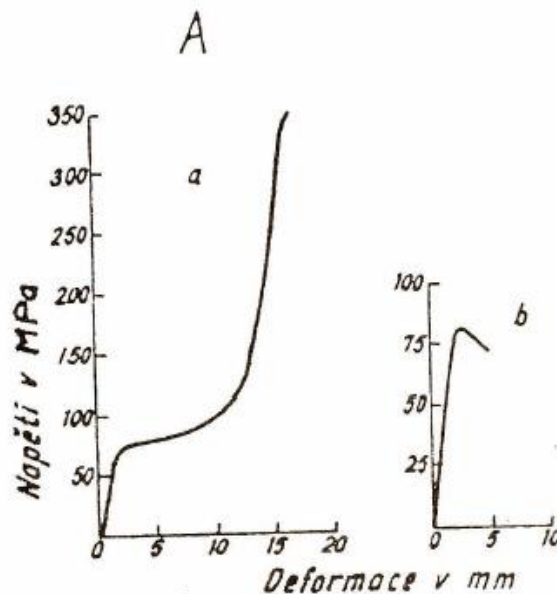
V tomto případě zatěžování není dřevo porušeno oddělováním jednotlivých částí na rozdíl od zatěžování v tlaku ve směru vláken, dochází však k postupné deformaci a zhušťování dřevní struktury v plném objemu. U většiny zatěžovacích zkoušek, kdy na tělesa působí tlak napříč vláken, nedojde k celkovému porušení tělesa. Hodnoty pevnosti v tlaku napříč vláken se získávají graficky z pracovního diagramu (Gandelová a Horáček 2012).

Během působení tlaku napříč vláken jsou uskutečnitelné dva možné způsoby deformace dřeva – jednofázová a třífázová (obr. 18).

Během jednofázové deformace je na grafu patrná lineární část, která ukazuje, že se vzrůstajícím napětím roste i deformace. Tato lineární část probíhá takřka do maximálního zatížení, při tomto zatížení dochází k poškození tělesa (Matovič 1993).

Třífázová deformace dřeva je charakteristická pro zatížení dřeva při tlaku napříč vláken v radiálním směru. Deformace v první fázi je způsobena stlačováním jarního dřeva v letokruzích. Závěrem této fáze je dosaženo meze úměrnosti. Po úbytku stability anatomických prvků začíná jejich stlačování. Tento proces se vyvíjí působením stejného nebo jen o něco málo většího napětí. Druhá fáze na pracovním diagramu znázorňuje téměř vodorovnou nebo mírně zakřivenou část křivky. S postupující deformací elementů letního dřeva v letokruzích, které jsou pevnější, dosahuje se přechodu do třetí fáze této třífázové deformace. Lineární část s ostrým stoupáním, která je vyobrazena na obr. 18 s označením

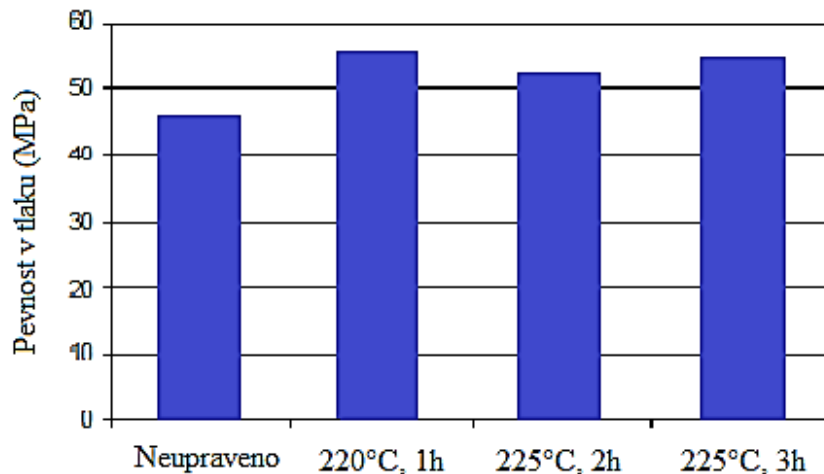
a), je výsledkem značného zatížení, dochází při ní ke zhušťování dřeva, ale ve finální fázi nevzniká úplné porušení tělesa (Matovič 1993).



Obr. 18 Pracovní diagramy pevnosti v tlaku napříč vláken (Gandelová a Horáček 2012)
a) třífázová deformace b) jednofázová deformace

1.3.2.3.2 Pevnost termicky upraveného dřeva v tlaku

Pevnostní vlastnosti se vlivem vysokých teplot příliš nemění. Tlaková pevnost podél vláken se u termicky upraveného dřeva může i zvýšit. Tento jev byl zkoumán a zdokumentován ve výzkumném středisku VTT ve Finsku na vzorcích smrku, které byly vystavené teplotě 220°C po dobu 1–3 hodiny (obr. 19). Průběh deformací termicky upraveného dřeva se při zatížení tlakem, lišil od dřeva, které bylo sušené v sušárnách. Při maximálním zatížení se termicky upravené dřevo rozpadlo na několik kusů, to upozorňuje na jeho zvýšenou křehkost (Reinprecht a Vidholdová 2008).



Obr. 19 Pevnost v tlaku termicky upraveného smrkového dřeva při teplotách 220°C a 225°C po dobu 1–3 hodin (ThermoWood Handbook 2003)

1.3.2.4 Pevnost dřeva v ohybu

Díky poměrně vysoké ohybové pevnosti se dřevo používá na konstrukční prvky, které jsou namáhány na ohyb. Pro výpočet ohybové pevnosti dřeva využíváme zjednodušený vzorec, který předpokládá lineární průběh napětí až do meze pevnosti předem určeného vzorku. Stanovení reálného průběhu napětí během ohybu je pro praktické záměry velice složité. Maximální napětí v povrchových vrstvách je vyjádřeno Navierovým vzorcem:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [Pa] \quad (5)$$

kde:

F – působící síla [N],

l_0 – vzdálenost mezi podpěrami [m],

h – výška [m],

b – šířka nosníku [m].

Předpokladem pro využití vzorce je, že máme umístěný nosník na dvou podpěrách, v jehož středu působí síla F (Gandelová a Horáček 2012; Požgaj *et al.* 1993).

Pokud vezmeme v potaz průběh dřevních vláken, můžeme pevnost dřeva v ohybu rozčlenit do tří skupin. Jedná se o:

- pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působí napříč vláken v radiálním anebo v tangenciálním směru;
- pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, kdy příčný řez je orientován ve směru působící síly;
- pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, kdy příčný řez je orientován kolmo k působící síle.

Zpravidla se sleduje a využívá pevnost v ohybu s průběhem vláken rovnoběžně s osou tělesa, další dvě možnosti se vzhledem k rozměrům trámů a výrazně nižší pevnosti neuvažují (Požgaj *et.al.*, 1993).

Zkoušení těles se většinou provádí v tangenciálním směru se zatížením, které působí kolmo na vlákna. U jehličnatých dřevin je pevnost v tangenciálním a radiálním směru rozdílná, u tangenciálního ohybu je o 10-12% větší. U dřevin listnatých je v obou směrech ohybová pevnost v podstatě totožná (Gandelová a Horáček 2012).

1.3.2.4.1 Faktory ovlivňují pevnost dřeva

Všeobecně lze při zhodnocení změn vlastností dřeva prohlásit, že se zvyšující se vlhkostí do meze hygroskopicity se pevnostní a pružnostní atributy snižují. Souvislost mezi pevností a obsahem vody vázané ve dřevě má nelineární průběh. Pokud se změní vlhkost o 1% v rámci vody vázané, způsobí to změnu pevnosti dřeva průměrně o 3-4%, až na výjimku, kterou je pevnost v tahu (Gandelová a Horáček 2012).

Hodnocení závislosti mezi hustotou a mechanickými vlastnosti dřeva je komplikované, jelikož hustota je také závislá na anatomické stavbě. Pokud posuzujeme vliv hustoty na mechanické vlastnosti, vyřazujeme vliv vody přepočtem na 12% nebo 0% vlhkost. V zásadě lze říct, že jestliže se zvyšuje hustota, pevnost dřeva též vzrůstá (Gandelová a Horáček 2012).

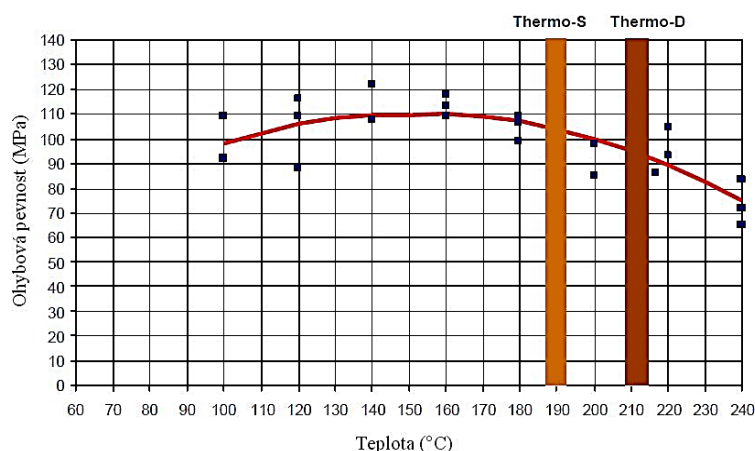
Mechanické vlastnosti jsou ovlivňovány také během různých technologických procesů, kde je dřevo teplotně upravováno, mezi tyto procesy patří například sušení, lisování nebo plastifikace. Zvyšováním teploty jak pružnost, tak i pevnost dřeva klesá. Nárůst teplot do 70°C snižuje pevnost a pružnost dřeva jen dočasně. Vliv vyšších teplot nad 100°C má za následek vznik trvalých změn ve dřevě. Působením teplot překračující hodnotu 200°C, přichází pyrolýza dřeva, a to se stává křehkým. Ovlivněna vysokými teplotami je zejména rázová houževnatost dřeva v ohybu. Účinek teploty na

mechanické vlastnosti se proměňuje s vlhkostí. Zvýšením teploty a vlhkosti se pevnost dřeva významně snižuje. Zatímco vzájemné působení obou činitelů snižuje pevnost více, než když každý faktor působí samostatně (Gandelová a Horáček 2012).

1.3.2.4.2 Ohybová pevnost termicky upraveného dřeva

Změny ohybové pevnosti jsou závislé na dřevině a jejím druhu a též na způsobu úpravy. Při teplotě 155°C po dobu 3 dnů klesne ohybová pevnost dřeva o 20%, při teplotě 135°C přibližně za 14 dní, nebo při teplotě 115°C cca za 15 týdnů. Pokud dřevo upravujeme při teplotě 220°C po dobu 5 hodin, s využitím etap předohřevu a ochlazení v souhrnném čase po 4 dny, sníží se pevnost dřeva v ohybu výrazně až o 50%. Velikost poklesu ohybové pevnosti u termodřeva vyráběného průmyslově je běžně udávána od 5% do 30%, to platí zejména pro PlatoWood, ale také pro ThermoWood, tento pokles může být však někdy i vyšší. Změny ohybové pevnosti v závislosti na tepelné úpravě u borového dřeva jsou zobrazeny v obr. 20 (Reinprecht a Vidholdová 2008); ThermoWood Handbook 2003).

Studii bylo dokázáno, že pokud se dřevo vystavuje nižším teplotám, ohybová pevnost mírně narůstá, k prudkému poklesu dochází po zvýšení teploty při úpravě a delším času termické úpravy. To, jak hodnoty ohybové pevnosti klesnou nebo naopak vzrostou, záleží na okolnostech úpravy. Zkoumáním je odůvodněno, že pokud se dřevo upravuje v atmosféře vzduchu, dochází vůči jeho modifikaci v inertní atmosféře dusíku ke zhoršení. Modifikaci v prostředí vzduchu se dřevo stává křehčí. Úbytek hodnot ohybové pevnosti je zapříčiněn vytvořením kyseliny uhličité během termické modifikace, která napomáhá hydrolýze karbonátových polymerů (Kocafe 2008).



Obr. 20 Změna ohybové pevnosti borového dřeva v závislosti na teplotě úpravy (ThermoWood Handbook, 2003)

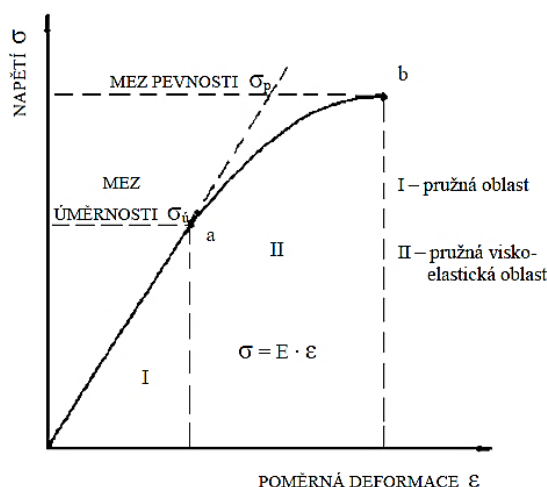
1.3.2.5 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva obecně popisujeme jako schopnost nabýt původních rozměrů a tvaru po uvolnění vnějších sil. Z pohledu fyzikálního je to stav, kdy jsou změny mezi atomovými vzdálenostmi vratné. To znamená, že pokud se odstraní vnější síly, atomy se navrátí do svých rovnovážných vzdáleností. Pružnost je možno popsat na základě individuálních parametrů pracovního diagramu, Poissonova čísla, modulu pružnosti, energií pružné deformace a mezí úměrnosti (Požgaj *et al.* 1993).

Modulem pružnosti nazýváme vnitřní odpor určitého materiálu vůči pružnému přetvoření. Platí, že čím je větší modul pružnosti, tím větší napětí je nutné k vyvolání deformací. Čím je látka poddajnější, tím je menší modul pružnosti. Modul pružnosti je tedy ukazatelem tuhosti. Jestliže zjišťujeme modul pružnosti, na těleso působíme silami jen do meze úměrnosti, aby se neporušila struktura dřeva a deformace se tedy po uvolnění síly dostaly zpátky do původní polohy. Modul pružnosti znázorňuje poměr mezi velikostí pružné deformace a zatížením. Je tedy možné konstatovat, že čím větší je modul pružnosti, tím menší je průhyb nosníku a jeho tvarové přeměny (Gandelová a Horáček 2012; Požgaj *et al.* 1993; Lexa *et al.* 1952, Dřevařská technická příručka, 1970).

1.3.2.5.1 Pracovní diagram

Moduly pružnosti je možno stanovit jen experimentálně, jelikož pro mnoho materiálů doposud neexistují jejich teoreticky vyvozené rovnice. Často jsou tyto veličiny zkoumány na zkušebních strojích, které zároveň měří deformaci a působící silové zatížení. Empirická křivka, jež popisuje vztah mezi napětím a deformací, se nazývá pracovním diagramem (obr. 21) (Gandelová a Horáček 2012).



Obr. 21 Obecný tvar pracovního diagramu (Gandelová a Horáček 2012)

Diagram dřeva napětí-deformace (obr. 21) lze rozčlenit do dvou částí. Část lineární, která dosahuje po mez úměrnosti σ_u , a nelineární část, která sahá od meze úměrnosti až po mez pevnosti σ_p . Mez úměrnosti je určena jako napětí, kdy v tělese vznikají jen deformace pružné, eventuálně pružné v čase, a napětí je v tělese rozvrženo rovnoměrně. Tyto deformace po skončení silových účinků úplně zanikají a těleso se navrácí do původního stavu. Pokud vzrůstá napětí nad mez úměrnosti, deformace více rostou, napětí však není v tělese rozloženo rovnoměrně. Tyto deformace nazýváme jako plastické, nejsou přímo úměrné napětí a pokud přestaneme silově působit na těleso, vnější síly nezanikají. K porušení tělesa nakonec dochází při napětí, které označujeme jako mez pevnosti. To je tedy největší hodnota napětí, kterou dřevo vydrží bez narušení jednolitosti tělesa (Gandelová a Horáček 2012).

1.3.2.5.2 Modul pružnosti ve statickém ohybu

V ohybu se zkouší ve skutečnosti jen modul pružnosti kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Vyvození modulu pružnosti v ohybu vzniká z normálového namáhání tělesa, které je způsobeno ohybovým momentem. Pokud zatěžíme dřevěný nosník, konkávní strana je namáhána tlakem, strana konvexní tahem. Neutrální osa je zhruba uprostřed tělesa nezatížena. Pro výpočet modulu pružnosti v ohybu s průřezem pravoúhlého nosníku zatíženého uprostřed využíváme rovnici:

$$E_L = \frac{F \cdot l_0^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta y} \quad [MPa] \quad (6)$$

kde:

F – působící síla [N],

l_0 – vzdálenost podpěr [mm],

b – šířka zkušební tělesa [mm],

h – výška zkušební tělesa [mm],

Δy – průhyb tělesa [mm].

(Gandelová a Horáček 2012).

1.3.2.5.3 Dynamický modul pružnosti

O dřevu je všeobecně známo, že má velmi dobré akustické vlastnosti. Zvuk v prostředí se roznáší rychlostí, jež je ovlivněna materiálem, teplotou prostředí a vlhkostí (Požgaj *et al.* 1993). Z následujícího vzorce můžeme stanovit rychlost šíření zvuku ve dřevě:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (7)$$

kde:

E – Youngův modul pružnosti [Mpa],

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

Se stoupající vlhkostí rychlost šíření zvuku ve dřevě klesá. Dále je to též ovlivněno druhem dřeviny (Gandelová a Horáček 2012).

Jestliže upravíme vzorec, můžeme vypočítat z naměřených hodnot rychlosti šíření zvuku ve dřeva a z jeho hustoty modul pružnosti (Gandelová a Horáček 2012).

$$E = c^2 \cdot \rho \quad [MPa] \quad (8)$$

1.3.2.5.4 Faktory ovlivňující moduly pružnosti

Kladnou lineární závislost vytváří s moduly pružnosti hustota dřeva. Nejvíce znatelný je její vliv u vysušeného dřeva, pokud vlhkost vzroste nad mez hygroscopicity, vliv hustoty tak znatelný již není. Jestliže se zvýší vlhkost o 1% pod bod nasycení vláken, statický modul pružnosti klesne zhruba o 2% (Gandelová a Horáček 2012; Dřevařská technická příručka, 1970).

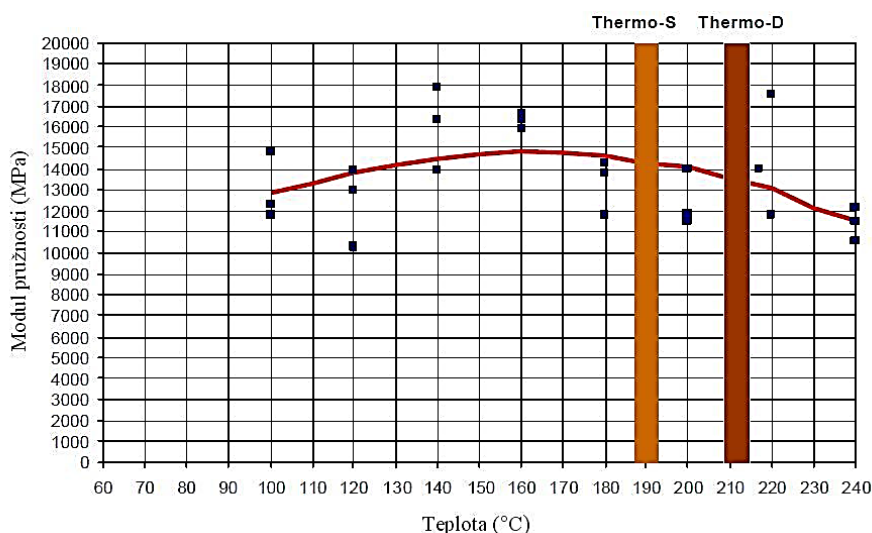
1.3.2.5.5 Vztah mezi pevností v ohybu a modulem pružnosti ve statickém ohybu

Vzhledem k aplikacím řeziva v dřevěných konstrukcích se pro posuzování jakosti dřeva využívá právě ohybová metoda. Na stanoveném zkušebním tělese, které je bez vad, je souvislost mezi pevností v ohybu a modulem pružnosti velice těsná. Korelační koeficient a jeho vysoké hodnoty ukazují, že se zvyšující se pevností dřeva v ohybu vzrůstá i jeho modul pružnosti. U dřeva je možné v podstatě určit modul pružnosti dřeva, u jehož určení dochází pouze k pružným deformacím a na základě přímé závislosti

mezi pevností v ohybu a modulem pružnosti určit i jeho ohybovou pevnost. S velkou korelační závislostí lze zmíněná metoda využít i na náhodně zvolená tělesa, která mají velký rozměr a chyby (Požgaj *et al.* 1993).

1.3.2.5.6 Modul pružnosti termicky upraveného dřeva

Pokud se dřevo vystavuje kratší době ohřevu při teplotách do 160°C, modul pružnosti se zvětšuje. Pokles byl zaznamenán tehdy, jestliže došlo k patrnému úbytku hmotnosti dřeva nad hodnotu 6–8%. Zvyšováním teploty nad 160–190°C se modul pružnosti snižuje, a to i během kratší doby ohřevu, klesá však mírněji než pevnost dřeva. Studiemi, které provedl Kubojima a kol. (2000) bylo zjištěno, že při ohřevu dřeva na 160°C v přítomnosti kyslíku v běžné atmosféře modul pružnosti postupně klesá, a to v závislosti na době ohřevu. Dále bylo testy ukázáno, že v atmosféře čistého dusíku se hodnoty modulu pružnosti nejdříve nepatrně zvýšily a poté byly víceméně neměnné (Reinprecht a Vidholdová 2008).



Obr. 22 Modul pružnosti a jeho změny u borovicového dřeva při tepelné úpravě 60–240°C (ThermoWood Handbook, 2003)

1.3.3 Trvanlivost tepelně upraveného dřeva

Termická modifikace dřeva prostupuje skrz celý materiál a je stálá. Trvanlivost prezentuje odolnost vůči povětrnostním podmínkám, dřevokazným houbám, plísním a hmyzu, dalším biologickým škůdcům, a ještě do této kategorie zařazujeme rezistenci proti mechanickému opotřebení a požáru. V první řadě jde o eliminaci vstupu vody do dřeva a s tím související zmenšení nebo zabránění případného poškození a napadení. Termicky modifikované dřevo je charakteristické svou dlouhou životností, což pokládáno za jednu

z jeho nepochybných předností (Reinprecht a Vidholdová 2008; ThermoWood Handbook 2003).

1.3.3.1 Biologická odolnost

Na zlepšení biologické odolnosti termodřeva má svůj podíl změna chemické struktury. Významné zlepšení bylo zaznamenáno v rozmezí teplot 150-230°C. Změny, které mají podíl na zvýšení biologické odolnosti, jsou například funkční-OH skupiny a jejich množstevní pokles, zvýšení hydrofobnosti dřeva, pokles sorpčních schopností dřeva a tím následná nižší vlhkost pro škůdce. Tepelně upravené dřevo dosahuje lepší odolnosti vůči houbám a hmyzu. Jestliže upravujeme netrvanlivé nebo méně trvanlivé dřeviny, získáme dřeviny, které jsou středně až velmi trvanlivé. Obecně můžeme prohlásit, že dřeviny, které jsou termicky upravené, mají vyšší odolnost proti ligninovorným a celulózovorným houbám. Vůči plísním a dřevozbarvujícím houbám toto zlepšení není úplně jednoznačné. Podstatné je, že odolnost termicky upraveného dřeva vůči termitům může být nižší než u dřeva rostlého. Všeobecně můžeme prohlásit, že všechny tepelné úpravy dřeva zvýšily jeho trvanlivost, to však závisí na druhu dřeva, době trvání procesu tepelné úpravy a teplotě zpracování (Reinprecht a Vidholdová 2008; Mayes a Oksanen 2003).

1.3.3.2 Povětrnostní odolnost

Odolnost termicky modifikovaného dřeva proti povětrnostním působení, jakými jsou například sluneční záření, voda, kyslík, emise, vítr apod., závisí na podmínkách jejich výroby, a to zejména na teplotě a času. Všeobecně platí, že termicky upravené dřevo je proti těmto vlivům odolnější, čím je vyšší teplotní úprava, tím větší je odolnost. Takto upravené dřevo má vzhledem k hygroskopicitě nižší vlhkost ve srovnání se dřevem rostlým za stejných expozičních podmínek. Při vystavení termicky upraveného dřeva povětrnostním podmínkám, barva bledne a šedne. Díky nižší rovnovážné vlhkosti a lepší rozměrové stabilitě se na povrchu termodřeva tvoří trhlin méně trhlin oproti dřevu, které tepelnou úpravou neprošlo (Reinprecht 2008; Tiralová, 2004).

1.3.3.3 Protipožární odolnost

Jestliže porovnáme termicky upravené dřevo se dřevem neupraveným, z hlediska požární odolnosti výrazné změny nepozorujeme. Termicky modifikované

dřevo tvoří při hoření méně dýmu než dřevo rostlé. Termicky upravené dřevo lze spálit nebo zlikvidovat běžným způsobem, jako běžný odpad (Reinprecht a Vidholdová 2008).

2 Technologie výroby termicky upraveného dřeva

Tepelně upravené dřevo nazýváme „Termodřevo“. Zájem o takto upravená dřeva v posledních letech výrazně narůstá. To je zapříčiněno především snížením produkce dřevní suroviny, která by byla trvanlivá, navýšeným zájmem po trvanlivém materiálu pro stavební účely a v neposlední řadě fakt, týkající se legislativních změn, které zamezují využívání toxických látek. K nejintenzivnějšímu a nejkomplexnějšímu zkoumání termické modifikace došlo ve Finsku, poté byla výroba zavedena i oblastech západní Evropy.

Během termické úpravy je dřevo vystavováno vysokým teplotám. Důsledkem vysokých teplot dochází ke zlepšení vlastností upravovaného dřeva, a to především odolnosti vůči vodě a biologickým škůdcům. Dochází však i ke zhoršení některých vlastností, například ohybové pevnosti dřeva. Účinkem zvýšených teplot dochází ve struktuře dřeva ke změnám. Tyto změny se projevují poté ve vlastnostech upravovaného dřeva. K výraznějším změnám dochází při teplotách 180-280°C, které působí po dobu 15 minut až 24 hodin. Na výrobu termicky upraveného dřeva se používají různé druhy dřevin a různé technologické podmínky. Tyto podmínky jsou závislé na použité dřevině a konečném způsobu aplikace upraveného dřeva.

Mezi výhody, které dřevo získává tepelnou úpravou, patří rozhodně jeho ekologičnost, jelikož při výrobě se nevyužívají žádné chemikálie, dřevo získává zvýšenou trvanlivost a je vhodné pro využití jak v interiéru, tak v exteriéru. V interiéru se často využívá pro obklady, podlahy, sauny. V exteriéru je vhodný a stále oblíbenější pro obklady venkovních fasád, oplocení, které není ve styku s terénem, protihlukové bariéry apod. (ThermoWood Handbook 2003; Reinprecht a Vidholdová 2008; Kačíková a Kačík 2011).

2.1.1 Materiál na výrobu termicky upraveného dřeva

Na termickou úpravu můžeme využít téměř všechny dřeviny. Mezi nejpoužívanější a nejvhodnější dřeviny na tepelné zpracování patří hlavně jehličnaté dřeviny – borovice (*Pinus Silvestris*) a smrk (*Picea Abies*), v menším zastoupení i listnaté dřeviny – bříza (*Betula Verrucosa/Pubescens*) a osika (*Populus Tremula*). Tepelně upravovat lze i několik druhů dřeva tvrdého jako je například buk, dub, jasan. Díky odlišnému chemickému složení a buněčné struktuře se tepelné zpracování často liší, a proto je konečný výsledek vždy jiný. Kvalita dřeva, které je využíváno pro tepelné ošetření, by

ovšem měla být dobrá. Problém mohou působit suky, které mohou po vysušení vypadnout, shnilé dřevo může způsobit odlišnosti v barevnosti. Měkké dřeviny jsou upravovány intenzivnější tepelnou úpravou a využívány například pro venkovní konstrukce. Tvrdé dřeviny upravujeme mírněji, obvykle je u těchto dřev nejdůležitější získaná barva a dobrá kvalita povrchu, jejich využití je tedy vhodné do interiéru (Syrjänen a Oy 2001; Reinprecht a Vidholdová 2008).

2.2 Principy technologií výroby termicky upraveného dřeva

Pod pojmem tepelná úprava dřeva rozumíme úmyslný výrobní proces, kterým se upravuje struktura dřeva díky vlivu zvýšených teplot. Záměrem těchto úprav je zlepšení odolnosti proti vodě a biologickým škůdcům. Upravovat pomocí zvýšených teplot můžeme jak dřeva sušená vzduchem, tak i mokrá (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

V současné době se v Evropě těší největšímu obchodnímu zájmu několik různých modifikačních metod a to:

- ThermoWood – příprava v atmosféře vzduchu
- PlatoWood – příprava v prostředí vodní páry
- OHT – Oil Heat Treatment Wood a RoyalWood – příprava v olejích
- Le Bois Perdure a RetificatedWood – příprava v prostředích inertních plynů (Reinprecht a Vidholdová 2008).

2.2.1 ThermoWood®

ThermoWood řadíme do skupiny termicky upravených dřev, které jsou připravované v atmosféře vzduchu. Výrobní postup byl rozvinut ve VTT výzkumném centru ve Finsku a průmyslová výroba začala na počátku 90. let 20. století s patentovaným názvem ThermoWood®, je to registrovaná ochranná známka, kterou mohou využívat jen členové Finnish ThermoWood Association. Úkolem této asociace je především kontrola kvality materiálů označeným ThermoWood, ty se vyrábí různých částích světa, ve Finsku, Rakousku, Kanadě, Estonsku a jinde (Hill 2006; www.thermowood.fi).

Díky vlastnostem a vzhledu, který ThermoWood dřevo získalo tepelným ošetřením, může být využito jak pro interiérové aplikace, tak i exteriérové. Nedoporučuje se ThermoWood dřevo využívat v základových podzemních použitích, kde je nutností konstrukční pevnost, a také tam, kde by bylo dřevo ve stálém přímém kontaktu s vlhkou půdou. Tepelné zpracování významně vylepšuje biologickou odolnost evropského

dřeva, všechny tyto zdokonalené vlastnosti prodlužují trvanlivost a ThermoWood dřevo se tak může rovnat úrovni tropických dřevin. Ztrátou barvy však trpí jak dřeviny tropické, tak i tepelně upravené evropské dřevo (Viikari a Mayes 2009).

2.2.1.1 Výroba ThermoWood dřeva

Celý proces výroby tvoří souvislý řetězec dějů, od sušení až po finální zvlhčování (obr. 23). Dřevo musí projít šesti kroky úprav výrobního procesu. Teploty během úpravy se pohybují v intervalu mezi 160 až 240°C. Výrobním mechanismem je dlouhý tunel, který má šest oddělených komor, do kterých se řezivo dopravuje po kolejkách. V každé komoře probíhá jiná fáze tepelné úpravy. Výrobní proces můžeme rozčlenit do třech hlavních fází (Dornyak 2003).

1. fáze: zvýšení teploty a sušení

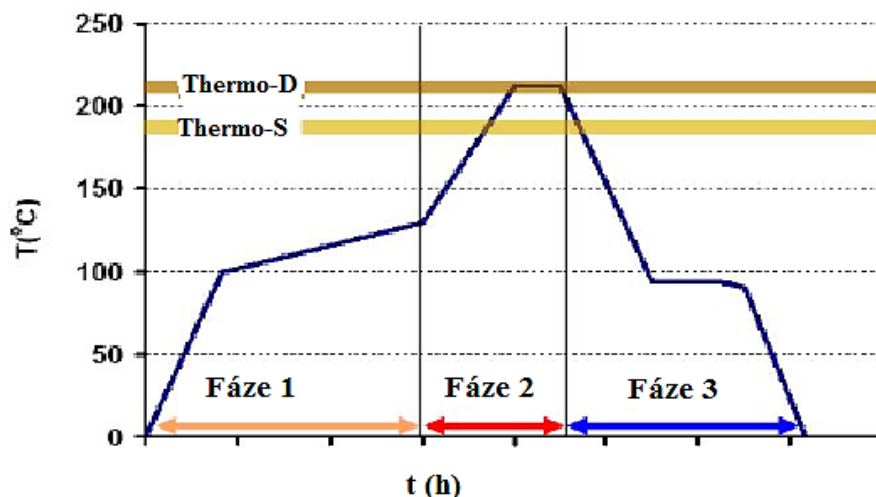
Tato fáze probíhá v prvních třech komorách a zabírá nejvíce času, uskutečňuje se zde sušení za působení vysokých teplot. Teplota se v sušárně zvýší prudce na 100°C za působení vodní páry, poté se zvýší postupně na 130°C. Vlhkost klesá téměř na nulové hodnoty. Délka sušení v této fázi závisí hlavně na počáteční vlhkosti dřeva, druhu dřeviny a jeho tloušťce.

2. fáze: tepelná úprava

V této fázi se již dřevo tepelně upravuje, a to uvnitř čtvrté komory, zde se teplota zvýší na teplotu v rozmezí 185°C až 230°C a to podle požadavků na výrobu klasifikační třídy, ty jsou rozděleny na dvě skupiny, a to Thermo-S nebo Thermo-D. Pokud je dosažena požadovaná teplota, zůstává tato teplota zachována po dobu 2-3 hodin.

3. fáze: chlazení a úprava vlhkosti

V průběhu celého procesu sušení a tepelného zpracování se používá jako ochrana pára. Pára chrání dřevo před vznícením a ovlivňuje chemické změny, které během úpravy ve dřeva nastávají. Úlohou posledních dvou komor v tunelu je finální normalizace, dřevo se postupně ochlazuje na 80-90°C. Důraz musí být kladen na vysoký teplotní rozdíl mezi upravovaným dřevem a venkovním vzduchem, ten by mohl být příčinou vzniku trhlin. Na závěr je tepelně upravené dřevo opět vlhčeno z důvodu dosažení příhodné vlhkosti před konečným využitím (ThermoWood Handbook 2003; Reinprecht a Vidholdová 2008; www.prokom.cz).



Obr. 23 Schéma výrobní technologie ThermoWood (ThermoWood Handbook 2003)

2.2.1.1.1 Klasifikace tepelných úprav ThermoWood

Uplatňuje se rozdělení, které zahrnuje dvě hlavní třídy, a to Thermo-S a Thermo-D samostatně pro dřeviny jehličnaté a listnaté. Tyto dvě kategorie se různí v jednotlivých technologických parametrech výroby – v čase, teplotě a jiných podmínkách. Ve výrobních statistikách převažuje výroba a prodej termodřeva třídy Thermo-D (ThermoWood Handbook 2003).

Thermo-D

Znakem D označujeme trvanlivost, pochází z anglického výrazu „durability“. Využití je zejména tam, kde je důležitá vysoká stabilita a odolnost, tedy pro aplikace v exteriéru, například na zahradní nábytek, obklady fasád atd. (ThermoWood Handbook 2003).

Thermo-S

Znakem S označujeme stabilitu, pochází z anglického výrazu „stability“. Využívá se tam, kde je vyžadována stabilita materiálu a vzhled, tedy pro aplikace v interiéru na interiérové konstrukční prvky, nábytek, podlahy, sauny atd. (ThermoWood Handbook 2003).

2.2.2 Plato®Wood

Tepelná úprava Plato byla vytvořena společností Shell v osmdesátých letech. První výrobní závod byl vystavěn v Holandsku v roce 2000 (Militz a Tjeerdsma 2001).

Výrobní technologie PlatoWood probíhá v prostředí vodní páry při zvýšeném i normálních tlaku za nižších teplot. Pro výrobu je využíváno čerstvé dřevo a je rozčleněna do čtyř fází. Doba tepelné úpravy je závislá na druhu dřeviny, tloušťce materiálu a celkových jeho rozměrech (Militz a Tjeerdsma 2001; Rapp 2001; Reinprecht a Vidholdová 2008).

PlatoWood dřevo je zbarveno do tmavě hnědých odstínů. Dřeviny upravené tímto způsobem mají o 0-10% vyšší modul pružnosti oproti neošetřeným dřevinám, nicméně hodnoty pevnosti v ohybu klesly o 5–20%. Nižší ztráta pevnosti oproti ostatním termickým úpravám je důsledkem mírnějších podmínek, které byly při úpravě Plato použity. Prostředí horké páry při výrobě dodává upravenému dřevu též lepší odolnost vůči hnilobám ve srovnání s dřevem tepelně nemodifikovaným. Nejčastěji se na výrobu PlatoWood dřeva využívá smrk, borovice, douglaska, bříza nebo topol. Využití je například na zahradní nábytek a aplikace, kde se žádá materiál s vysokou pevností a tuhostí (Hill 2006; Nuopponenn *et al.* 2004, Raggars 2007).

1. fáze:

Hydrotermolýza – vstupuje do ní čerstvé nebo vzduchem sušené dřevo. To se dále upravuje za zvýšeného tlaku a teplotě v rozmezí 150–190°C ve vlhkém prostředí. Jestliže se upravuje dřevo sušené vzduchem, k jeho úpravě se využívá vodní pára. Jestliže se upravuje dřevo čerstvé, používá se k úpravě horký vzduch.

2. fáze:

Sušení – probíhá v klasické sušárně po dobu 3-5 dní na přibližnou vlhkost 8-10%.

3. fáze:

Vytvrzování – v této fázi probíhá stabilizace dřeva při teplotě 150-190°C na dobu 12-16 hodin s omezeným přístupem vzduchu a vlhkost klesá pod 1%.

4. fáze:

Kondicionování – konečná fáze, probíhá opětovné zvlhčení v sušárně na vlhkost 4-6%. Trvání této fáze je v průměru kolem třech dnů (Reinprecht a Vidholdová 2008; Kačíková a Kačík 2011).

2.2.3 OHT-Wood

Výroba Oil Heat Treatment Wood se uskutečňuje v horkých rostlinných olejích, které mají teplotu okolo 200-220°C. Pomocí oleje se zamezuje přístupu kyslíku a dochází ke kvalitnímu ohřevu, nicméně díky němu narůstá hmotnost dřeva, a to až o 50-70%. Nejvíce se pro výrobu využívá olej lněný, řepkový nebo slunečnicový. Oleje podporují zlepšení fyzikálních a chemických vlastností, navíc jsou šetrné k životnímu prostředí. Nevýhodou u lněného oleje je jeho nepříjemný zápach, garantuje však rychlý a rovnoměrný transfer tepla. Výsledkem spojení tepla a olejů můžeme očekávat zlepšení vlastností dřeva ve srovnání se dřevem tepelně zpracovaným v plynné atmosféře. Zvyšuje se například odolnost dřeva vůči dřevokazným houbám. Při nižších tepelných úpravách získává ošetřené dřevo světle hnědou barvu, při vyšších teplotách ošetření se dřevo zbarvuje do tmavě hnědé barvy. Vstřebání oleje v kombinaci s vysokými teplotami přispívá k delší trvanlivosti upraveného dřeva. Využití PlatoWood dřevo nachází především u zahradního nábytku, pro paluby lodí, oplocení, obložení atd. (Hill 2006; Reinprecht a Vidholdová 2008; Rapp a Sailer 2001; Kačíková a Kačík 2011).

2.2.4 Le Bois Perdure

Výrobní technologie obsahuje ošetření dřeva v nasycené atmosféře vodní páry v kombinaci s vysokou teplotou. V tomto procesu je obsaženo sušení a poté následuje ohřev dřeva na teplotu v intervalu od 200°C do 230°C v atmosféře vodní páry. Touto metodou se zvyšují molekulární vazby dřeva a tím se vylepšují fyzikálně-mechanické vlastnosti. Výrobní proces zahrnuje tři fáze. První fáze má za úkol odstranit ze dřeva vodu volnou. Druhá fáze odstraňuje vodu vázanou, v třetí fázi nastává makromolekulární modifikace dřeva. Dřevo upravené technologií Le Bois Perdure získává stejné vlastnosti jako dřevo, které bylo upraveno technologií RetificatedWood (Hill 2006; Navi a Sandberg 2012).

2.2.5 RetificatedWood

Tento proces úpravy byl vyvinut ve Francii. Průmyslová výroba byla zahájena v roce 1995. Technologie úprav probíhá zahřátím dřeva v prostředí dusíku na teploty v intervalu od 180°C do 260°C. Díky tomu, že ve dřevě probíhají méně termooxidační reakce, zachovává si dřevo svou původní pevnost. Nutností před počátkem úpravy je

předsušení dřeva na vlhkost 12 % (Hill 2006; Reinprecht a Vidholdová 2008; Vernois 2001).

3 Popis dřevin použitých pro výzkum

3.1 Smrk (*Picea abies* L.)

Smrk patří mezi nejvýznamnější hospodářské dřeviny ve střední a severní Evropě. Dorůstá do výšky až 50 metrů. Mezi nejkvalitnější patří smrky pocházející z nejseverněji situovaných oblastí. Z jehličnatých dřevin má v České republice nejčetnější plošné zastoupení. Dřevo smrku se řadí mezi měkká a lehká dřeva, dobře se suší, opracovává, ale je méně trvanlivé. Tento druh dřeva se u nás zařazuje k nejdůležitějším průmyslově zpracovávaným a užitkovým dřevinám. Jedná se o univerzální dřevo, jeho výhodami je rozmanitost produktového využití. Ze smrkového dřeva se získává hlavně řezivo, papír, palivo, uplatňuje se ale také hojně v truhlářské výrobě a stavebnictví (Musil a Hamerník 2007; Walker 2009)

3.1.1 Dendrologický popis smrku

Smrk je vždyzelený jednodomý strom, který má vzpřímenou stavbu výhonů a přeslenité větvení. Jedná se o světlomilnou dřevinu. Snáší dobře nadbytečnou vlhkost, naopak pokud nemá dostatek vláhy, je to pro smrk limitujícím faktorem dobrého růstu (Musil a Hamerník 2007; Úředníček *et al.* 2009).

Smrk vyrůstá do velkých rozměrů, má průběžný přímý kmen, větvení je pravidelné a přeslenité. Stáří může být až 350-400 let a výška smrku může dosahovat až 50 metrů s průměrem kmene až 1,5 metru. Dřevo smrku je zbarveno od bílé až po světle žlutohnědou s přirozeným leskem. Letokruhy jsou na příčném řezu dobře viditelné. Zřetelné jsou pryskyřičné kanálky, a to zejména na podélných řezech dřeva (Walker 2009).

3.1.2 Stavba dřeva smrku

3.1.2.1 Makroskopická stavba dřeva smrku

Smrk má bělové dřevo a barvu žlutobílou až světle hnědou. Přejod z jarního do letního dřeva je pozvolný, letokruhy jsou dobře viditelné. Pryskyřičné kanálky můžeme pozorovat na radiálním a tangenciálním řezu. Smrk spadá do skupiny lehkých dřev s nízkou hustotou do $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U smrku ztepilého (*Picea Abies*) se udává hustota $420 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. I když je to dřevo měkké, je smrkové dřevo houževnaté a relativně pevné a pružné. Méně odolné je proti biotickým činitelům, a není tedy tak trvanlivé. Dobře se suší a opracovává, huře se však impregnuje (Gandelová a Horáček 2008).

3.1.2.2 Mikroskopická stavba dřeva smrku

Smrkové dřevo je charakteristické četnými pryskyřičnými kanálky. Ty jsou viditelné na příčném a tangenciálním řezu. Dřeňové paprsky jsou jednořadé i vícevrstevnaté a po své délce mají uvnitř pryskyřičný kanálek. Výskyt podélného dřevního parenchymu je velmi ojedinělý nebo zcela chybí. Dřeňové paprsky jsou heterocelulárního charakteru. Obvodové tracheidy u dřeňových paprsků obsahují dvojtečky, ty jsou drobnější a mají šikmý štěrbinový pór, buňky nemají pryskyřice a stěny jsou víceméně bezbarvé (Klika a Černoorský 1953;).

3.2 Dub (*Quercus robur L.*)

Dub společně s bukem patří mezi listnaté dřeviny, které mají na našem území největší zastoupení. Dub patří mezi celosvětově nejoblíbenější druh dřeva, je ideálním materiálem například pro výrobu nábytku. Využití nachází též při stavbě člunů, konstrukci vozidel, pro podlahovou krytinu a také pro kvalitní truhlářské výrobky. Výborným materiálem je pro sochařinu a řezbářství a také na výrobu pevných sudů pro uchovávání whisky. Dalším využitím dubu je zpracování na dekorativní dýhy (Úřadníček a Chmelař 1995; <http://prace-se-drevem.spibi.cz>).

3.2.1 Dendrologický popis dubu

Dub je listnatý strom velkých rozměrů se silným kmenem a košatou korunou, dosahující do výšky až 40 metrů, průměr kmene 1,5 m a dožívá se 400–500 let, často křivolakého vzrůstu. Koruna je poměrně vysoko klenutá a široká. Listy dubů jsou opadavé nebo vřdyzelené. Dub je druhově bohatý rod s nejméně 200 druhy. Dub je rozšířen v teplejších oblastech severní polokoule. V Americe sahá výskyt až na jih Kolumbie, z Evropy do severní Afriky, v Asii k jihu až na Malajský poloostrov. (Úřadníček a Chmelař 1995).

3.2.2 Stavba dřeva dubu

3.2.2.1 Makroskopická stavba dřeva dubu

Dubové dřevo se řadí mezi jádrové dřeviny. Dřevo dubu má zřetelně rozlišitelné jádro a běl, běl je úzká 1-3 cm nažloutlé barvy, jádro světle hnědé až tmavě hnědé. Patří do skupiny listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou, kde je hranice mezi letokruhy

zřetelná, stejně tak i hranice mezi jarním a letním dřevem. Makropóry neboli široké jarní cévy vytváří v zóně jarního dřeva patrné póry a na podélných řezech patrné hluboké rýhy. Mikropóry neboli úzké letní cévy vytváří na příčném řezu v zóně letního dřeva světlé radiální pásy – radiální seskupení cév. Dřeňové paprsky jsou zřejmé na všech řezech, v příčném řezu vytváří viditelné pásy, které jsou kolmé k letokruhům, na radiálním řezu představují zakřivená lesklá zrcátka a na řezu tangenciálním tmavé pásy, které mohou být vysoké až několik centimetrů. Díky vysokému obsahu tříslovin se dub řadí mezi naše nejtrvanlivější dřeviny (Šlezingerová a Gandelová 2004).

3.2.2.2 Mikroskopická stavba dřeva dubu

Dřevo dubu patří do listnatých dřev s kruhovitě pórovitou stavbou. Jarní cévy se vyskytují převážně jednotlivě, na rozdíl od cév letních, které jsou často uspořádány v typickém radiálním seskupení. Lumeny cév jsou často zaplněny thylami, perforace mezi cévními články jsou jednoduché. Dřeňové paprsky dubu jsou homogenní jednovrstevnaté anebo mnohvrstevnaté (Šlezingerová a Gandelová 1999).

3.3 Teak (*Tectona grandis* Linn)

V současné době je teak jednou z nejlepších a nejcennějších dřevin v celosvětovém měřítku, jeho jedinečnost spočívá ve spojení veškerých kvalitních vlastností, které jsou u dřeva požadovány. Má velice dobrou trvanlivost vůči povětrnostním podmínkám, což lze přisuzovat vysokému obsahu olejnatých pryskyřic. Díky tomu je dřevo na dotek mastné a to natolik, že kovové spojovací prvky například hřebíky v něm nerezaví. Další pozitivní vlastností je naprostá odolnost vůči plísním, hnilobě a hmyzu. Také velice málo nabobtnává a sesychá, tudíž je vhodný pro stavbu lodí a stavební dílce, které mají vysoké nároky na tvarovou stálost. Teakové dřevo oplývá vysokou tvrdostí, v poměru k hmotnosti je teak relativně pevný a dá se ohýbat, zároveň je však křehký. V současné době je však teak hojně využíván na výrobu zahradního nábytku a také na zahradní architekturu, jako jsou například přemostění přes jezírka apod. Nevýhodou teakového dřeva je otupování pracovních nástrojů a dále jeho vysoká cena, kdy se cena za 1 m³ dostává nad 150 000 Kč. Cena stále stoupá, jelikož poptávka převyšuje nabídku (Wagenführ 2002; <http://www.arakolin.cz>; <https://www.bamboodesign.cz>).

3.3.1 Dendrologický popis teaku

Teak (*Tectona Grandis*) je tropický strom, který pochází z čeledi hluchavkovité. Štíhlý, rychle rostoucí poloopadavý strom, má přímý kmen vysoký 20-40 metrů. Listy a kůra jsou známé vysokým obsahem červených pigmentů, ty jsou využívány pro barvení textilií. Teakové dřevo se vyskytuje v jižní a jihovýchodní Asii, Indii, Indonésii, ale také v Thajsku, Barmě, Laosu, Nigérii, Malajsii, Hondurasu a také v Brazílii. Roste převážně v monzunových opadavých a poloopadavých lesích v poloze od 400 do 800 metrů nad mořem, nalézt jej však můžeme i jednotlivě v polohách až 1400 metrů nad mořem. Teakové dřevo se pěstuje i na plantážích, nicméně plantážové dřevo nemá tak dobrou trvanlivost (Wagenführ 2002; <http://www.arakolin.cz>; <https://www.bamboodesign.cz>).

3.3.2 Stavba dřeva teaku

3.3.2.1 Makroskopická stavba dřeva teaku

Dřevo teaku je známo svými příjemnými barvami a trvanlivostí. Jádro teaku je zbarveno od žlutohnědé po tmavě hnědé odstíny, častý je výskyt tmavě barevných pruhů. Tyto pigmentové zóny s věkem slábnou. Jádro je od běle velice dobře odlišitelné. Běl je bělavá až šedá, široká 1-3 cm. V teakovém dřevu se nachází tmavé hnědočerné žilkování, cca 2–8 mm Dřevo má hrubou texturu, obvykle je rovnoláknitá, vlivem uspořádání cév a žilkování na tangenciálním řezu fládrovaná, na radiálním řezu pruhovaná. Dřevo teaku na svém povrchu vykazuje mastný pocit. Čerstvě nařezané dřevo má mírný lehce nepříjemný zápach po kůži. Teak spadá do skupiny středně těžkých až těžkých dřev, hustota se pohybuje v rozmezí 480-860 kg.m⁻³. Pevnost v ohybu je udávána nad 135 MPa (Wagenführ 2002; <http://www.arakolin.cz>; <http://ldf.mendelu.cz>).

3.3.2.2 Mikroskopická stavba dřeva teaku

Teak patří svou stavbou do skupiny dřevin polokruhovitě až kruhovitě pórovitých. Cévy jsou viditelné na radiálním řezu jako zřetelné rýhy. Stejně tak jsou na radiálním řezu viditelné dřeňové paprsky, které jsou homogenní, občas heterogenní (Wagenführ 2002; <http://ldf.mendelu.cz>; <http://www.arakolin.cz>).

4 Metodika práce

Na základě cíle diplomové práce je možné metodiku rozdělit do následujících bodů:

1. Příprava zkušebních těles.
2. Značení zkušebních těles.
3. Měření.
4. Vyhodnocování naměřených dat.
5. Statistická analýza.

Metodika byla zaměřená na sledování vlivu stupně termické modifikace ($T=20^{\circ}\text{C}$, $T=160^{\circ}\text{C}$, $T=180^{\circ}\text{C}$, $T=210^{\circ}\text{C}$) na sledované charakteristiky:

1. Sledovanými fyzikálními charakteristikami byly:

- 1.1 Účinek termické úpravy na barevné změny.
- 1.2 Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasáklivost a hustotu dřeva během procesu nasákání

2. Sledovanými mechanickými charakteristikami byly:

- 2.1 Tvrdost podle Brinella (BH).
- 2.2 Mez pevnosti v tlaku (MPa).
 - 2.2.1 Podél vláken.
 - 2.2.2 Tangenciálním směrem.
 - 2.2.3 Radiálním směrem.
- 2.3 Rázová houževnatost (MPa).
- 2.4 Ohybové charakteristiky.
 - 2.4.1 Mez úměrnosti ve statickém ohybu.
 - 2.4.2 Mez pevnosti ve statickém ohybu.
 - 2.4.3 Modul pružnosti ve statickém ohybu.

Všechny experimenty byly provedené na třech dřevinách a to:

- Smrk ztepilý (*Picea Abies L.*) – pocházející z oblasti Poľana – Slovensko
- Dub letní (*Quercus robur F.*) – pocházející z oblasti Poľana – Slovensko
- Teak (*Tectona Grandis Linn*) - pocházející z Barmy

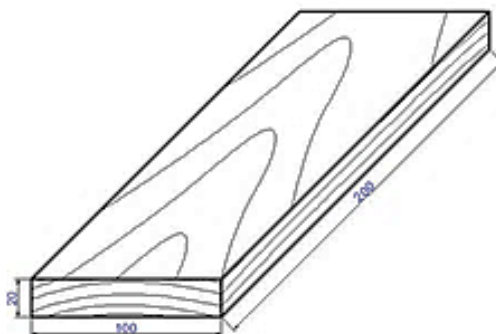
5 Metodika experimentálních prací

5.1 Příprava zkušebních vzorků

5.1.1 Účinek termické úpravy na barevné změny

Pro tento experiment byla použita zkušební tělesa dřevin smrku (*Picea abies L.*), dubu (*Quercus robur L.*) a teaku (*Tectona grandis Linn*). Měření probíhalo se dvěma základními soubory zkušebních těles výše uvedených dřevin. První soubor zkušebních těles nebyl termicky upraven $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, druhý soubor byl termicky upraven. Tento soubor ten se poté dělil podle teplot termické úpravy na $T=160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=210\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro testování účinku termické úpravy na barevné změny bylo využito 20 vzorků.

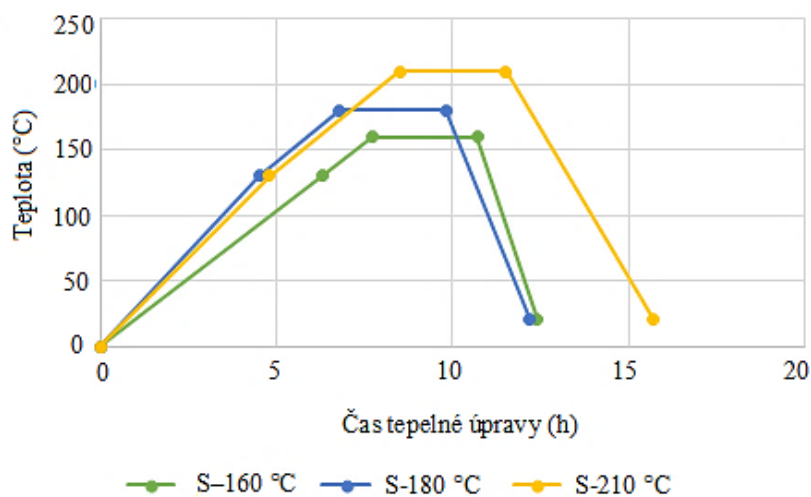
Rozměry zkušebních těles, které se používaly na posouzení barevných změn, byly $20 \times 100 \times 200$ (h x š x l), řezané radiálně (obr. 24).



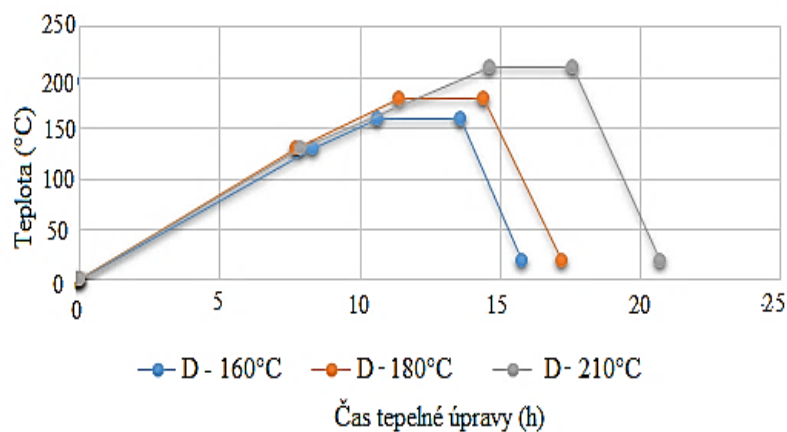
Obr. 24 Rozměry zkušebních těles na posouzení barevných změn termicky upraveného dřeva

V první fázi termického procesu probíhal ohřev a sušení, v této fázi se prudce zvyšovala v sušárně teplota, přibližně na 100°C za působení vodní páry. Sušení probíhá díky horkému vzduchu. Dřevo se sušilo po celou dobu této fáze na nulovou vlhkost. V druhé fázi probíhala termická úprava, teplota se zvýšila na teplotu $185\text{-}230^{\circ}\text{C}$ po dobu 2-3 hodiny. Ve třetí fázi se odehrávalo následné chlazení a klimatizace vzorků. Nejprve se dřevo postupně ochladilo na teplotu $80\text{-}90^{\circ}\text{C}$ a vlhkost vzduchu se stabilizovala tak, aby se konečný obsah vlhkosti ustálil na 4-7%.

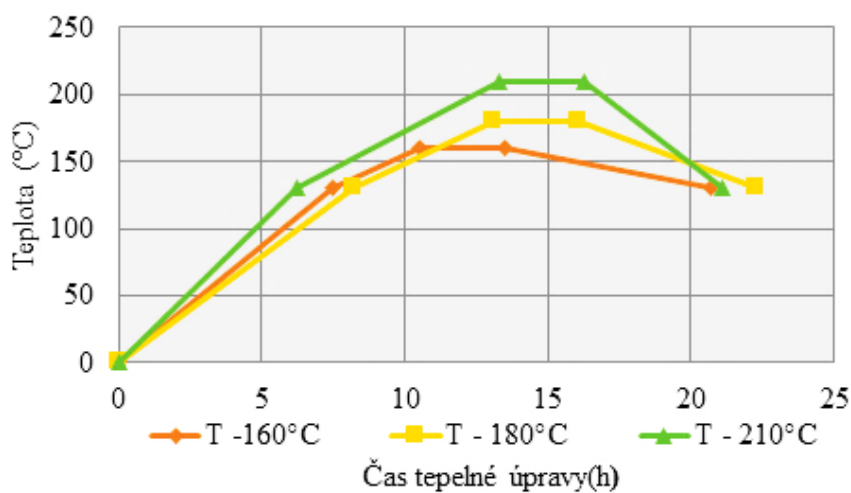
Průběh termických úprav pro každou dřevinu je znázorněn na následujících grafických zobrazeních. Průběh termické úpravy smrku je zobrazen na obr. 25, termickou úpravu dubu nalezneme na obr. 26 a úprava teaku je graficky znázorněna na obr. 27.



Obr. 25 Grafické znázornění průběhu termické úpravy vzorků smrku použitých pro experiment



Obr. 26 Grafické znázornění průběhu termické úpravy vzorků dubu použitých pro experiment



Obr. 27 Grafické znázornění průběhu termické úpravy vzorků teaku použitých pro experiment

Parametry termické úpravy vzorků smrku, dubu a teaku použitých pro tento experiment jsou podrobněji rozvedeny v tabulkách s označením tab. 2, tab. 3, tab.4.

Tab. 2 Vstupní technologické parametry termické úpravy vzorků smrku

Vstupní technologické parametry			
Vlhkost dřeva	2 to 4 %		
Kapacita pece pro termickou úpravu	0,8 m ³		
Maximální dosažená teplota	210°C		
Proces termické úpravy			
	160°C (hod)	180°C (hod)	210°C (hod)
Ohřívání	6,3	4,5	4,8
Tepelná úprava	4,4	5,3	6,7
Chlazení	1,7	2,4	4,2
Celkový čas úpravy	12,4	12,2	15,7

Tab. 3 Vstupní technologické parametry termické úpravy vzorků dubu

Vstupní technologické parametry			
Vlhkost dřeva	2 to 4 %		
Kapacita pece pro termickou úpravu	0,8 m ³		
Maximální dosažená teplota	210°C		
Proces termické úpravy			
	160°C (hod)	180°C (hod)	210°C (hod)
Ohřívání	10,6	11,4	14,6
Tepelná úprava	3	3	3
Chlazení	2,2	2,8	3,1
Celkový čas úpravy	15,8	17,2	20,7

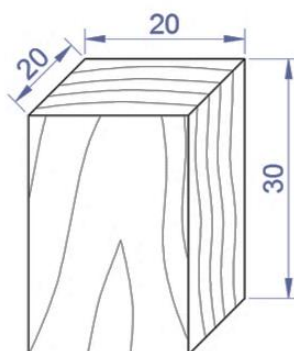
Tab. 4 Vstupní technologické parametry termické úpravy vzorků teaku

Vstupní technologické parametry			
Vlhkost dřeva	2 to 4 %		
Kapacita pece pro termickou úpravu	0,8 m ³		
Maximální dosažená teplota	210°C		
Proces termické úpravy			
	160°C (hod)	180°C (hod)	210°C (hod)
Ohřívání	10,5	13,1	13,3
Tepelná úprava	3	3	3
Chlazení	7,2	6,2	4,8
Celkový čas úpravy	20,7	22,3	21,1

5.1.2 Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasáklivost a hustotu dřeva během procesu nasákání

Pro tento experiment byla použita zkušební tělesa dřevin smrku, dubu a teaku. Měření probíhalo se dvěma základními soubory zkušebních těles uvedených dřevin. První soubor zkušebních těles nebyl termicky upraven $T=20^{\circ}\text{C}$, druhý soubor proběhl termickou úpravou. Tento soubor ten se poté dělil podle teplot termické úpravy na $T=160^{\circ}\text{C}$, $T=180^{\circ}\text{C}$, $T=210^{\circ}\text{C}$. Pro zkoušení účinku rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasáklivost a hustotu dřeva během procesu nasákání bylo použito 80 zkušebních těles pro každou dřeviny. Tento soubor se rozdělil podle teploty termické úpravy po 20 zkušebních těles. Celkově bylo tedy pro tuto zkoušku použito 240 vzorků.

Rozměry zkušebních těles, které se používaly pro hodnocení bobtnání byly 20 x 20 x 30 (h x š x l) (obr. 28). Vzorky prošly totožnou termickou úpravou, která je popsána v oddíle 5.1.1. Zkušební vzorky byly označeny, poté následovalo změření rozměrů posuvným měřítkem a následné zvážení vzorků na digitálních laboratorních váhách s přesností 0,01 g a hodnoty zapsány do tabulek.



Obr. 28 Rozměry zkušebního tělesa

5.1.3 Tvrdost podle Brinella

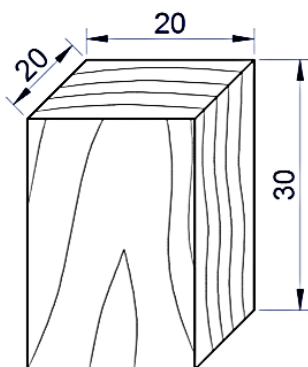
Pro tuto zkoušku byla použita zkušební tělesa vyrobená podle normy EN 1534 (2010) s rozměry 50 x 50 mm a délce minimálně 50 mm ve směru vláken. Měření probíhalo na vzorcích smrku, dubu a teaku. Ty byly dále rozděleny na podsoubory podle teploty termické úpravy na 160°C , 180°C , 210°C a na vzorky neupravené. Vzorky prošly totožnou termickou úpravou, která je popsána v oddíle 5.1.1. Pro vykonání zkoušky bylo použito 20 vzorků. Zkušební vzorky byly náležitě označeny, poté změřeny posuvným

měřítkem a následně zváženy na digitálních laboratorních vahách s přesností 0,01 g a výsledky zapsány do tabulek.

5.1.4 Pevnost v tlaku

Příprava zkušebních těles pro zkoušku pevnosti v tlaku probíhala dle ČSN 49 0110. Jak již bylo řečeno, všechny vzorky použité pro tuto diplomovou práci prošly totožnou termickou úpravou za stejných podmínek. Termická úprava a podmínky jsou popsány v oddílu 5.1.1.

Pro tuto zkoušku byla nařezána zkušební tělesa na tvar pravoúhlého hranolu o základně 20 x 20 mm a délce ve směru vláken 30 mm (obr. 29).



Obr. 29 Rozměry zkušebních těles používaných pro pevnost v tlaku

Vzorky byly rozděleny do sad podle druhu dřeviny a termické úpravy, kterou byly upraveny. Smrk, teak a dub byly tedy rozděleny do čtyř podsad zkušebních těles, a to na neupravenou sadu, na sadu upravenou při 160°C, 180°C a 210°C. V každé této sadě bylo 20 kusů zkušebních vzorků. Rozdělení vzorků smrku je uvedeno pro představu na obr. 30.



Obr. 30 Rozdělení vzorků podle teploty (foto autor)

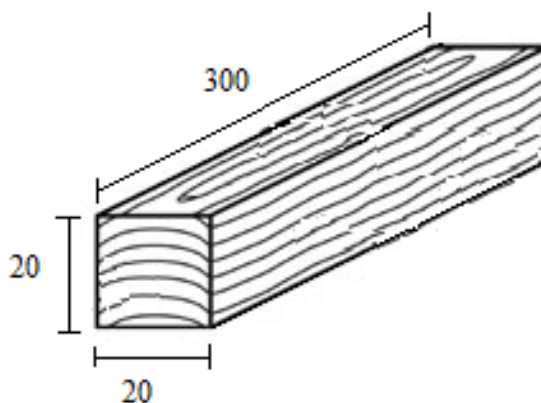
Zkušební tělesa se příslušně označila a poté byly v jejich středu změřeny rozměry posuvným měřítkem a na laboratorních digitálních vahách (obr. 31) s přesností 0,01 g zvážena. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulek.



Obr. 31 Vážení zkušebních vzorků používaných pro pevnost v tlaku (foto autor)

5.1.5 Rázová houževnatost

Příprava těles pro zkoušku rázové houževnatosti probíhala podle ČSN 49 0117. Zkušební tělesa měla tvar pravoúhlého hranolu o průřezu 20x20 mm a délce 300 mm (obr. 32). Na zkoušku byly použity vzorky smrku, teaku a dubu. Zkušební vzorky těchto dřevin byly termicky upravené stejnou technologií a technologickými postupy které jsou uvedeny v kapitole 5.1.1.



Obr. 32 Rozměry zkušebních těles používaných pro rázovou houževnatost

Pro tuto zkoušku byly tedy využity vzorky bez tepelné úpravy a vzorky tepelně upravené na 160°C, 180°C a 210°C (obr. 33). Každá dřevina měla svůj podsoubor

vzorků, které byly rozděleny dle termické úpravy a bez úpravy. Každý podsoubor obsahoval 20 vzorků zkušebních těles. Od každé dřeviny bylo tedy testováno 80 vzorků.



Obr. 33 Příprava zkušebních vzorků pro rázovou houževnatost a ohybových charakteristik (foto autor)

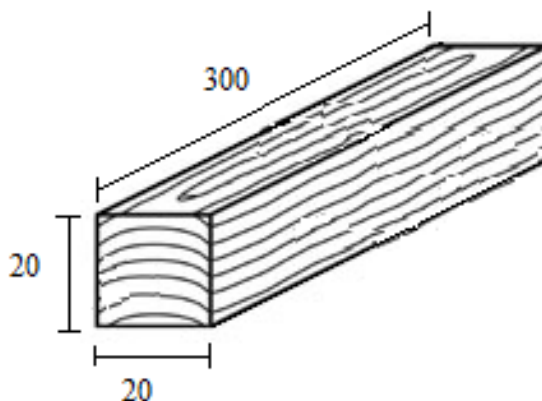
Tělesa byla příslušně označena a poté v jejich středu změřena posuvným měřítkem a na laboratorních digitálních vahách, které mají přesnost 0,01 g zvážena (obr. 34). Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulek.



Obr. 34 Vážení vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti a ohybových charakteristik na digitálních vahách (foto autor)

5.1.6 Ohybové charakteristiky

Příprava vzorků pro zkoušky ohybových charakteristik probíhala totožně jako příprava vzorků na testování rázové houževnatosti, jenž je popsána v části 5.1.5. Rozměry zkušebních vzorků byly 20 x 20 x 300 mm (obr. 35). Opět byly zkoumány dřeviny smrku, teaku a dubu. Každá dřevina byla rozdělena do čtyř podsouborů dle termické úpravy a bez úpravy. Každý tento podsoubor obsahoval 20 zkušebních vzorků. Zkoušeno bylo tedy pro ohybové charakteristiky celkově 240 zkušebních těles.



Obr. 35 Rozměry vzorků zkoušených při ohybových charakteristikách

5.2 Označení zkušebních vzorků

5.2.1 Označení zkušebních vzorků pro experiment účinek termické úpravy na barevné změny

Vzorky použité pro tuto zkoušku byly označeny počátečním písmenem dle příslušné dřeviny: S – smrk ztepilý, D – dub letní, T – teak obrovský. Dále dle termické úpravy, kterou vzorky prošly: T= 160°C – 160, T=180°C – 180, T=210°C – 210 a vzorky bez termické úpravy T=20°C – 20. Jako poslední bylo označeno číslo vzorku v daném souboru 1-10. Označení vzorků tedy vypadalo například následovně: S/160/1, tedy smrk, upravený při termické úpravě 160°C, první zkušební vzorek souboru.

5.2.2 Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasáklivost a hustotu dřeva během procesu nasákání

Tělesa použitá pro tuto zkoušku byla označována dle příslušné dřeviny: S – smrk ztepilý, D – dub letní, T – teak obrovský. Dále dle termické úpravy, kterou vzorky prošly: T= 160°C – 160, T=180°C – 180, T=210°C – 210 a vzorky, které neprošly termickou úpravou T=20°C – 20. Označení zkušební vzorku bylo tedy například: D/160/12 – což

o vypovídá o tom, že testujeme vzorek dubu, upravený teplotou termické úpravy 160°C dvanáctý vzorek v souboru.

5.2.3 Označení zkušebních vzorků pro experiment tvrdost podle Brinella

Zkušební tělesa pro experiment tvrdosti podle Brinella byla označována dle stejného modelu jako vzorky pro ostatní zkoušky. Podle zkoušené dřeviny s počátečním písmenem, a to pro smrk – S, teak – T a dub - D. Dle příslušné teploty termické úpravy 160/180/210 a bez termické úpravy 20. Jako poslední číselné označení 1-20. Označení vypadalo například takto: T/180/20 což znamená, že jsme pro zkoušku použili teak upravený termickou úpravou při teplotě 180°C, dvacátý zkoušený vzorek souboru.

5.2.4 Označení zkušebních vzorků pro experiment pevnost v tlaku

Zkušební tělesa pro pevnost v tlaku byla označována dle zkoušené dřeviny počátečním písmenem, a to pro smrk – S, teak – T a dub - D. Dále podle skupiny zkoušení s ohledem na směr působící síly k orientaci vláken a letokruhům. Rozlišujeme tedy pevnost v tlaku podél vláken – tato skupina byla označena počátečním písmenem P, pevnost v tlaku ve směru radiálním – označení R a pevnost v tlaku ve směru tangenciálním T. Dále následovalo se na vzorek označila termická úprava 160°C, 180°C, 210°C a případě vzorků neupravených 20°C. Jako poslední číselné označení 1-20. Finální označení bylo tedy například ve tvaru S/P/210/1 – což vyjadřuje zkušební smrkový vzorek pro zkoušení pevnosti v tlaku ve směru vláken, upravený termickou úpravou při 210°C, první zkoušený vzorek v souboru.

5.2.5 Označení zkušebních vzorků pro experiment rázová houževnatost

Zkušební tělesa pro rázovou houževnatost byla označena stejně jako vzorky použité pro experiment účinku termické úpravy na barevné změny. První písmeno označení dle příslušné dřeviny, dále následoval údaj teploty termické úpravy nebo bez úpravy a jako poslední číselné označení vzorku v daném souboru. Např. T/210/10 – teak, upravený termickou úpravou při 210°C, desátý zkušební vzorek v daném souboru.

5.2.6 Označení zkušebních vzorků pro experiment ohybové charakteristiky

Označení zkušebních těles využívaných pro testování ohybových charakteristik je totožné jako označení vzorků použitých pro zkoušení rázové houževnatosti.

5.3 Měření

5.3.1 Účinek termické úpravy na barevné změny

Měření barevných změn se provádělo pomocí spektrofotometru. Ten měří změnu barvy na principu spektrálního odrazu s vlnovými délkami 400–700 nm. Spektrofotometr je vybaven LED diodami, jež využívají světlo s konstantní vlnovou délkou. Světelný paprsek je odražen v kruhovém vzorci pod 45° úhlem a úhel pozorování je 0°.

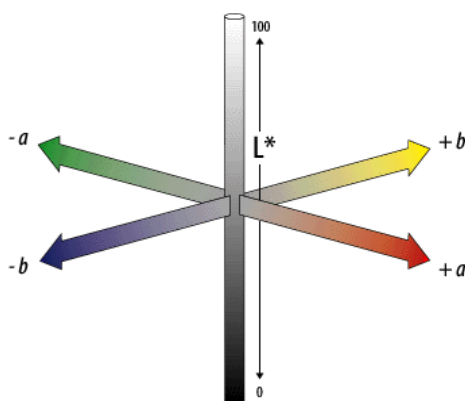
Jako první se měřila barva před samotnou tepelnou úpravou, z důvodu získání referenčních hodnot, které jsou potřebné k přepočtu celkové barvené změny ΔE^* . Na každém vzorku se měřilo na třech místech, aby se zajistily co nejspřávnější výsledky.

Pro tuto diplomovou práci byla použita metoda barevné stupnice CIE-L*a*b* (CIELAB), zejména z toho důvodu, že je často využívána v literatuře, což nám umožňuje snadno porovnávat naměřené hodnoty a výsledky. Kritéria pro vyhodnocování celkové změny barvy ΔE^* jsou uvedena v následující tab. 5.

CIE-L*a*b* metoda je popsána jako barevný prostor (obr. 36) uspořádaný pravoúhle do formy krychle, která je vymezena třemi osami a to:

- L* - vyjádření jasu v % (0 % černá, 100% bílá)
- a* - chromatická osa zeleno-červená
- b* - chromatická osa modro-žlutá.

Stupnice světlosti se pohybuje v rozmezí od 0 – černá až do 100 – bílá. Barevnost plochy je charakterizována dvěma parametry a* a b*, tyto parametry nemají žádné hodnotové ohraničení (Cividini et al. 2007).



Obr. 36 Grafické znázornění metody CIE L*a*b*

Tab. 5 Kritéria vyhodnocování celkové změny barvy ΔE^*

ΔE^*	Barevná změna
$\Delta E < 0,2$	Neviditelný rozdíl
$0,2 < \Delta E < 2$	Malý rozdíl
$2 < \Delta E < 3$	Barevná změna viditelná s vysoko kvalitním filtrem
$3 < \Delta E < 6$	Barevná změna viditelná se středně kvalitním filtrem
$6 < \Delta E < 12$	Vysoká barevná změna
$\Delta E < 12$	Odlišná barva

Při měření se postupovalo dle příslušných norem ISO 11664-2 (2007), ISO 11644-4 (2008) a ISO 11664-6 (2013). Barevné rozdíly se vyhodnocovaly podle celkové barevné změny, která se vypočítala podle vzorce

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}} \quad (9)$$

kde: ΔE^* - celková změna barvy

ΔL^* , Δa^* a Δb^* - rozdíly mezi referenčními hodnotami a hodnotami získanými po termické úpravě vzorků, které jsme dostali přepočtem základních souřadnic podle vzorce:

$$\begin{aligned} \Delta a^* &= a_2 - a_1, a_3 - a_1, \dots a_{50} - a_1 \\ \Delta b^* &= b_2 - b_1, b_3 - b_1, \dots b_{50} - b_1 \\ \Delta L^* &= L_2 - L_1, L_3 - L_1, \dots L_{50} - L_1 \end{aligned} \quad (10)$$

K vyhodnocení výsledků barevného prostoru L^* , a^* , b^* se vycházelo z teorie, jež je popsána v práci Kubovského a Urgela, 2004.

5.3.2 Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasáklivost a hustotu dřeva během procesu nasákání

Při této části výzkumu jsme sledovali účinek termické úpravy na hodnoty přírůstku rozměrů, hmotnosti a změnu vlhkosti ve stavu od suchého dřeva, kde $w_a=0\%$ po jeho úplné nasycení vodou, kde $w_a=mokr\acute{e}$. Výsledky, které byly naměřené na zkušebních tělesech termicky neupravených jsme porovnali s výsledky získanými na tělesech, které termickou úpravou prošly. Termická úprava těles probíhala za stejných podmínek, které jsou popsány v kapitole 5.1.1.

Měření celkového a částečného bobtnání v určitém čase probíhalo podle normy ČSN 49 0104:1988. Abychom zjistili hodnoty bobtnání dřeva, zkušební tělesa byla ponořena do plastových nádob naplněných vodou. Tělesa byla následně zatížena, aby

byla ponořena celá ve vodě a přírůstky jednotlivých sledovaných charakteristik jsme zjišťovali měřením v určitých časových intervalech (0h, 0,06h, 0,2h, 1h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48h, 72h, 96h).

$$\beta_t = \frac{\beta_o - \beta_{wt}}{\beta_o} (\%) \quad (11)$$

kde:

β_t – procentuální přírůstky jednotlivých směrů v závislosti na sledovaném čase,

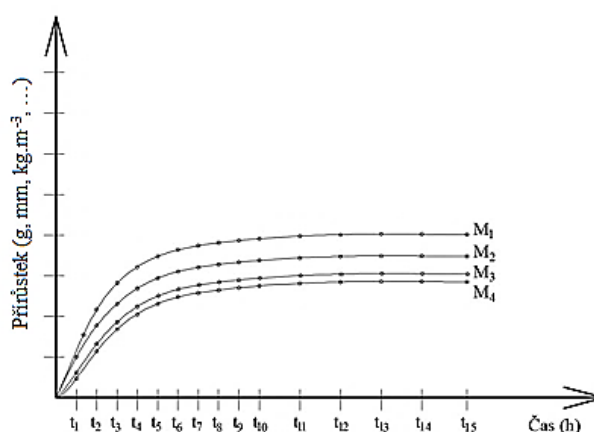
β_o – rozměr tělesa v absolutně suchém stavu,

β_{wt} – rozměry tělesa v jednotlivých směrech po uplynutí jednotlivých intervalů.

Sledovanými charakteristikami byly:

- přírůstek rozměrů v jednotlivých směrech dřeva (podélném, tangenciálním a radiálním),
- přírůstek objemu,
- přírůstek hmotnosti,
- přírůstek hustoty v čase od suchého stavu do úplného nasycení dřeva vodou,
- vlhkost dřeva v čase od absolutně suchého stavu do úplného nasycení dřeva vodou.

Hustota naměřená v intervalech na začátku měření je vyšší z důvodu rychlejší reakce materiálu na změnu vlhkosti (obr. 37).



Obr. 37 Přírůstek sledovaných charakteristik v závislosti na čase

V určených časových intervalech (obr. 37) byla tělesa vyjmuta z vody a zaznamenala se jejich hmotnost a rozměry v jednotlivých směrech (podélný, tangenciální

a radiální). Z naměřených hodnot se následně vypočítali přírůstky sledovaných hodnot v čase daném času podle vzorce:

$$\begin{aligned}P1 &= Ch_{t2} - Ch_{t1} \\P2 &= Ch_{t3} - Ch_{t1} \\P3 &= Ch_{t4} - Ch_{t1}\end{aligned}\tag{12}$$

kde:

$P_{(1,2,3,...)}$ - přírůstek sledované charakteristiky v čase t_1, t_2, t_3 ,

$Ch_{(1,2,3,...)}$ - hodnota sledované charakteristiky na začátku měření v čase t_1 .

Měření přírůstku probíhalo až do stavu, ve kterém nedocházelo k nárůstu sledované charakteristiky, to znamená že průběh měřené křivky přírůstku byl konstantní. Tento stav nastal při intervalu 96 h.

Tímto způsobem jsme tedy měřili a následně vypočítali:

- přírůstek hmotnosti (g) po 96 hodinách nasákání,
- přírůstek objemu (mm^3) po 96 hodinách nasákání,
- přírůstek hustoty (kg.m^3) po 96 hodinách nasákání,
- podélný přírůstek (mm) po 96 hodinách nasákání,
- radiální přírůstek (mm) po 96 hodinách nasákání,
- tangenciální přírůstek (mm) po 96 hodinách nasákání.

Hustota dřeva byla stanovena podle normy ISO 13061-2 (2014), po vysušení, a následně po uplynutí intervalu 96 hodin:

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w}\tag{13}$$

kde:

ρ_w – hustota vzorku při obsahu určité vlhkosti w (kg/m^3),

m_w – hmotnost vzorku s obsahem určité vlhkosti w (kg),

a_w, b_w, l_w – rozměry vzorku při obsahu určité vlhkosti w (m),

V_w – objem vzorku při určitém obsahu vlhkosti w (m^3).

Obsah vlhkosti ve vzorcích byl stanoven podle normy ISO 13061-1 (2014) a rovnice:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (14)$$

kde:

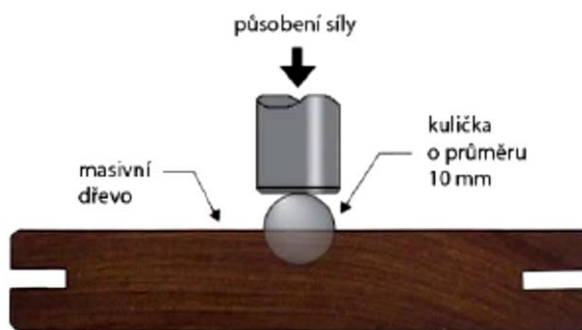
w – obsah vlhkosti ve vzorku (%),

m_w – hmotnost vzorku s obsahem určité vlhkosti w (kg),

m_0 – hmotnost vzorku v suchém stavu (kg).

5.3.3 Tvrdość podle Brinella

Tvrdość podle Brinella neboli Brinell hardness (BH) spočívá v zatlačování kuličky z kalené oceli nebo ze slinutých karbidů (pro tvrdší materiály) s daným průměrem statickým zatížením v našem případě do tangenciálních ploch dřeva, tedy v radiálním směru (obr. 38).



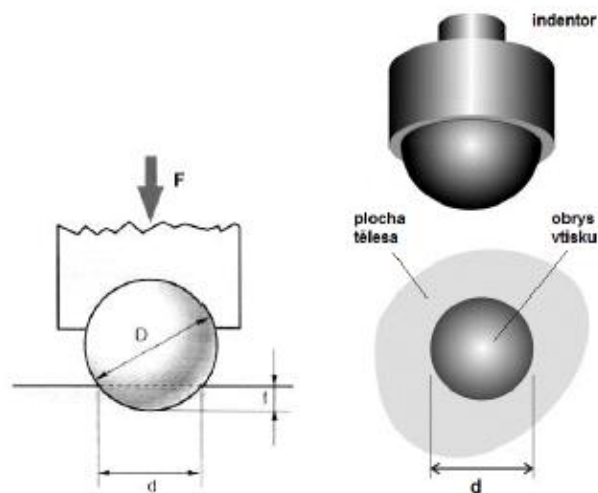
Obr. 38 Model zkoušení Brinellovy zkoušky tvrdosti (<https://www.cdp-praha.cz>)

Způsob provedení této zkoušky sjednocuje norma ČSN EN ISO 6506-1 (2005). Těleso při zkoušce musí být pevně uchyceno a podloženo pevnou podložkou, aby se zamezilo jeho pohnutí. Je důležité, aby byl povrch hladký a rovný bez nečistot a cizích těles. Měření probíhalo dle normy EN 1534 (2010) s určitými změnami. Na měření tvrdosti byl použit tvrdoměr značky DuraVision-30 s karbidovým indikátorem od firmy Struer. Jeho součástí je pevná testovací hlava s automatickým vyhodnocováním výsledků. Tvrdoměr je umístěn v nových laboratořích dřevařského pavilonu ČZU. Duravision patří mezi univerzální tvrdoměry, které jsou určeny pro měření několika metodami (obr. 39).



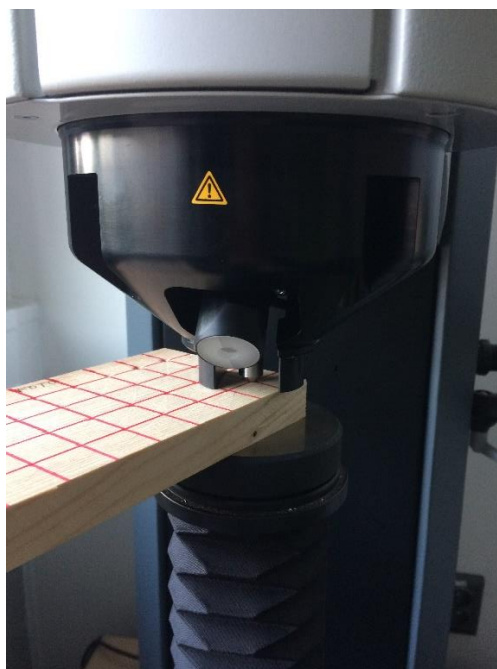
Obr. 39 Tvrdoměr Duravision-30 pro měření tvrdosti podle Brinella (foto autor)

Postup zkoušení se skládal z několika dílčích činností. Před samotným měřením byly nastaveny parametry pro měření. Zkušební vzorek se vložil a upnul na pracovní desku tvrdoměru. Poté se na dotykovém displayi vedle přístroje spustí měření tvrdosti, získané hodnoty byly zapsány do tabulky v MPa. Vzorek byl uvolněn z upnutí a postup se opět opakoval. Vyjma manuálního upínání zkušebních vzorků je tvrdoměr plně automatický. Výsledky tvrdosti byly zpracovány rovnou na dotykovém displayi. Přístroj automaticky snímá předepsanou sílu zatěžování, měří hloubku a průměr otláčení a poté je z těchto informací schopen vypočítat hodnotu tvrdosti (obr. 40).



Obr. 40 Princip zkoušení Brinellovou metodou (<http://www.converter.cz>)

Kalibrace a vtisk indikátoru trval průměrně 1 minutu. Samotný proces vtisku indikátoru do zkušebního tělesa 10 sekund. Měření probíhalo na tělesech na několika zkušebních místech, aby byla stanovena variabilita tvrdosti. Na tělesa byla rozkreslena mřížka po cca 20 x 20 mm (obr. 41) v protnutí probíhalo měření tvrdosti. Parametry měření tvrdosti podle Brinella jsou uvedeny v tab. 6.



Obr. 41 Upnutí zkušební vzorku do přístroje, ukázka rozkreslené mřížky na tělese (foto autor)

Tab. 6 Parametry tvrdost podle Brinella

Tvrdost podle Brinella		
Dřevina	Podmínky	Popis
Smrk	H_{BW} $10^1/500^2/10^3$	¹ 10 = průměr karbidové kuličky (mm)
Teak		² 250 and 500 = konstantní zatěžovací síla (N)
Dub		³ 10 = čas měření (sec)

Tvrdost podle Brinella H_{BW} byla vypočítána pomocí následujícího vzorce podle EN 1534 (2010):

$$H_{BW} = \frac{2F}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (\text{MPa}) \quad (15)$$

kde:

H_{BW} – Tvrdost dřeva podle Brinella (Mpa),

F – síla působící na kuličku (N),
 D – průměr kuličky (mm),
 D – průměr otláčené plochy ve dřevě (mm).

Naměřené hodnoty Brinellovy tvrdosti byly následně převedeny na 12% obsah vlhkosti podle Dubovský et al. (2003) vzorcem:

$$H_{BW_{12}} = H_B [1 + \alpha(w - 12)] \quad (16)$$

kde:

$H_{BW_{12}}$ – tvrdost dřeva při vlhkosti 12% (Mpa),
 H_B – tvrdost dřeva při zkoušené vlhkosti,
 w – vlhkost zkušebních těles při zkoušce (v %),
 α – opravný vlhkostní koeficient pro tvrdost kolmo na vlákna pro všechny dřeviny,
 (v tomto případě 0,025).

Vlhkost dřeva byla stanovena během zkoušení podle ISO 13061-2 (2014) následujícím vzorcem:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (17)$$

kde:

ρ_w – hustota dřeva při vlhkosti w (kg/m³),
 m_w – hmotnost dřeva při obsahu vlhkosti w (kg),
 V_w – objem dřeva při obsahu vlhkosti w (m³).

Obsah vlhkosti ve vzorcích byl stanoven v souladu s ISO 13061-1 (2014) a vzorce:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (18)$$

kde:

w – vlhkost vzorků (%),
 m_w – váha vzorků s vlhkostí w (kg),
 m_0 – váha vysušených vzorků v sušárně (kg).
 Sušení probíhalo podle ISO 13061-1 (2014).

5.3.4 Pevnost dřeva v tlaku

5.3.4.1 Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken

Podstatou této zkoušky je zjištění maximálního zatížení zkušební vzorku při zatížení tlakem a následný výpočet tlakového napětí v průřezu při tomto zatížení. Zkoušení probíhalo podle normy ČSN 49 0110. Tělesa byla vystavena tlakovému zatížení na trhacím stroji UTS 50 vybaveným softwarem TIRA. Postup při měření probíhal následovně. Vzorek byl vložen do trhacího stroje, kde byl rovnoměrně zatěžován při konstantní rychlosti posuvu horní zátěžové hlavy (obr. 42).



Obr. 42 Testování vzorků na pevnost v tlaku ve směru vláken

Rychlost zatěžování strojem musí být zvolena tak, aby bylo těleso porušeno v časovém horizontu 60 +/- 30 sekund od počátku zatěžování daného zkušební vzorku. Stroj spouští horní hlavici proti podpěrám do té doby, než je porušena pevnost vzorku. To zaznamenáme buď podle porušení zkoušeného tělesa anebo podle poklesu zatěžovací síly o 10%, a horní tlaková hlavice se vrátí zpět do původní nulové pozice. Všechny výsledky měření se zaznamenávají do programu TIRA. Důležitým údajem jsou naměřené hodnoty F_{max} , které dále využijeme pro výpočet napětí při dané vlhkosti. Ze získaných hodnot jsme dále vypočítali mez pevnosti podél vláken při aktuální vlhkosti při zkoušení podle vzorce:

$$\sigma_w = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad (19)$$

kde:

F_{\max} - maximální zatěžovací síla [kN],

σ_w – napětí vzniklé zatížením [MPa],

a, b – rozměry v radiálním a tangenciálním směru.

Dále přepočítáme mez pevnosti σ_w na mez pevnosti při 12% vlhkosti podle následujícího vzorce:

$$\sigma_{12} = \sigma_w(1 + \alpha(w - 12)) \quad (20)$$

kde:

α – opravný vlhkostní koeficient $\alpha=0,04$ (Požgaj, 1993).

5.3.4.2 Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken

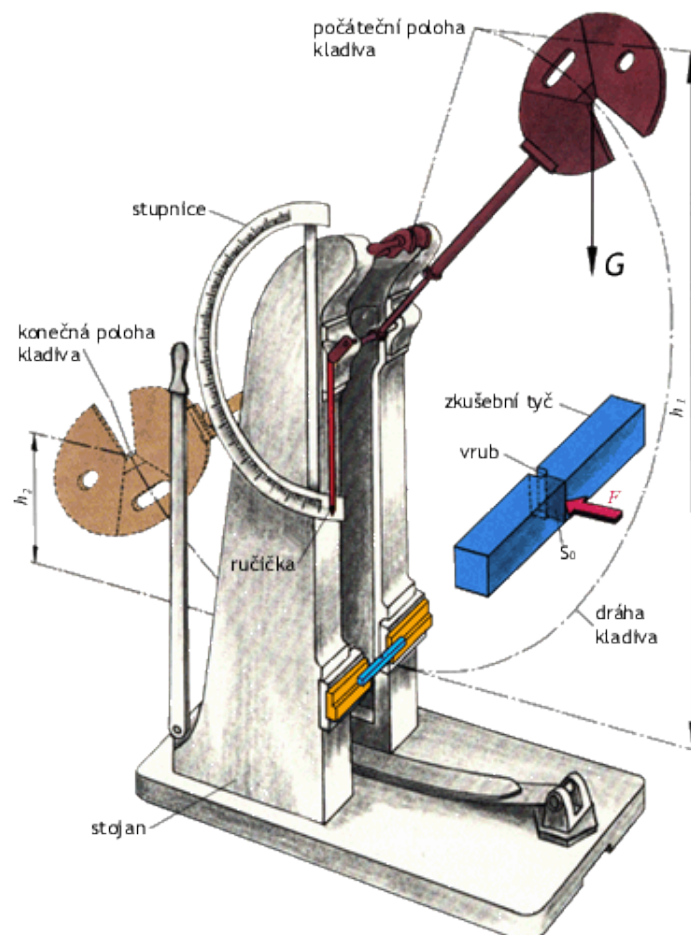
Zkušební tělesa pro pevnost v tlaku napříč vláken byla stejně jako testovaná tělesa u předchozího měření testována na trhacím stroji UTS 50 se softwarem TIRA. Postup měření byl obdobný jako u zkoušení pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken. Vzorek se umístil do trhacího stroje tak, aby nám síla působila v tangenciálním anebo radiálním směru. Rychlost zatěžování se volí tak, aby časový horizont zkoušení byl v rozmezí 60 +/-30 sekund od počátku zatěžování. Rozdíl v měření je ten, že na rozdíl od vzorků zkoušených tlakem ve směru vláken v tomto případě tlaku v tangenciálním směru nebývá dřevo porušeno oddělováním jednotlivých částí, ale vznikají postupné deformace a zhušťování dřevní struktury v celém objemu. Při tomto zatížení mohou vzniknout dva možné druhy deformace – dvoufázová a třífázová. U dvoufázové deformace je zřetelná lineární část, kdy při vzrůstajícím napětí vzrůstá i deformace. Lineární část probíhá téměř do maximálního pružného zatížení. Nad mezí úměrnosti nastává postupné porušování soudržnosti zkoušeného tělesa. Pro zatížení dřeva v tlaku napříč vláken v radiálním směru je typická třífázová křivka deformace dřeva. To platí téměř pro všechny naše tuzemské dřeviny, výjimku tvoří dub. V první fázi deformace má křivka lineární část, to je způsobeno stlačováním jarního dřeva v letokruzích. Po ukončení této fáze je dosažena mez úměrnosti. Další část křivky má téměř vodorovný nebo lehce zakřivený tvar, to je způsobeno stlačováním anatomických elementů. Tento děj se uskutečňuje při stejném nebo málo vzrůstajícím napětí a rozvoji plastické deformace. Třetí fáze deformace již probíhá při významném zatížení dřeva, dochází ke zhušťování dřeva, nicméně nekončí

úplným porušením tělesa. Pevnost v tlaku tedy určíme z meze úměrnosti (Gandelová a Horáček 2012).

5.3.5 Rázová houževnatost

Po příslušném označení, zvážení a změření všech zkušebních vzorků přichází na řadu samotná zkouška rázové houževnatosti. Houževnatost je vlastnost materiálu, kterou lze charakterizovat jako schopnost materiálu setrvat při ohýbání a nárazech vcelku, tedy bez tvorby trhlin. Zjišťuje, kolik energie nebo práce se spotřebuje na porušení zkušebního vzorku.

Měření a zkouška probíhala podle normy ČSN 49 0117. Charpyho kladivo (obr. 43) neboli kladivo kyvadlové je stroj, který vytvoří rázové namáhání. Otočné kladivo kolem své osy se zvedne a uchytí se v počáteční poloze, to kladivu poskytne určitou energii.



Obr. 43 Princip Charpyho kladiva (<http://www.strojari.wz.cz>)

Zkušební těleso bylo symetricky položeno na podpěry Charpyho kladiva (obr. 44 a obr.45), jejichž středová vzdálenost je 240 mm. Těleso je na podpěry umístěno tak, aby bylo přerazeno na radiální ploše. Dále se kladivo uvolní z počáteční polohy, během pohybu se hýbe po kruhové dráze, přerazí zkušební těleso a vychýlí se do konečné polohy. Práce, kterou těleso spotřebovalo při přerazení, byla změřena s přesností na 0,5 J.



Obr. 44 Charpyho kladivo používané při zkoušení
(foto autor)



Obr. 45 Umístění zkušební vzorku na podporách kladiva (foto autor)

Zkoušení rázové houževnatosti probíhalo při relativní vlhkosti vzduchu 65% a teplotě 20°C. Pro výpočet byly použity tyto vzorce:

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} \quad [J \cdot cm^{-2}] \quad (21)$$

kde:

A_w – rázová houževnatost,

W – práce spotřebovaná na přerazení tělesa [J],

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

Přepočet na 12% vlhkost:

$$A_{12}=Aw\cdot[1+\alpha\cdot(W-12)] [J\cdot cm^{-2}] \quad (22)$$

kde:

α – opravný koeficient 0,02 pro všechny dřeviny,

w – vlhkost dřeva [%],

(Požgaj, 1993; ČSN 49 0117).

5.3.6 Ohybové charakteristiky

Zkoušení probíhalo podle normy ČSN 49 0116. Testování bylo provedeno na trhacím stroji UTS 50 vybaveným softwarem TIRA. Na trhací stroj byly umístěny dvě podpěry a zatěžovací trn. Postup při měření probíhal následovně. Před začátkem měření byla vyznačena čára v polovině zkušební vzorku. Vzorek byl vložen do trhacího stroje na podpěry, které jsou od sebe osově vzdálené 240 mm tak, aby čára byla v ose zatěžovacího trnu umístěného na horní hlavici. Vzorky vkládáme do stroje, tak aby trn působil na radiální plochu zkušební vzorku. Před provedením zkoušky zkontrolujeme, zdali je trn trhacího stroje v nulové poloze a poté zahájíme testování. Horní hlavice s trnem klesá proti podpěrám s umístěným vzorkem (obr. 46) konstantní rychlostí do té doby, než je porušena pevnost vzorku. To zaznamenáme buď podle porušení zkoušeného tělesa anebo podle poklesu zatěžovací síly o 10 %, a horní hlavice s trnem se vrátí zpět do původní nulové pozice. Všechny výsledky měření se zaznamenávají do programu TIRA. Důležitým údajem jsou naměřené hodnoty F_{max} , které dále využijeme pro výpočet napětí při dané vlhkosti. Celková doba zatěžování zkušební vzorku musí být maximálně 1 +/- 0,5 min. Po změření všech těles určených pro tuto zkoušku přistoupíme k výpočtu.



Obr. 46 Zatížení ohybem (foto autor)

Naměřené hodnoty dosadíme do následujících vzorců, ze kterých vypočteme mez úměrnosti ve statickém ohybu, modul pružnosti ve statickém ohybu a mez pevnosti ve statickém ohybu, při vlhkosti v čas zkoušky.

Hustota dřeva byla stanovena před a po testování ohybových charakteristik podle ISO 13061-2 (2014) a vzorce:

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (23)$$

kde:

ρ_w – hustota vzorku při obsahu vlhkosti w (kg/m^3),

m_w – hmotnost vzorku při obsahu vlhkosti w (kg),

a_w, b_w, l_w – rozměry vzorku při obsahu vlhkosti w (m),

V_w – objem vzorku při obsahu vlhkosti w (m^3).

Obsah vlhkosti vzorků byl určen a ověřen před a po testování. Tyto výpočty byly provedeny v souladu s ISO 13061-1 (2014) podle vzorce:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (24)$$

kde:

w – obsah vlhkosti ve vzorcích (%),

m_w – hmotnost vzorku obsahující vlhkost w ,

m_0 – hmotnost absolutně suchého vzorku,

Sušení probíhalo v sušárně podle normy ISO 13061-1 (2014).

Pro přepočítání ρ_w na ρ_{12} , jsme použili vzorec z normy ISO 13061-2 (2014), který je platný pro vlhkosti pohybující se v rozmezí od 7% do 17%:

$$\rho_{12} = \rho_w \left[1 - \frac{(1 - K) \cdot (w - 12)}{100} \right] \quad (25)$$

kde:

K – koeficient objemového sušení pro změnu vlhkosti o 1%. Pro orientační výpočet je možné použít $K = 0,85 \times 10^{-3} \times \rho_w$, kde je ρ v (kg/m^3), ρ_{12} – hustota vzorku při obsahu vlhkosti 12% (kg/m^3).

Modul pružnosti byl vypočítán podle EN 310 (1993) a následujícího vzorce:

$$E_m = \frac{\Delta F l_1^3}{4bh^3 \Delta y} \quad (26)$$

kde:

E_m – modul pružnosti kolmo na vlákna v radiálním směru (MPa),

ΔF – rozdíl zatížení při 40% a 10% (N),

l_1 – vzdálenost podpěr (mm),

b – šířka zkušebního tělesa (mm),

h – výška zkušebního tělesa (mm),

Δy – rozdíl velikosti průhybů (deformace) při 40% a 10% zatížení.

Přepočítání modulu pružnosti na 12% vlhkost byla provedena podle ISO 13061-4 (2014) vzorce:

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - \alpha(w - 12)} \quad (27)$$

kde:

E_{12} – modul pružnosti při obsahu vlhkosti 12% (MPa),

E_w – modul pružnosti s vlhkostí w (MPa),

w – obsah vlhkosti vzorku v době měření (%),

α – opravný koeficient vlhkosti pro modul pružnosti, 0,01 pro všechny druhy dřevin.

Výpočet meze pevnosti ve statickém ohybu probíhal v souladu s EN 310 (1993) a vypočteme ji z následujícího vzorce:

$$\sigma_{ohw} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (28)$$

kde:

σ_w – mez pevnosti v ohybu (MPa),

F – maximální hodnota zatížení (N),

l_0 – vzdálenost středů podpěr (mm),

b – šířka zkušebního tělesa (šířka radiální plochy) (mm),

h – výška zkušebního tělesa (šířka tangenciální plochy) (mm).

Přepočítání na 12 % vlhkost:

$$\sigma_{12} = \sigma_w \cdot (1 + \alpha(w - 12)) \quad (29)$$

kde:

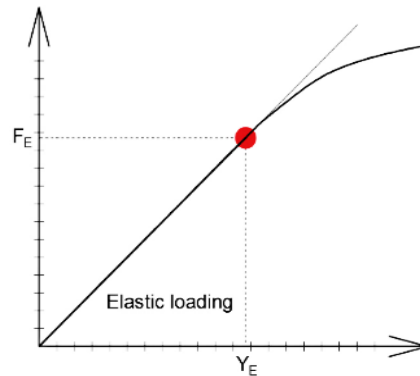
σ_{12} – mez pevnosti v ohybu při 12 % vlhkosti,

α – opravný koeficient (0,04),

w – vlhkost vzorku v době měření v %.

Stanovení tříbodového ohybu meze úměrnosti ve statickém ohybu probíhalo podle EN 310 (1993). Z obr. 47 vyplývá, že stanovení modulu pružnosti a meze úměrnosti podle normy není přesné. Vychází z tečny lineární části přímky v pružné oblasti, odkud se zvolí úsek v rozmezí 10% až 40% přímky. Z analýz, které byly naměřeny pomocí napětově-deformačních grafů vyplývá, že tento způsob pracuje s chybou a hodnoty modulu pružnosti a meze úměrnosti jsou častokrát vyšší. V této diplomové práci byly modul pružnosti stejně tak i mez úměrnosti stanoveny na základě rovnice přímky s definovanou tolerancí odklonu 1% (červeně označený bod na obr. 47). Toto stanovení

poskytuje mnohem přesnější matematické aproximace na analýzu uvedených charakteristik (Gaff *et al.* 2017)



Obr. 47 Obecný tvar pracovního diagramu

5.3.7 Zpracování výsledků v softwaru statistika 12

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita více-faktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich dvou, tří nebo čtyř vzájemných kombinací. K tomuto ohodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty P lze testovaný faktor ohodnotit takto:

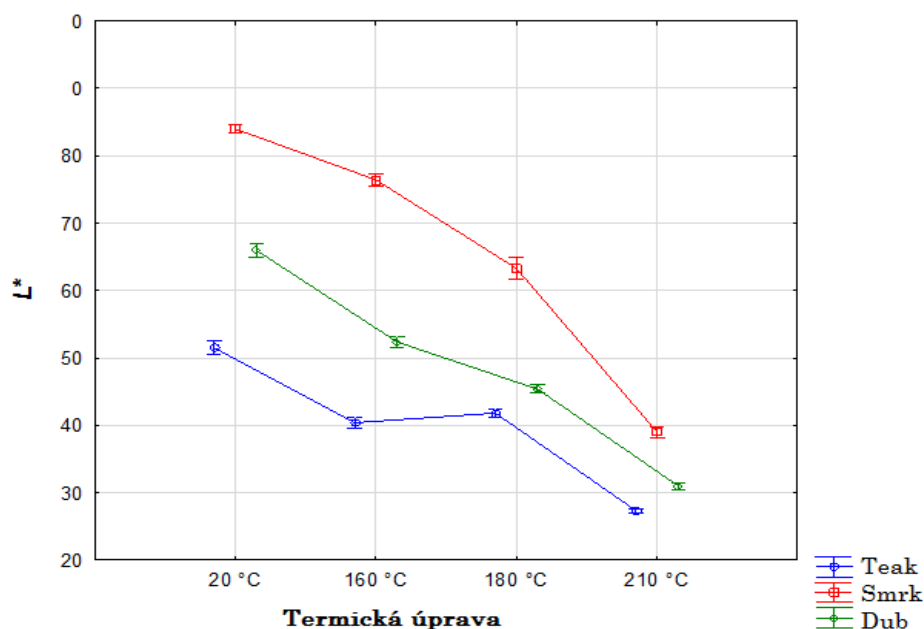
- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ faktor působí,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný (Gaff a Gaborik 2009).

6 Výsledky a diskuze

6.1.1 Vyhodnocení výsledků účinku termické úpravy na barevné změny

Posuzovanými hodnotami byly celková změna barevného prostoru ΔE^* a souřadnice barevného prostoru L^* , a^* , b^* , tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. 11.

Souřadnice L^* vykazovala nejvýraznější změnu ze všech testovaných parametrů. Hodnocené vzorky všech tří termicky upravených dřevin vykazovaly velice výrazný pokles hodnot, a to v závislosti na zvyšující se teplotě termické úpravy. Všechny vzorky zkoušené po termické úpravě při teplotě 210°C měly sníženou hodnotu souřadnice L^* zhruba o 50% v porovnání s hodnotami, které byly získány na neupravených vzorcích. Získané hodnoty jsou porovnatelné s těmi, které uvádějí Barcík *et al.* (2015). Porovnání změn souřadnice L^* jsou uvedené v obr. 48.



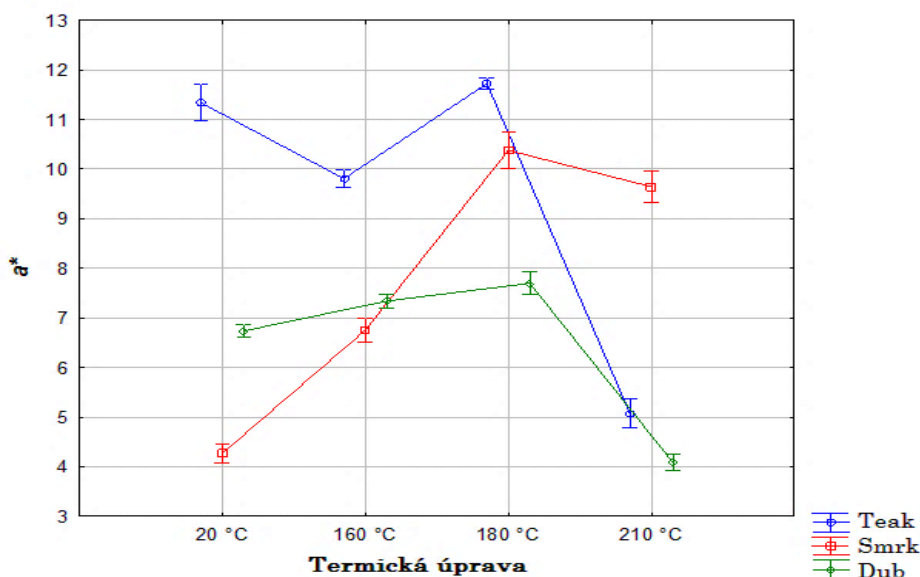
Obr. 48 Znárodnění průběhu změny souřadnice L^* v závislosti na teplotě termické úpravy

Významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr je obsažen v tab. 7. Rozdíly v počátečních hodnotách mohou být zapříčiněny rozdílnými vlhkostmi před termickou úpravou vzorků. Rozdíly v hodnotách po termické úpravě mohly být vyvolány rozdílným průběhem termické úpravy vzhledem k jejímu trvání.

Tab. 7 Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice L*

Efekt	Hodnota	F	Efekt SV	Chyba SV	Hodnota pravděpodobnosti p
Abs. Člen	0,001318	92626,73	4	489,000	0,000
Druh dřeviny	0,017403	804,43	8	978,000	0,000
Termická úprava	0,007347	582,88	12	1294,064	0,000
Druh dřeviny*Termická úprava	0,034108	116,20	24	1707,127	0,000

Souřadnice a* se ve výsledku projevila jako nejstabilnější souřadnice barevného prostoru. Nejvýrazněji se souřadnice a* měnila na vzorcích smrku. Zkoušené dřeviny též ukázaly odlišné směry změny vzhledem k teplotě termické úpravy (obr. 49). Významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr je obsažen v tab. 8.

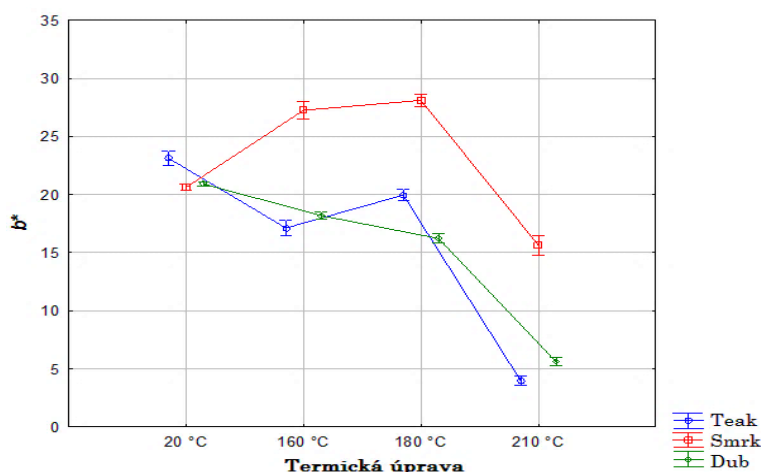


Obr. 49 Znárodnění průběhu změny souřadnice a* v závislosti na teplotě termické úpravy

Tab. 8 Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice a*

Efekt	Hodnota	F	Efekt SV	Chyba SV	Hodnota pravděpodobnosti p
Abs. Člen	0,001318	92626,73	4	489,000	0,000
Druh dřeviny	0,017403	804,43	8	978,000	0,000
Termická úprava	0,007347	582,88	12	1294,064	0,000
Druh dřeviny*Termická úprava	0,034108	116,20	24	1707,127	0,000

Souřadnice b^* před termickou úpravou nabývala u všech zkoumaných vzorků téměř stejných hodnot, nicméně jejich další změny ukazovaly odlišné tendence a intenzitu (obr. 50). Významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr je obsažena tab. 9. Hodnoty dubu a teaku mají v podstatě obdobnou klesající tendenci změn v závislosti na teplotách termické úpravy. U teaku byla však konečná změna mírně výraznější. U smrku se hodnota b^* souřadnice zvýšila markantně, v případě termické úpravy při 160°C a 180°C až o cca 35%. Při termické úpravě teplotou 210°C následoval významný pokles až o 45%.

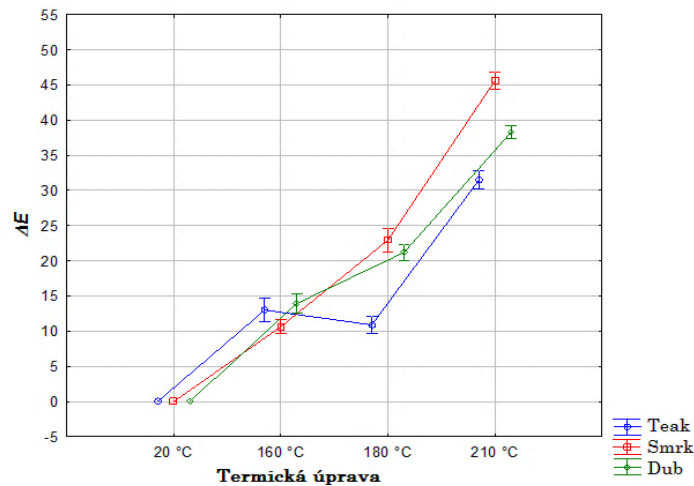


Obr. 50 Znárodnění průběhu změny souřadnice b^* v závislosti na teplotě termické úpravy

Tab. 9 Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice b^*

Efekt	Hodnota	F	Efekt SV	Chyba SV	Hodnota pravděpodobnosti p
Abs. Člen	0,001318	92626,73	4	489,000	0,000
Druh dřeviny	0,017403	804,43	8	978,000	0,000
Termická úprava	0,007347	582,88	12	1294,064	0,000
Druh dřeviny*Termická úprava	0,034108	116,20	24	1707,127	0,000

Jak vidíme v obr. 51 a tab. 10 celková změna barvy ΔE se měnila velice výrazně s rostoucí teplotou termické úpravy. Tato změna barvy byla též ovlivněna druhem upravované dřeviny. Nejvyšší barevnou stálost má teak během teplot termických úprav 180°C a 210°C. Při teplotě 180°C získaly vzorky smrku a dubu velmi podobné výsledky, nicméně při teplotě 210°C nabyl dub menší celkové změny barvy.



Obr. 51 Znárodnění průběhu celkové změny souřadnice ΔE v závislosti na teplotě termické úpravy

Tab. 10 Vyhodnocení celkové změny barvy

Dřevina	Teplota úpravy	Celková změna barvy ΔE^*	Vyhodnocení	
			Kritéria	Popis
Smrk	160 °C	10,6	$6 < \Delta E < 12$	Vysoká barevná změna
Smrk	180 °C	22,9	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Smrk	210 °C	45,6	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Teak	160 °C	12,9	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Teak	180 °C	10,8	$6 < \Delta E < 12$	Vysoká barevná změna
Teak	210 °C	31,5	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Dub	160 °C	13,9	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Dub	180 °C	21,1	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Dub	210 °C	38,2	$\Delta E < 12$	Odlišná barva

Posuzovanými hodnotami této zkoušky byly celková změna barevného prostoru ΔE^* a souřadnice barevného prostoru L^* , a^* , b^* , výsledné hodnoty testování jsou uvedeny v následující tab. 11.

Tab. 11 Změna souřadnic barevného prostoru L*, a* a b* a celková změna barevného prostoru ΔE^* v průběhu termické úpravy vzorků smrk, teaku a dubu

Dřevina	Tepelná úprava	Souřadnice barev			Celková změna barvy ΔE^*
		L*	a*	b*	
Smrk	20 °C	83,9	4,2	20,6	-
Smrk	160 °C	76,4	6,7	27,2	10,6
Smrk	180 °C	63,3	10,3	28,1	22,9
Smrk	210 °C	39	9,6	15,6	45,6
Teak	20 °C	51,4	11,3	23,1	-
Teak	160 °C	40,4	9,8	17,1	12,9
Teak	180 °C	41,8	11,7	19,9	10,8
Teak	210 °C	27,3	5	3,9	31,5
Dub	20 °C	65,9	6,7	20,9	-
Dub	160 °C	52,3	7,3	18,1	13,9
Dub	180 °C	45,3	7,6	16,2	21,1
Dub	210 °C	31	4	5,6	38,2

6.1.2 Vyhodnocení výsledků účinků rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasáklivost a hustotu dřeva během procesu nasákání

Na základě dat, která byla naměřena, jsou v této části zpracovány všechny výsledky měření. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a obrázcích.

V následující tabulce (tab. 12) jsou uvedeny průměrné hodnoty přírůstků sledovaných charakteristik v čase od absolutně suchého stavu až po jejich úplné nasycení vodou.

Tab. 12 Průměrné hodnoty přírůstků sledovaných charakteristik po 96 hodinách

Druh Dřeviny	Termická úprava (°C)	Přírůstek hmotnosti (g)	Přírůstek objemu (mm ³)	Přírůstek hustoty (kg.m ³)	Přírůstek radiální (mm)	Přírůstek tangenciální (mm)	Přírůstek podélný (mm)	Hustota (Kg/m ³)
Smrk	20	5,6 (7,1)	2208,1 (4,5)	326 (10,3)	2,1 (7,2)	3,3 (4,5)	1,1 (8,0)	445 (5,39)
Smrk	160	6,1 (18,7)	2515,7 (9,6)	336 (21,6)	2,2 (6,4)	3,4 (4,3)	1,4 (3,3)	449 (4,45)
Smrk	180	4,8 (12,9)	1956,2 (12,8)	313 (22,0)	1,9 (11,6)	2,9 (4,5)	1,2 (2,8)	467 (1,96)
Smrk	210	4,3 (12,2)	1663,3 (14,6)	268 (11,2)	1,9 (16,8)	2,5 (5,6)	1,1 (3,6)	461 (4,94)
Dub	20	4,9 (11,2)	2000,7 (3,2)	245,6 (10,1)	2,2 (5,2)	3,0 (4,2)	1,3 (7,2)	722 (5,39)
Dub	160	4,9 (10,2)	1960,3 (6,2)	256,4 (11,3)	2,0 (7,2)	3,1 (3,2)	1,1 (6,1)	738 (4,45)
Dub	180	5,0 (13,1)	1831,4 (11,2)	198,6 (11,6)	2,0 (12,7)	2,8 (5,2)	1,1 (9,2)	732 (1,96)
Dub	210	2,6 (12,4)	957,8 (15,2)	157,6 (13,4)	1,6 (17,2)	1,9 (5,8)	1,1 (10,1)	629 (4,94)
Teak	20	2,9 (11,2)	885,7 (4,2)	188,7 (13,2)	1,6 (7,1)	1,8 (4,3)	1,1 (6,4)	590 (4,56)
Teak	160	2,5 (11,3)	478,7 (9,2)	170,2 (14,3)	1,2 (9,2)	1,5 (5,4)	1,1 (7,2)	588 (7,22)
Teak	180	2,2 (12,4)	592,7 (11,2)	145,0 (10,5)	1,3 (10,2)	1,6 (5,2)	1,1 (8,2)	635 (7,17)
Teak	210	1,1 (13,2)	275,1 (12,3)	75,4 (11,2)	1,1 (14,1)	1,2 (6,1)	1,1 (7,2)	632 (3,05)

* Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %

Na základě hodnot hladiny významnosti „P“ uvedených v tab. 13 je evidentní, že druh dřeviny a termická modifikace jsou statisticky významným faktorem při zhodnocení přírůstků hmotnosti vzorků po 96 hodinách nasákání. Vzájemná interakce těchto dvou faktorů se ovšem neprojevuje jako statisticky významná.

Tab. 13 Statistické hodnocení vlivu tepelného zpracování na hodnotách přírůstků hmotnosti po 96 hodinách nasákání

Přírůstek hmotnosti (g) po 96 hodinách					
Hodnocený faktor	Počet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisher's F-test	Hladina významnosti p
Abs. Člen	1764,438	1	1764,438	2640,171	0,000
Druh dřeviny (DD)	192,662	2	96,331	144,142	0,000
Teplota termické úpravy (TT)	69,677	3	23,226	34,753	0,000
DD x TT	6,507	6	1,084	1,623	0,148
chyba	72,177	108	0,668		

* Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Při posuzování hodnot hladiny významnosti „P“, které jsou uvedené v tab. 14 je zřejmé, že druh dřeviny i termická modifikace jsou faktory, které mají statisticky významný vliv na hodnotu přírůstku hustoty vzorků po 96 hodinách nasákání. Pokud zhodnotíme vzájemnou interakci druhu dřeviny a teploty termické úpravy, můžeme říci, že interakce těchto dvou faktorů neprojevuje jako statisticky významná.

Tab. 14 Statistické hodnocení vlivu tepelného zpracování na hodnotách přírůstků hustoty po 96 hodinách nasákání

Přírůstek hustoty (kg.m³) po 96 hodinách					
Hodnocený faktor	Počet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisher's F-test	Hladina významnosti p
Abs. Člen	5990513	1	5990513	1557,389	0,000
Druh dřeviny (DD)	556439	2	278219	72,33	0,000
Teplota termické úpravy TT	152375	3	50792	13,205	0,000
DD x TT	11253	6	1875	0,488	0,816
chyba	415423	108	3847		

* Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Zhodnocením uvedených hodnot hladiny významnosti „P“,

Tab. 15 tab.15 je zřejmé, že jak druh dřeviny, tak i teplota termické úpravy patří mezi faktory, které mají statisticky významný vliv na hodnotu přírůstku objemu vzorků po 96 hodinách nasákání. Statisticky významný vliv má na hodnotu přírůstku objemu také interakce druhu dřeviny a teploty termické úpravy.

Tab. 15 Statistické hodnocení vlivu tepelného zpracování na hodnotách přírůstků objemu po 96 hodinách nasákání

Přírůstek objemu (mm ³) po 96 hodinách					
Hodnocený faktor	Počet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisher's F-test	Hladina významnosti p
Abs. Člen	2,50E+08	1	2,50E+08	6313,5	0,000
Druh dřeviny (DD)	50247583	2	25123791	634,092	0,000
Teplota termické úpravy TT	10110069	3	3370023	85,055	0,000
DD x TT	3046942	6	507824	12,817	0,000
chyba	4279140	108	39622		

* Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Posouzením hladiny významnosti „P“, které jsou zobrazeny v tab. 16 je zjevné, že druh dřeviny i teplota termické modifikace považujeme za faktory, které významně statisticky ovlivňují hodnoty radiálního přírůstku vzorků, které byly po 96 hodinách ponořeny ve vodě. Při zhodnocení vzájemné interakci druhu dřeviny a teploty termické úpravy, můžeme prohlásit, že tyto dva faktory se ve společné interakci projevují jako statisticky málo významné.

Tab. 16 Statistické hodnocení vlivu tepelného zpracování na hodnotách radiálního přírůstku po 96 hodinách nasákání

*

Radiální přírůstek (mm) po 96 hodinách					
Hodnocený faktor	Počet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisher's F-test	Hladina významnosti p
Abs. Člen	374,109	1	374,109	6677,545	0,000
Druh dřeviny (DD)	12,118	2	6,059	108,15	0,000
Teplota termické úpravy TT	2,896	3	0,965	17,229	0,000
DD x TT	0,822	6	0,137	2,447	0,029
chyba	6,051	108	0,056		

Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, které jsou zobrazeny v následující tabulce s označením tab. 17 je zjevné, že faktory druh dřeviny a termická modifikace jsou statisticky významné při zhodnocení přírůstků hmotnosti vzorků po 96 hodinách

nasákání. Stejně tak i vzájemná interakce těchto dvou faktorů se projevuje jako statisticky významná.

Tab. 17 Statistické hodnocení vlivu tepelného zpracování na hodnotách tangenciálního přírůstku po 96 hodinách nasákání

Tangenciální přírůstek (mm) po 96 hodinách					
Hodnocený faktor	Počet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisher's F-test	Hladina významnosti p
Abs. Člen	700,06	1	700,06	13419,97	0,000
Druh dřeviny (DD)	50,584	2	25,292	484,837	0,000
Teplota termické úpravy TT	12,391	3	4,13	79,179	0,000
DD x TT	2,892	6	0,482	9,241	0,000
chyba	5,634	108	0,052		

* Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

V případě posouzení hodnot hladiny významnosti „P“, které jsou uvedené v tab. 18 můžeme prohlásit, že druh dřeviny je faktor, který nemá statisticky významný vliv na hodnotu podélného přírůstku u vzorků při 96 hodinovém nasákání. Stejně tak i teplota termické modifikace je faktor, který není statisticky významný. Zhodnocením vzájemné interakce druhu dřeviny a teploty termické úpravy, můžeme prohlásit, že interakce těchto dvou faktorů není statisticky významná na sledovanou charakteristiku podélného přírůstku.

Tab. 18 Statistické hodnocení vlivu tepelného zpracování na hodnotách podélného přírůstku po 96 hodinách nasákání

Podélný přírůstek (mm) po 96 hodinách					
Hodnocený faktor	Počet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisher's F-test	Hladina významnosti p
Abs. Člen	161,755	1	161,755	3012,751	0,000
Druh dřeviny (DD)	0,174	2	0,087	1,623	0,202
Teplota termické úpravy TT	0,011	3	0,004	0,067	0,977
DD x TT	0,348	6	0,058	1,08	0,379
chyba	5,799	108	0,054		

* Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v následujících tabulkách.

Tab. 19 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách zvýšení přírůstku hmotnosti po 96 hodinách nasákání

Číslo buňky	Přírůstek hmotnosti (g) po 96 hodinách												
	Termická úprava (°C)	(1) 5.648	(2) 6.102	(3) 4.784	(4) 4.328	(5) 4.878	(6) 5.013	(7) 4.075	(8) 2.565	(9) 2.932	(10) 2.460	(11) 2.162	(12) 1.066
1	S 20		0,217	0,031	0,001	0,048	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	S 160	0,217		0,001	0,000	0,002	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	S 180	0,031	0,001		0,215	0,798	0,560	0,069	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	S 210	0,001	0,000	0,215		0,159	0,090	0,491	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	D 20	0,048	0,002	0,798	0,159		0,713	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	D 160	0,085	0,005	0,560	0,090	0,713		0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	D 180	0,000	0,000	0,069	0,491	0,046	0,022		0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
8	D 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,319	0,774	0,302	0,000
9	T 20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,319		0,228	0,056	0,000
10	T 160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,774	0,228		0,416	0,000
11	T 180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,302	0,056	0,416		0,004
12	T 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	

Tab. 20 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách zvýšení přírůstku objemu po 96 hodinách nasákání

Číslo buňky	Přírůstek objemu (mm ³) po 96 hodinách												
	Termická úprava (°C)	(1) 2208	(2) 2515	(3) 1956	(4) 1663	(5) 2000	(6) 1960	(7) 1831	(8) 957	(9) 885	(10) 478	(11) 592	(12) 275
1	S 20		0,001	0,009	0,000	0,022	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	S 160	0,001		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	S 180	0,009	0,000		0,002	0,642	0,964	0,164	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	S 210	0,000	0,000	0,002		0,001	0,002	0,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	D 20	0,022	0,000	0,642	0,001		0,651	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	D 160	0,009	0,000	0,964	0,002	0,651		0,176	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	D 180	0,000	0,000	0,164	0,062	0,085	0,176		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	D 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,420	0,000	0,000	0,000
9	T 20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,420		0,000	0,001	0,000
10	T 160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,203	0,024
11	T 180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,203		0,001
12	T 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,001	

Tab. 21 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách zvýšení přírůstku hustoty po 96 hodinách nasákání

Číslo buňky	Přírůstek hustoty (kg.m ³) po 96 hodinách												
	Termická úprava (°C)	(1) 326	(2) 336	(3) 312	(4) 267	(5) 245	(6) 256	(7) 198	(8) 157	(9) 188	(10) 170	(11) 144	(12) 75
1	S 20		0,719	0,627	0,047	0,009	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	S 160	0,719		0,428	0,024	0,003	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	S 180	0,627	0,428		0,107	0,027	0,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	S 210	0,047	0,024	0,107		0,455	0,683	0,023	0,000	0,010	0,002	0,000	0,000
5	D 20	0,009	0,003	0,027	0,455		0,697	0,093	0,004	0,054	0,013	0,001	0,000
6	D 160	0,021	0,009	0,056	0,683	0,697		0,050	0,001	0,026	0,005	0,000	0,000
7	D 180	0,000	0,000	0,000	0,023	0,093	0,050		0,183	0,722	0,339	0,087	0,000
8	D 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,001	0,183		0,295	0,652	0,649	0,005
9	T 20	0,000	0,000	0,000	0,010	0,054	0,026	0,722	0,295		0,505	0,155	0,000
10	T 160	0,000	0,000	0,000	0,002	0,013	0,005	0,339	0,652	0,505		0,397	0,002
11	T 180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,087	0,649	0,155	0,397		0,014
12	T 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,002	0,014	

Tab. 22 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách zvýšení radiálního přírůstku po 96 hodinách nasákání

Číslo buňky	Radiální přírůstek (mm) po 96 hodinách												
	Termická úprava (°C)	(1) 2.11	(2) 2.106	(3) 1.932	(4) 1.851	(5) 2.187	(6) 2.010	(7) 2.019	(8) 1.595	(9) 1.562	(10) 1.242	(11) 1.340	(12) 1.129
1	S 20		0,423	0,118	0,026	0,498	0,355	0,367	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	S 160	0,423		0,023	0,003	0,858	0,102	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	S 180	0,118	0,023		0,446	0,032	0,463	0,444	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000
4	S 210	0,026	0,003	0,446		0,005	0,160	0,152	0,017	0,010	0,000	0,000	0,000
5	D 20	0,498	0,858	0,032	0,005		0,131	0,137	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	D 160	0,355	0,102	0,463	0,160	0,131		0,932	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	D 180	0,367	0,110	0,444	0,152	0,137	0,932		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	D 210	0,000	0,000	0,003	0,017	0,000	0,000	0,000		0,756	0,002	0,023	0,000
9	T 20	0,000	0,000	0,001	0,010	0,000	0,000	0,000	0,756		0,004	0,038	0,000
10	T 160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,004		0,357	0,288
11	T 180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,023	0,038	0,357		0,061
12	T 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,288	0,061	

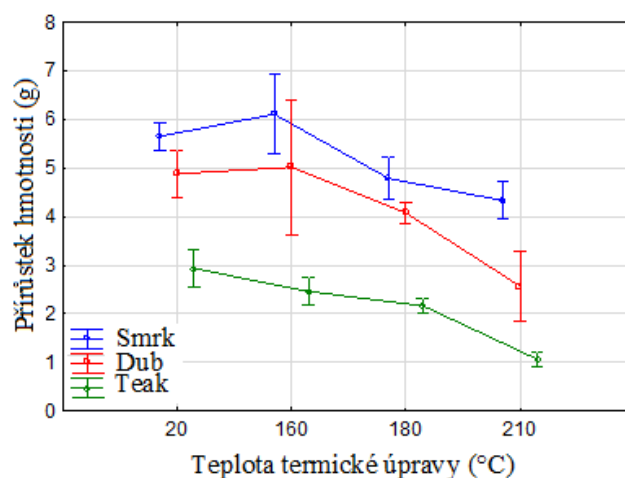
Tab. 23 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách zvýšení tangenciálního přírůstku po 96 hodinách nasákání

Číslo buňky	Tangenciální přírůstek (mm) po 96 hodinách												
	Termická úprava (°C)	(1) 3.277	(2) 3.433	(3) 2.949	(4) 2.508	(5) 2.953	(6) 3.054	(7) 2.827	(8) 1.900	(9) 1.823	(10) 1.451	(11) 1.576	(12) 1.233
1	S 20		0,130	0,003	0,000	0,003	0,031	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	S 160	0,130		0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	S 180	0,003	0,000		0,000	0,969	0,337	0,235	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	S 210	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	D 20	0,003	0,000	0,969	0,000		0,325	0,249	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	D 160	0,031	0,001	0,337	0,000	0,325		0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	D 180	0,000	0,000	0,235	0,002	0,249	0,043		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	D 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,453	0,000	0,003	0,000
9	T 20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,453		0,001	0,017	0,000
10	T 160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001		0,224	0,035
11	T 180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,017	0,224		0,002
12	T 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,002	

Tab. 24 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách zvýšení podélného přírůstku po 96 hodinách nasákání

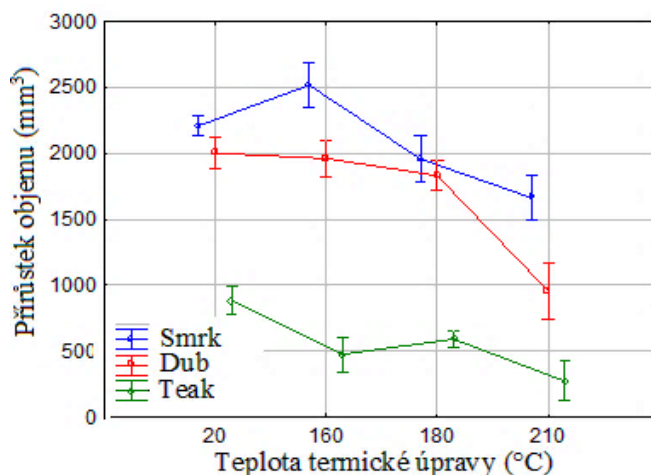
Číslo buňky	Podélný přírůstek (mm) po 96 hodinách												
	Termická úprava (°C)	(1) 1.101	(2) 1.283	(3) 1.219	(4) 1.201	(5) 1.285	(6) 1.127	(7) 1.131	(8) 1.146	(9) 1.101	(10) 1.107	(11) 1.088	(12) 1.143
1	S 20		0,147	0,347	0,421	0,145	0,823	0,804	0,720	1,000	0,958	0,901	0,732
2	S 160	0,147		0,538	0,462	0,985	0,202	0,207	0,234	0,143	0,153	0,122	0,236
3	S 180	0,347	0,538		0,864	0,553	0,448	0,459	0,512	0,342	0,362	0,300	0,512
4	S 210	0,421	0,462	0,864		0,469	0,533	0,545	0,595	0,415	0,437	0,367	0,601
5	D 20	0,145	0,985	0,553	0,469		0,201	0,208	0,240	0,142	0,153	0,120	0,239
6	D 160	0,823	0,202	0,448	0,533	0,201		0,969	0,871	0,816	0,847	0,745	0,886
7	D 180	0,804	0,207	0,459	0,545	0,208	0,969		0,893	0,797	0,830	0,726	0,908
8	D 210	0,720	0,234	0,512	0,595	0,240	0,871	0,893		0,713	0,745	0,645	0,977
9	T 20	1,000	0,143	0,342	0,415	0,142	0,816	0,797	0,713		0,954	0,907	0,725
10	T 160	0,958	0,153	0,362	0,437	0,153	0,847	0,830	0,745	0,954		0,871	0,757
11	T 180	0,901	0,122	0,300	0,367	0,120	0,745	0,726	0,645	0,907	0,871		0,658
12	T 210	0,732	0,236	0,512	0,601	0,239	0,886	0,908	0,977	0,725	0,757	0,658	

Podle obr. 52 můžeme říci, že použitá dřevina má statisticky významný vliv na sledovaný parametr přírůstku hmotnosti při nasákání. Teak nabyt nejnižších hodnot přírůstku hmotnosti. Statisticky významný pokles přírůstku hmotnosti pozorujeme u teaku při teplotě termické úpravy 210°C. Mezi přírůstky hmotnosti dubu a smrku nepozorujeme statisticky významný rozdíl u teploty termické úpravy 160°C. Na hranici statistické významnosti jsou přírůstky hmotnosti dubu a smrku při teplotách termické úpravy 180°C a přírůstky hmotnosti u vzorků neupravených. Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na přírůstek hmotnosti při nasákání není statisticky významným faktorem.



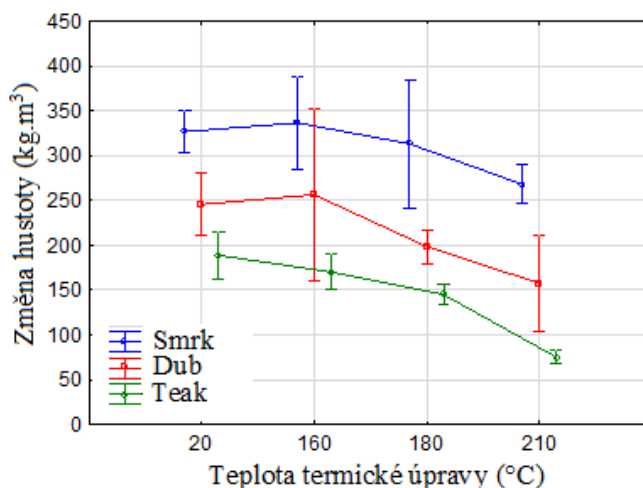
Obr. 52 Účinek dřeviny a teploty při termické modifikaci na hodnoty přírůstku hmotnosti při nasákání

Druh použité dřeviny má na hodnoty přírůstku objemu při nasákání statisticky významný vliv. U teaku sledujeme statisticky významný rozdíl v poklesu přírůstku objemu, pokud porovnáme hodnoty při 20°C a zbývajících teplot termické úpravy. U dubu je statisticky významný rozdíl viditelný v poklesu přírůstku objemu při zvýšení teploty termické úpravy na 210°C. U tepelně neupraveného dubu a upraveného teplotami 160°C a 180°C neshledáváme statisticky významný rozdíl v přírůstku objemu. U dřevin dubu a teaku je patrné, že nejvyšší přírůstky objemu získaly vzorky tepelně neupravené. U smrku pozorujeme nárůst přírůstku objemu u teploty termické úpravy 160°C. Se zvýšenou teplotou termické úpravy přichází pokles hodnot přírůstku objemu při nasákání. Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na přírůstek objemu při nasákání je statisticky významným faktorem.



Obr. 53 Účinek dřeviny a teploty při termické modifikaci na hodnoty přírůstek objemu při nasákání

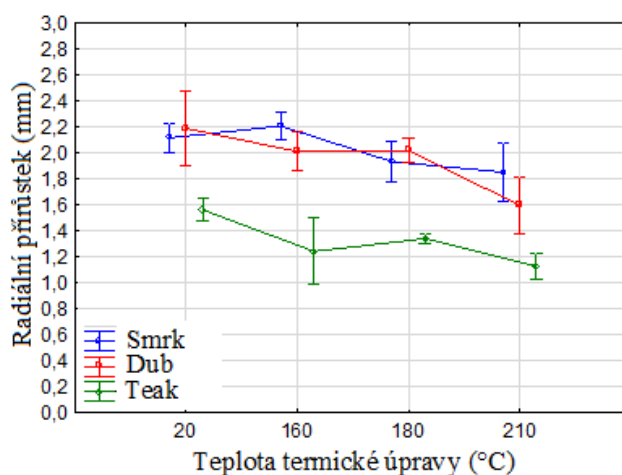
Druh použité dřeviny má statisticky významný vliv na změnu hustoty při nasákání. Stejně tak i teplota termické úpravy má statisticky významný vliv na změnu hustoty při nasákání. Nejnižší průměrné hodnoty hustoty jsou vidět na obr. 54 u teaku. Se zvyšováním teploty termické úpravy hustota u teaku klesá. Významný statistický rozdíl vidíme při zvýšení teploty termické úpravy na 210°C. U smrku a dubu můžeme říci, že se vzrůstajícími teplotami termické úpravy se neprojevil statisticky významný rozdíl ve změně hustoty. Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na změnu hustoty při nasákání není statisticky významným faktorem.



Obr. 54 Účinek dřeviny a teploty při termické modifikace na hodnoty změny hustoty při nasákání

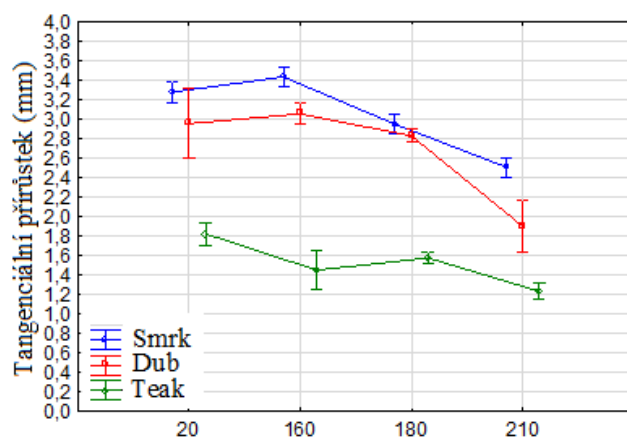
Druh použité dřeviny má statisticky významný vliv na radiální přírůstek při nasákání. Stejně tak i teplota termické úpravy má statisticky významný vliv na změnu

radiálního přírůstku při nasákání. Z obr. 55 vidíme, že teak nabyl nejmenším radiálních přírůstků během nasákání. Pokud zhodnotíme výsledné radiální přírůstky u smrku a dubu, můžeme říct, že mezi těmito dřevinami nenastal významný statistický rozdíl. Statisticky významný rozdíl je patrný ve srovnání dubu a smrku s výslednými hodnotami radiálních přírůstků teaku. Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na radiální přírůstek při nasákání můžeme prohlásit za statisticky málo významný.



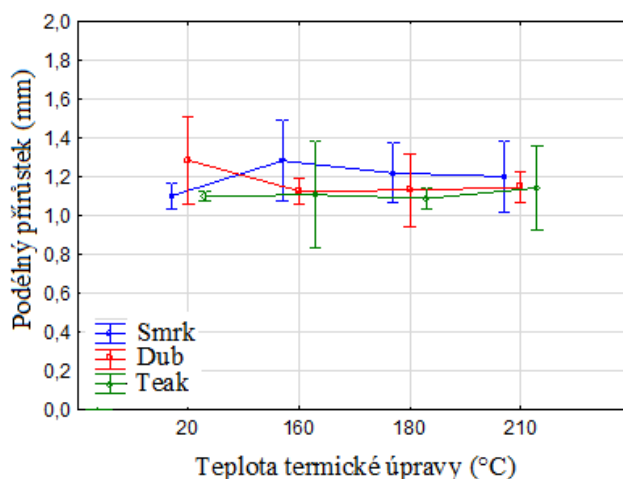
Obr. 55 Účinek dřeviny a teploty při termické modifikaci na hodnoty radiálního přírůstku při nasákání

Druh použité dřeviny má statisticky významný vliv na tangenciální přírůstek při nasákání. Stejně tak i teplota termické úpravy má statisticky významný vliv na změnu tangenciálního přírůstku. U dubu a smrku sledujeme mírný nárůst tangenciálního přírůstku při tepelné úpravě z 20°C na 160°C. Poté dochází se zvyšující se teplotou k poklesu tangenciálního přírůstku u obou dřevin. U smrku je tento pokles statisticky významný. U dubu je statisticky významný pokles tangenciálního přírůstku patrný při zvýšení teploty termické úpravy ze 180°C na 210°C. Mezi průměrnými hodnotami tangenciálního přírůstku u teaku se neprojevil statisticky významný rozdíl u teplot termické úpravy 160°C, 180 a 210°C. Statisticky významný rozdíl tangenciálních přírůstků je patrný u teaku při zvyšování teplot termické úpravy z 20°C. Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na tangenciální přírůstek při nasákání můžeme prohlásit za statisticky významný.



Obr. 56 Účinek dřeviny a teploty při termické modifikaci na hodnoty tangenciálního přírůstku při nasákání

Z obr. 57 je patrné, že druh použité dřeviny nemá statisticky významný vliv na podélný přírůstek při nasákání. Stejně tak i teplota termické úpravy nemá statisticky významný vliv na změnu podélného přírůstku při nasákání. U teaku se hodnoty podélného přírůstku se změnami teploty termické úpravy téměř nemění, můžeme proto prohlásit, že u teaku se neprojevil statisticky významný rozdíl. To samé platí i pro dub a smrk. Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na podélný přírůstek při nasákání můžeme prohlásit za statisticky nevýznamný.



Obr. 57 Účinek dřeviny a teploty při termické modifikaci na hodnoty podélného přírůstku při nasákání

6.1.3 Vyhodnocení výsledků tvrdosti podle Brinella

Na základě naměřených hodnot jsou v této části zpracovány všechny výsledky měření, převážně v podobě obrázků a tabulek, které znázorňují působení faktorů na tvrdost dřeva.

tab. 25 tab.25 uvádí průměrné hodnoty naměřených tvrdostí a hustoty, stejně tak je uveden příslušný variační koeficient.

Následující obrázky představují data při působení faktorů jak samostatně, tak i více faktorů najednou ve vzájemné spojitosti.

Tab. 25 Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella

Druh dřeviny	Tepelná úprava (°)	Tvrdost podle Brinella (Mpa)	Hustota (Kg/m ³)
Smrk	20	14,0 (17,3)	445 (5,39)
Smrk	160	14,3 (19,9)	449 (4,45)
Smrk	180	14,2 (18,4)	467 (1,96)
Smrk	210	14,2 (13,6)	461 (4,94)
Teak	20	54,0 (12,3)	651 (1,57)
Teak	160	55,7 (12,6)	588 (2,97)
Teak	180	54,9 (12,6)	525 (24,17)
Teak	210	53,8 (8,9)	572 (26,67)
Dub	20	54,7 (10,6)	747 (5,29)
Dub	160	58,4 (7,1)	753 (14,49)
Dub	180	58,4 (9,4)	722 (4,76)
Dub	210	51,5 (12,0)	687 (3,67)

* Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %

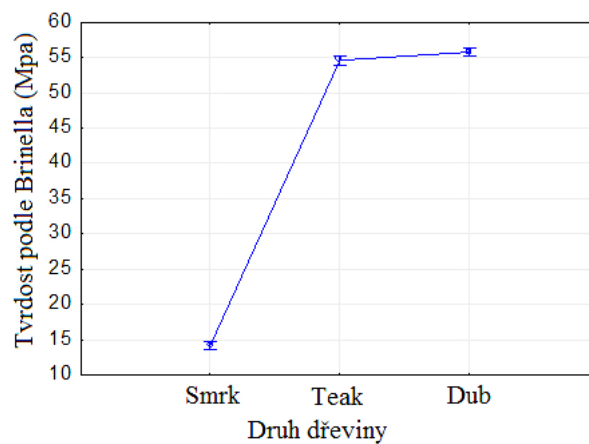
V tab. 26 je uvedena významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny stejně tak jako termická úprava mají statisticky velmi významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky. Významným účinkem se projevila i interakce obou sledovaných faktorů.

Tab. 26 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na tvrdost podle Brinella

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Abs. člen	1240798	1	1240798	48320,485	0,000
Druh dřeviny	269140	2	134570	5240,569	0,000
Termická úprava	1069	3	356	13,878	0,000
Druh dřeviny* Termická úprava	1072	6	179	6,958	0,000
Chyba	18180	708	26		

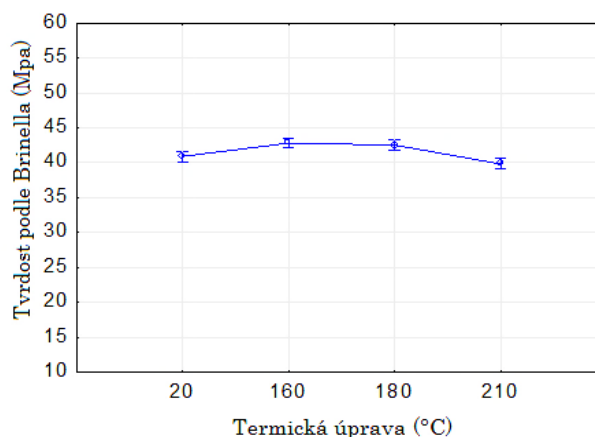
* Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Na obr. 58 je zobrazen vliv druhu dřeviny na tvrdost podle Brinella. Z uvedených hodnot je evidentní, že nejnižší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u smrku, ty byly v průměru o 70% nižší než hodnoty naměřené pro dub a teak. Naměřená data ukazují hodnoty smrku kolem 14 MPa, což odpovídá skupině měkkých dřev (<40 Mpa). Dub a teak dosahují podobných hodnot, nicméně hodnoty tvrdosti vyšly ve prospěch dubu, který má z těchto dřevin největší odpor proti vnikání tělesa. Rozdíl hodnot naměřených na teaku byl v porovnání s hodnotami naměřenými na dubu na hranici statistické významnosti. Vyšší hodnoty byly naměřeny na dubu. Obě dřeviny díky podobným hodnotám tvrdosti spadají do skupiny středně tvrdých dřev, kde se hodnoty tvrdosti pohybují v rozmezí 41-80 Mpa.



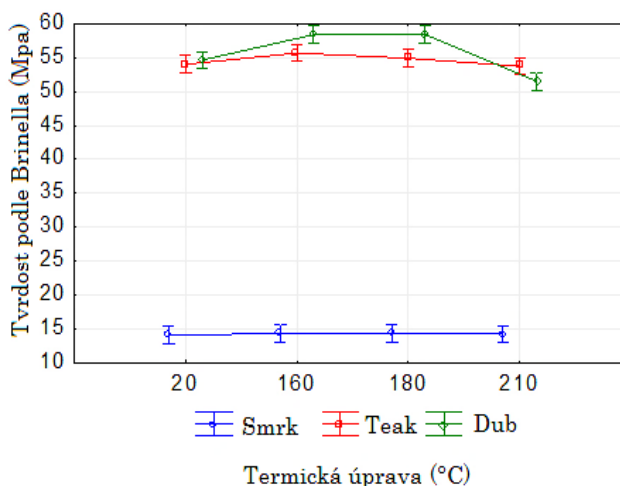
Obr. 58 Vliv druhu dřeviny na tvrdost podle Brinella

Dalším sledovaným faktorem byla teplota použitá při termické úpravě zkušebních těles. Z údajů na obr. 59 vidíme, že rozdíl teplot použitých při tepelné modifikaci je na hranici statistické významnosti, což je v rozporu s hodnotami statistické významnosti uvedených v tab. 26. Obr. 59 znázorňuje průměrné hodnoty všech zkoumaných dřevin, a proto se vliv teploty termické úpravy jeví jako nevýznamný. Statistickou významnost teplot termické úpravy nám potvrzuje i Duncanův test uvedený v tab. 27.



Obr. 59 Vliv teploty termické úpravy na tvrdost podle Brinella

Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na tvrdost dřeva je znázorněn na obr. 60. Mezi termicky upravenými vzorky se projevil statisticky velice významný rozdíl, konkrétně smrku vůči dubu s teakem. Hodnoty tvrdosti smrku se s tepelnou úpravou téměř nemění. Můžeme tedy zkonstatovat, že mezi teplotami úprav vzorků se neprojevil statisticky významný rozdíl. Toto lze říci i o výsledcích teaku, u nichž se též neprojevil statisticky významný rozdíl. Výsledky dubu ukazují, že hodnoty tvrdosti v závislosti na teplotě termické úpravy se pohybují na hranici statistické významnosti až významné statistické významnosti.



Obr. 60 Interakce obou sledovaných faktorů působení termické úpravy a druhu dřeviny na tvrdost podle Brinella

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v tab. 27.

Tab. 27 Srovnání účinků jednotlivých faktorů při použití Duncana test na hodnotách tvrdosti podle Brinella

Tvrdość podle Brinella HBW (MPa)														
Číslo buňky			(1) 14,008	(2) 14,296	(3) 14,237	(4) 14,173	(5) 54,031	(6) 55,704	(7) 54,919	(8) 53,760	(9) 54,658	(10) 58,406	(11) 58,435	(12) 51,527
1	S	20		0,782	0,818	0,859	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	S	160	0,782		0,950	0,902	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	S	180	0,818	0,950		0,944	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	S	210	0,859	0,902	0,944		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	T	20	0,000	0,000	0,000	0,000		0,099	0,370	0,770	0,498	0,000	0,000	0,009
6	T	160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,099		0,396	0,060	0,290	0,003	0,004	0,000
7	T	180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,370	0,396		0,259	0,778	0,000	0,000	0,001
8	T	210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,770	0,060	0,259		0,364	0,000	0,000	0,016
9	D	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,498	0,290	0,778	0,364		0,000	0,000	0,001
10	D	160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000		0,975	0,000
11	D	180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,975		0,000
12	D	210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,001	0,016	0,001	0,000	0,000	

6.1.4 Vyhodnocení výsledků pevnosti v tlaku

Na základě naměřených hodnot jsou v této části zpracovány naměřené výsledky pevnosti v tlaku ve směru vláken a napříč vláken v radiálním a tangenciálním směru. Všechny výsledky měření jsou uvedeny převážně v podobě obrázků a tabulek, které znázorňují působení faktorů na pevnost dřeva v tlaku.

Tab. 28 Hodnoty pevnosti v tlaku ve směru vláken a napříč vláken

Druh dřeviny	Termická úprava (°C)	Pevnost v tlaku podél vláken (MPa)	Pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru (MPa)	Pevnost v tlaku napříč vláken v radiálním směru (MPa)	Hustota (Kg/m ³)
Smrk	20	55 (7,7)	7 (14,5)	4 (11,1)	445 (5,39)
Smrk	160	58 (10,2)	6 (13,5)	5 (14,7)	449 (4,45)
Smrk	180	49 (15,0)	5 (12,1)	5 (14,9)	467 (1,96)
Smrk	210	56 (9,6)	5 (21,9)	3 (17,6)	461 (4,94)
Teak	20	58 (5,0)	14 (5,2)	11 (13,7)	651 (1,57)
Teak	160	71 (9,7)	16 (4,2)	15 (15,0)	588 (2,97)
Teak	180	75 (12,0)	15 (16,4)	15 (8,8)	525 (24,17)
Teak	210	71 (14,8)	14 (14,4)	13 (12,9)	572 (26,67)
Dub	20	95 (9,1)	19 (14,6)	13 (18,9)	747 (5,29)
Dub	160	76 (10,4)	19 (14,1)	12 (7,0)	753 (14,49)
Dub	180	95 (3,6)	17 (15,2)	12 (6,9)	722 (4,76)
Dub	210	69 (17,0)	13 (10,9)	9 (9,9)	687 (3,67)

* Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %

Tab. 29 tab.29 je uvedena významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr.

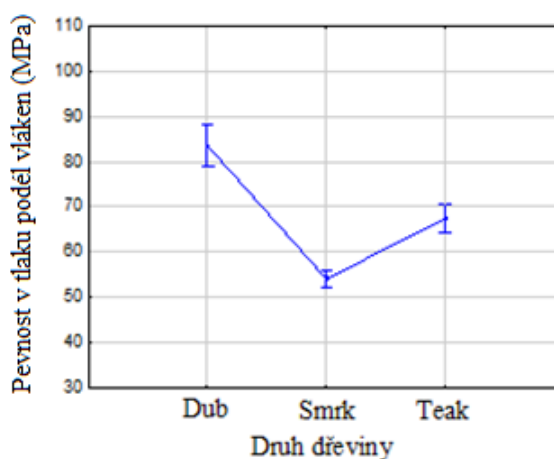
Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny je statisticky velmi významný faktor pro pevnost v tlaku podél vláken. Teplota termické úpravy je faktorem statisticky středně významným. Velmi významným účinkem se projevila interakce obou sledovaných faktorů.

Tab. 29 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na pevnost v tlaku podél vláken

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Abs. člen	682397,054	1	682397,054	8630,34	0,000
Druh dřeviny	18960,321	2	9480,161	119,896	0,000
Termická úprava	1238,038	3	412,679	5,219	0,002
Druh dřeviny* Termická úprava	7050,776	6	1175,129	14,862	0,000
Chyba	11069,736	140	79,07		

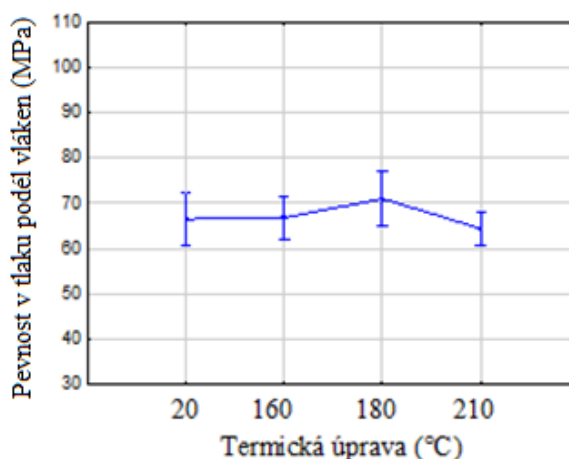
Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Podle obr. 61 vidíme, že nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku podél vláken dosáhl dub, svými výslednými hodnotami převýšil i teak, smrk až několikanásobně.



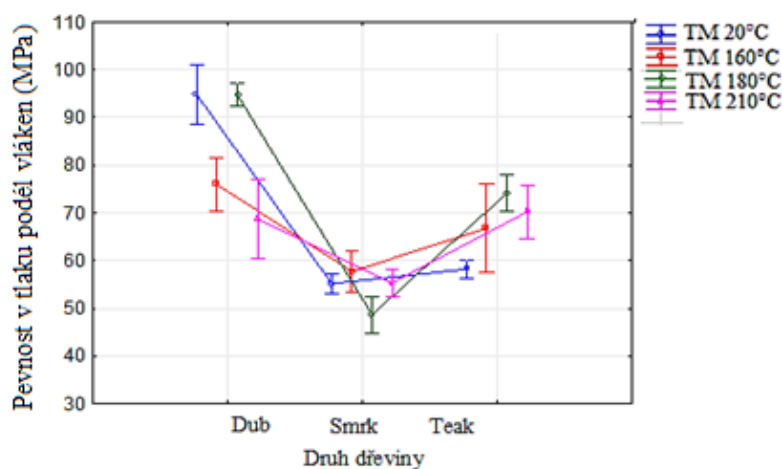
Obr. 61 Vliv druhu dřeviny na hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken

Z obr. 62 můžeme zkonstatovat, že faktor teploty termické úpravy na výsledné hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken se z grafického zobrazení projevil jako faktor nevýznamný. V porovnání s tab. 29, která nám říká, že teplota termické úpravy je faktorem středně významným. Jelikož graf znázorňuje průměrné hodnoty všech dřevin, jeví se proto jako faktor statisticky nevýznamný.



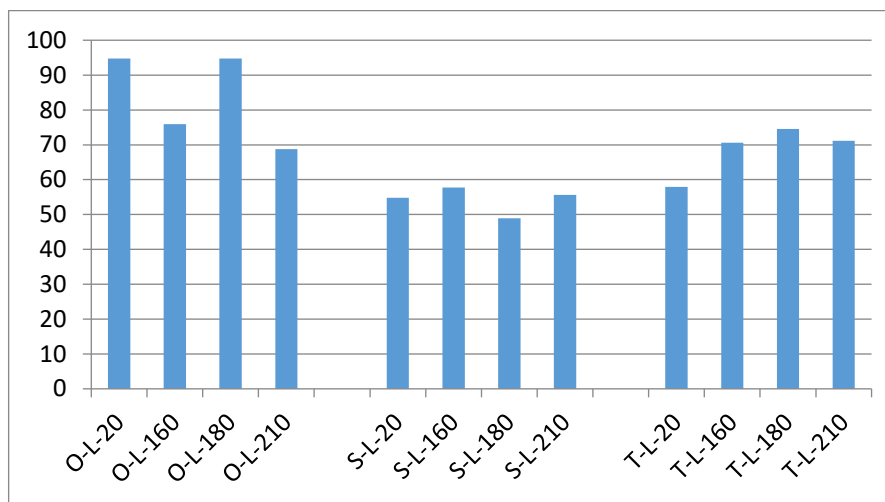
Obr. 62 Vliv teploty termické úpravy na hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken

Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na pevnost v tlaku podél vláken je znázorněn na Obr. 63. Mezi termicky upravenými vzorky se projevil statisticky významný rozdíl, konkrétně smrku vůči dubu s teakem. Hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken se u smrku s tepelnou úpravou téměř nemění, pokles je zaznamenán pouze u teploty termické úpravy 180°C, což můžeme vidět na obr.63. Můžeme zkonstatovat, že mezi teplotními úpravami vzorků dubu se projevil statisticky významný rozdíl. Vliv teploty termické úpravy je u vzorků smrku na hranici statistické významnosti. Stejně tak teak nevykazuje výrazný vliv teploty termické úpravy na výsledné hodnoty. Významný vliv má ovšem teplota úpravy u dubu při srovnání termické úpravy 20°C a 210°C, zde je viditelný výrazný pokles hodnot pevnosti v tlaku podél vláken. Výsledné hodnoty teaku ukazují vylepšenou tlakovou pevnost ve směru vláken u vzorků, které prošly termickou úpravou 160°C a 210°C o 22,4%, při 180°C dokonce o 29,3% proti vzorkům neupraveným.



Obr. 63 Společné působení druhu dřeviny a termické úpravy na pevnost v tlaku podél vláken

Grafické srovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru testovaných dřevin v závislosti na teplotě termické úpravy je zaneseno v obr. 64.



Obr. 64 Porovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku ve směru vláken

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zobrazeny v tab. 30.

Tab. 30 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken

Pevnost v tlaku podél vláken													
Číslo buňky		(1) 94,749	(2) 75,924	(3) 94,785	(4) 68,751	(5) 55,201	(6) 57,707	(7) 48,673	(8) 55,362	(9) 58,205	(10) 66,811	(11) 74,107	(12) 70,209
1	D 20		0,000	0,992	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	D 160	0,000		0,000	0,069	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,614	0,135
3	D 180	0,992	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	D 210	0,000	0,069	0,000		0,000	0,004	0,000	0,000	0,005	0,591	0,162	0,686
5	S 20	0,000	0,000	0,000	0,000		0,517	0,070	0,965	0,456	0,003	0,000	0,000
6	S 160	0,000	0,000	0,000	0,004	0,517		0,020	0,515	0,890	0,016	0,000	0,001
7	S 180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,070	0,020		0,079	0,016	0,000	0,000	0,000
8	S 210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,965	0,515	0,079		0,462	0,003	0,000	0,000
9	T 20	0,000	0,000	0,000	0,005	0,456	0,890	0,016	0,462		0,017	0,000	0,002
10	T 160	0,000	0,022	0,000	0,591	0,003	0,016	0,000	0,003	0,017		0,064	0,378
11	T 180	0,000	0,614	0,000	0,162	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,064		0,280
12	T 210	0,000	0,135	0,000	0,686	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,378	0,280	

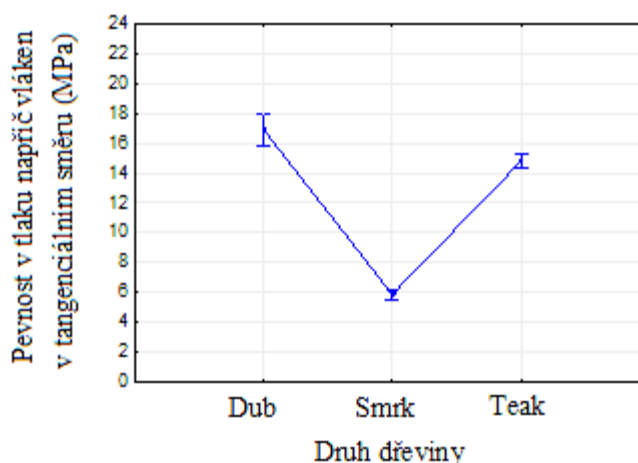
V tab. 31 je uvedena významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny a teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky. Významným účinkem se projevila interakce obou sledovaných faktorů.

Tab. 31 Statistické zhodnocení vlivu faktorů pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru v tangenciálním směru

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Abs. člen	22560,978	1	22560,978	8026,963	0,000
Druh dřeviny	3185,99	2	1592,995	566,771	0,000
Termická úprava	182,811	3	60,937	21,681	0,000
Druh dřeviny* Termická úprava	148,695	6	24,782	8,817	0,000
Chyba	385,059	137	2,811		

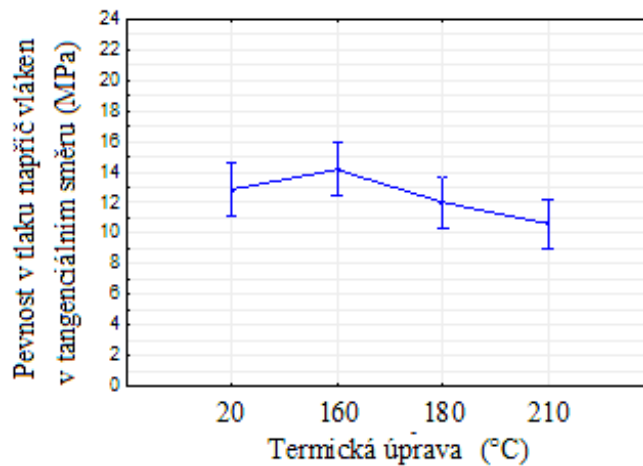
Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

V testování pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru vyšel opět s nejlepšími hodnotami meze pevnosti dub (obr. 65). Nicméně v porovnání s teakem nejsou rozdíly ve výsledcích tak velké, jako když srovnáme tyto dvě dřeviny v pevnostech v tlaku ve směru vláken. I tak můžeme říci, že druh dřeviny je v tomto případě statisticky významný.



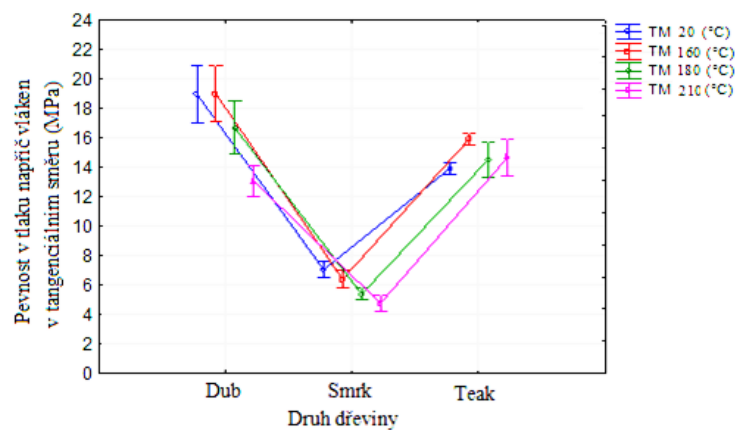
Obr. 65 Vliv druhu dřeviny na pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru

Termická úprava při 160°C se dle obr. 66 jeví jako nejlepší úprava pro vzorky zatěžované v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru. Po statistické stránce se však teplota nejeví jako příliš významný faktor na pevnost v tlaku napříč vláken.



Obr. 66 Vliv teploty termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vlákén v tangenciálním směru

Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na pevnost v tlaku napříč vlákén v tangenciálním směru na obr. 67. Mezi termicky upravenými vzorky se projevily statisticky velice významný rozdíl, konkrétně u smrku vůči dubu s teakem. Hodnoty pevnosti v tlaku napříč vlákén v tangenciálním směru u smrku se vzrůstající teplotou tepelné úpravou klesají, nicméně se mezi nimi neprojevily statisticky významný rozdíl. Stejně tak se neprojevily statisticky významný rozdíl termických úprav na výsledných hodnotách pevnosti v tlaku napříč vlákén v tangenciálním směru, jak na vzorcích dubu, tak teaku.



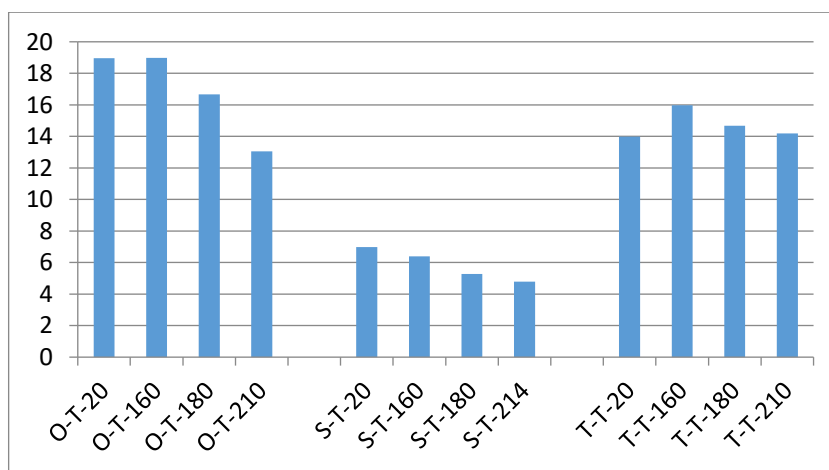
Obr. 67 Společné působení druhu dřeviny a termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vlákén

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v tab. 32.

Tab. 32 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru

Pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru														
Číslo buňky			(1) 18.956	(2) 18.976	(3) 16.670	(4) 13.047	(5) 7.0445	(6) 6.3998	(7) 5.3871	(8) 4.7631	(9) 13.932	(10) 15.903	(11) 14.511	(12) 14.647
1	D	20		0.976	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	D	160	0.976		0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	D	180	0.001	0.001		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.263	0.003	0.004
4	D	210	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.196	0.000	0.042	0.031
5	S	20	0.000	0.000	0.000	0.000		0.346	0.021	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
6	S	160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.346		0.139	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000
7	S	180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.139		0.362	0.000	0.000	0.000	0.000
8	S	210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.022	0.362		0.000	0.000	0.000	0.000
9	T	20	0.000	0.000	0.000	0.196	0.000	0.000	0.000	0.000		0.007	0.397	0.328
10	T	160	0.000	0.000	0.263	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007		0.054	0.066
11	T	180	0.000	0.000	0.003	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.397	0.054		0.844
12	T	210	0.000	0.000	0.004	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.066	0.844	

Grafické srovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru testovaných dřevin v závislosti na teplotě termické úpravy je zaneseno v obr. 68.



Obr. 68 Porovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru

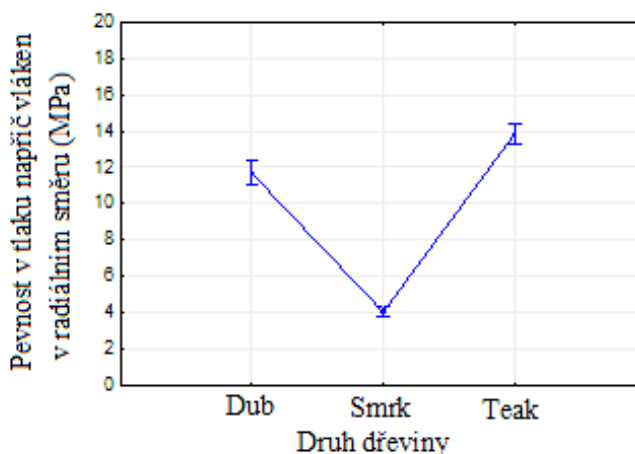
Tab. 33 ukazuje významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny a teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky. Významným účinkem se projevila také interakce obou sledovaných faktorů.

Tab. 33 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na pevnost v tlaku napříč vláken v radiálních směru

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Abs. člen	14104,628	1	14104,628	7055,901	0,000
Druh dřeviny	2687,429	2	1343,715	672,199	0,000
Termická úprava	94,743	3	31,581	15,799	0,000
Druh dřeviny* Termická úprava	130,977	6	21,829	10,92	0,000
Chyba	279,858	140	1,999		

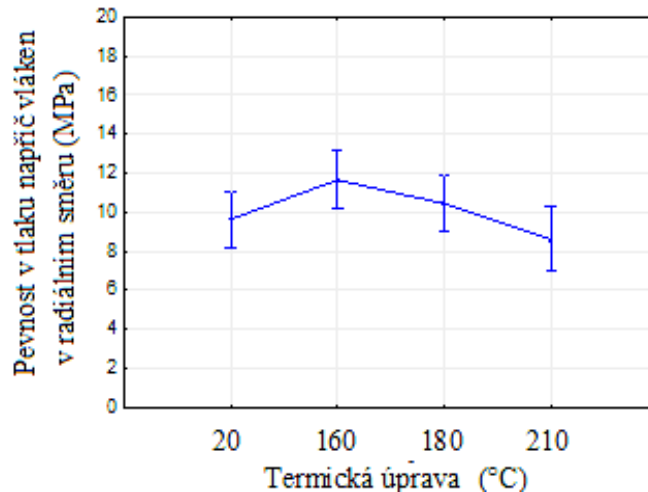
Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

V zatěžování dřevin v tlaku napříč vláken v radiálním směru vyšel nejlépe teak (obr. 69). Opět však není mezi výsledky teaku a dubu příliš výrazný rozdíl. Nicméně použitá dřevina je pro posuzování tlaku napříč vláken v radiálním směru statisticky velmi významnou. Nejmenší hodnoty byly naměřeny u smrkových vzorků, tyto hodnoty jsou navíc nejmenšími naměřenými hodnotami celého testování pevnosti v tlaku.



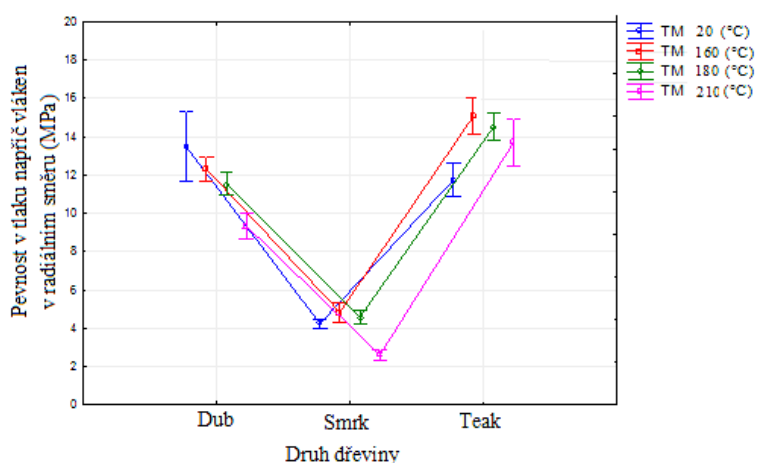
Obr. 69 Vliv druhu dřeviny na pevnost v tlaku napříč vláken v radiálních směru

Pokud srovnáme hodnoty hladiny významnosti „P“ uvedené v tab. 33 s grafickým znázorněním uvedeným na obr. 70, hodnoty v tabulce ukazují, že teplota termické úpravy má statisticky významný vliv na výsledné hodnoty pevnosti v tlaku napříč vláken v radiálním směru. Grafické znázornění naopak ukazuje, že teplota není statisticky významným faktorem. Nicméně graf na obr. 70 znázorňuje průměrné hodnoty všech dřevin, a proto se teplota termické modifikace jeví jako statisticky nevýznamný faktor. Avšak vyhodnocením Duncanova testu (tab. 34) dokazujeme, že teplota termické úpravy je statisticky významným faktorem pro výsledné hodnoty pevnosti v tlaku napříč vláken v radiálním směru.



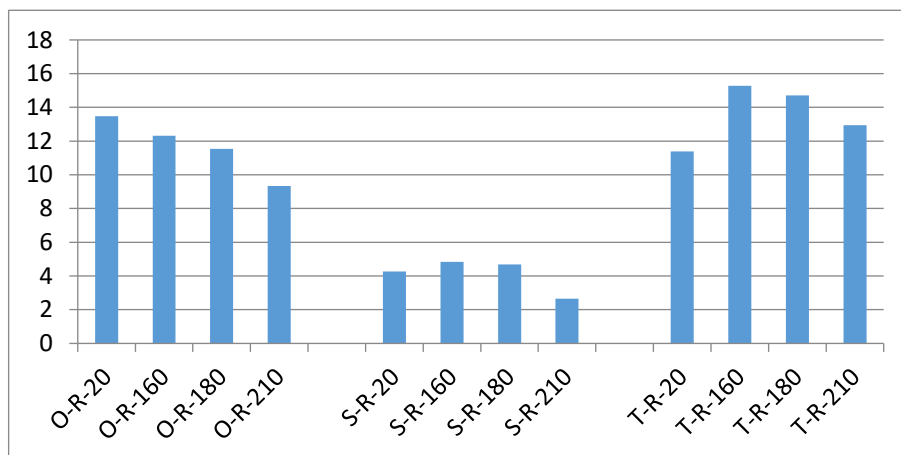
Obr. 70 Vliv teploty termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vlákny v radiálním směru

Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na pevnost v tlaku napříč vlákny v radiálním směru je znázorněn na obr. 71. Mezi termicky upravenými vzorky se projevil statisticky velice významný rozdíl, konkrétně smrku vůči dubu s teakem. Na hodnoty pevnosti v tlaku napříč vlákny v radiálním směru se u smrku a dubu se vzrůstající teplotou tepelné úpravy z 20°C na 160°C a následně na 180°C neprojevil statisticky významný rozdíl. Statisticky významný rozdíl se však projevil u těchto dvou dřevin se vzrůstající teplotou termické úpravy ze 180°C na 210°C, kdy výsledné hodnoty pevnosti v obou případech poklesly. Stejně tak se neprojevil statisticky významný rozdíl termických úprav teaku při 160°C, 180°C a 210°C na výsledných hodnotách pevnosti v tlaku napříč vlákny v tangenciálním směru.



Obr. 71 Společné působení druhu dřeviny a termické úpravy na pevnost v tlaku napříč vlákny v radiálním směru

Grafické srovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru testovaných dřevin v závislosti na teplotě termické úpravy je zaneseno v obr. 72.



Obr. 72 Porovnání výsledných hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v radiálním směru

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v tab. 34.

Tab. 34 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty pevnosti v tlaku napříč vláken v radiálním směru

Pevnost v tlaku napříč vláken v radiálním směru (MPa)													
Číslo buňky	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
	18.956	18.976	16.670	13.047	7.0445	6.3998	5.3871	4.7631	13.932	15.903	14.511	14.647	
1	D	20	0.044	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.009	0.088	0.705
2	D	160	0.044	0.203	0.000	0.000	0.000	0.000	0.320	0.000	0.000	0.000	0.022
3	D	180	0.001	0.203	0.000	0.000	0.000	0.000	0.718	0.000	0.000	0.000	0.000
4	D	210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	S	20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.327	0.547	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
6	S	160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.327	0.657	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	S	180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.547	0.657	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
8	S	210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	T	20	0.004	0.320	0.718	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
10	T	160	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.320	0.021	0.021
11	T	180	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.320	0.155	0.155
12	T	210	0.705	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.021	0.155	0.155

6.1.5 Vyhodnocení výsledků rázové houževnatosti

Na základě získaných hodnot jsou v této kapitole zpracovány naměřené výsledky rázové houževnatosti dřeva. Všechny výsledky měření jsou uvedeny převážně v podobě obrázků a tabulek, které znázorňují působení faktorů na rázovou houževnatost.

V následující tabulce jsou zaznamenány průměrné hodnoty měření rázové houževnatosti pro určitou dřevinu, hustoty a teplota termické úpravy, kterou byly soubory vzorků upraveny.

Tab. 35 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na teplotě, druhu dřeviny a hustotě

Druh dřeviny	Termická úprava (°C)	Rázová houževnatost (J/cm ²)	Hustota (Kg/m ³)
Smrk	20	6,4 (19,4)	445 (5,39)
Smrk	160	8,4 (15,5)	449 (4,45)
Smrk	180	5,2 (30,3)	467 (1,96)
Smrk	210	3,9 (31,5)	461 (4,94)
Teak	20	2,3 (35,7)	651 (1,57)
Teak	160	3,9 (19,6)	588 (2,97)
Teak	180	3,9 (28,7)	525 (24,17)
Teak	210	3,5 (30,9)	572 (26,67)
Dub	20	6,2 (28,4)	747 (5,29)
Dub	160	7,9 (30,9)	753 (14,49)
Dub	180	4,1 (37,2)	722 (4,76)
Dub	210	4,1 (30,2)	687 (3,67)

* Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %

V tab. 36 je uvedena významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny a teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky. Významným účinkem se projevila také interakce obou sledovaných faktorů.

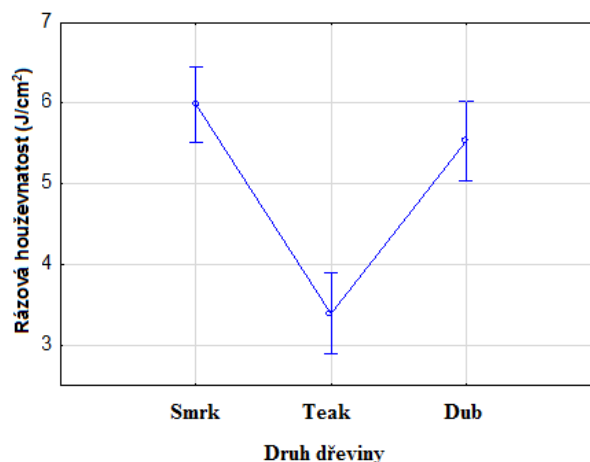
Tab. 36 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na rázovou houževnatost

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Absolutní člen	3457,838	1	3457,838	1220,251	0,000
Druh dřeviny	176,642	2	88,321	31,168	0,000
Termická úprava	161,349	3	53,783	18,98	0,000
Druh dřeviny* Termická úprava	97,882	6	16,314	5,757	0,000
Chyba	279,858	140	1,999		

* Hladina významnosti byla akceptována na P<0,01

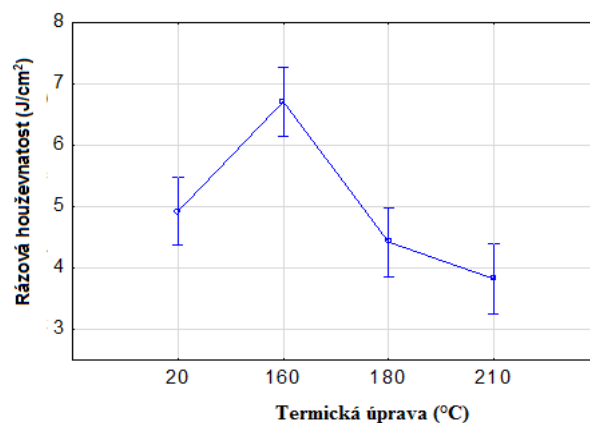
Jak můžeme vidět na obr. 73 druh dřeviny je pro měření rázové houževnatosti dřeva statisticky velice významný. Celkově největších hodnot při zkoušení rázové houževnatosti na Charpyho kladivě dosáhl smrk. Dub dosáhl hodnot nižších než smrk, ovšem teak nabyl ze všech tří zkoušených dřevin nejnižších hodnot. Mezi výslednými průměrnými hodnotami rázové houževnatosti smrku a dubu se neprojevil statisticky

významný rozdíl. Statisticky významný rozdíl se projevil, pokud srovnáme výsledné hodnoty teaku s výslednými hodnotami smrku a dubu. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro teak jsou o 43,1% menší oproti hodnotách smrku a o 39,01% menší vůči hodnotám dubu.



Obr. 73 Vliv druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti

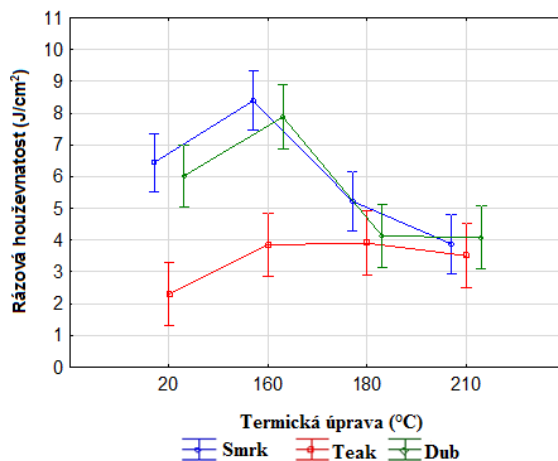
Z obr. 74 vidíme, že teplota termické úpravy je pro měření rázové houževnatosti dřeva statisticky velice významná. Zkušební vzorky s termickou úpravou teplotou 160°C vykazují u všech dřevin největších dosažených hodnot rázové houževnatosti. Při srovnání výsledných hodnot získaných při teplotách 20°C, 180°C a 210°C se neprojevil statisticky významný rozdíl.



Obr. 74 Vliv teploty termické úpravy na hodnoty rázové houževnatosti

Synergický efekt termické úpravy a druhu dřeviny na rázovou houževnatost je znázorněn na obr. 75. Je patrné, že například u teaku teplota termické úpravy neprojevila statisticky významný rozdíl na výsledné hodnoty rázové houževnatosti. Dub a Smrk mají výsledné hodnoty rázové houževnatosti obdobné. Mezi těmito dřevinami nepanuje statisticky významný rozdíl. Smrk a dub vykazují nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti

při teplotě termické úpravy 160°C, poté dochází u obou dřevin k významnému poklesu. Nicméně mezi výslednými průměrnými hodnotami všech třech dřevin u termické úpravy 180°C a 210°C se neprojevil statisticky významný rozdíl.



Obr. 75 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v tab. 37.

Tab. 37 Srovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnoty rázové houževnatosti

Rázová houževnatost													
Číslo buňky		(1) 6,4380	(2) 8,3917	(3) 5,2275	(4) 3,8763	(5) 2,2989	(6) 3,8507	(7) 3,9044	(8) 3,5078	(9) 6,0171	(10) 7,8782	(11) 4,1305	(12) 4,0821
1	S 20		0,007	0,101	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,546	0,039	0,002	0,002
2	S 160	0,007		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,461	0,000	0,000
3	S 180	0,101	0,000		0,084	0,000	0,084	0,083	0,031	0,257	0,000	0,115	0,121
4	S 210	0,001	0,000	0,084		0,037	0,971	0,968	0,622	0,005	0,000	0,745	0,783
5	T 20	0,000	0,000	0,000	0,037		0,034	0,038	0,083	0,000	0,000	0,021	0,022
6	T 160	0,001	0,000	0,084	0,971	0,034		0,943	0,623	0,005	0,000	0,728	0,767
7	T 180	0,001	0,000	0,083	0,968	0,038	0,943		0,611	0,005	0,000	0,763	0,799
8	T 210	0,000	0,000	0,031	0,622	0,083	0,623	0,611		0,001	0,000	0,447	0,474
9	D 20	0,546	0,001	0,257	0,005	0,000	0,005	0,005	0,001		0,010	0,009	0,009
10	D 160	0,039	0,461	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010		0,000	0,000
11	D 180	0,002	0,000	0,115	0,745	0,021	0,728	0,763	0,447	0,009	0,000		0,945
12	D 210	0,002	0,000	0,121	0,783	0,022	0,767	0,799	0,474	0,009	0,000	0,945	

6.1.6 Vyhodnocení výsledků ohybových charakteristik

Na základě získaných hodnot jsou v této kapitole zpracovány naměřené výsledky ohybových charakteristik. Všechny výsledky měření jsou uvedeny převážně v podobě obrázků a tabulek, které znázorňují působení faktorů na ohybové charakteristiky.

V následující tabulce jsou zaznamenány průměrné hodnoty modulu pružnosti pro určitou dřevinu, hustoty a teplota termické úpravy, kterou byly soubory vzorků upraveny.

Tab. 38 Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na teplotě, druhu dřeviny a hustotě

Druh dřeviny	Termická úprava (°C)	Modul pružnosti (Mpa)	Hustota (Kg/m ³)
Smrk	20	10057 (9,4)	445 (5,39)
Smrk	160	10341 (9,2)	449 (4,45)
Smrk	180	9922 (7,3)	467 (1,96)
Smrk	210	9337 (8,7)	461 (4,94)
Teak	20	9149 (11,3)	651 (1,57)
Teak	160	9834 (15,8)	588 (2,97)
Teak	180	10175 (14,2)	525 (24,17)
Teak	210	9028 (13,8)	572 (26,67)
Dub	20	11151 (14,1)	747 (5,29)
Dub	160	12136 (12,9)	753 (14,49)
Dub	180	10552 (12,8)	722 (4,76)
Dub	210	9733 (10,4)	687 (3,67)

* Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %

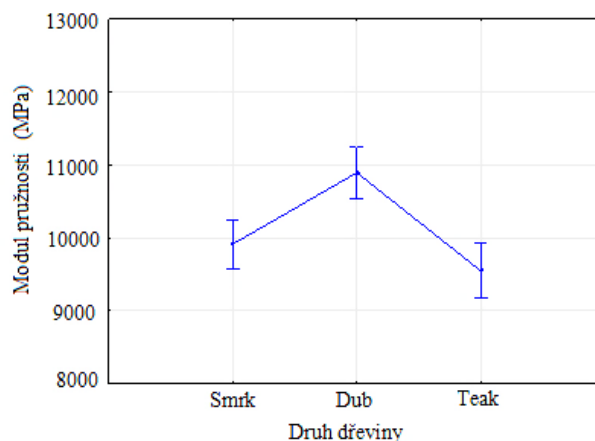
V tab. 39 je uvedena významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny a teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky. Interakce obou sledovaných faktorů se však neprojevila jako statisticky významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky.

Tab. 39 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na modul pružnosti

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Abs. člen	1,39E+10	1	1,39E+10	9517,95	0,000
Druh dřeviny	4,30E+07	2	2,15E+07	14,713	0,000
Termická úprava	3,36E+07	3	1,12E+07	7,667	0,000
Druh dřeviny* Termická úprava	1,70E+07	6	2,83E+06	1,937	0,080
Chyba	1,83E+08	125	1,46E+06		

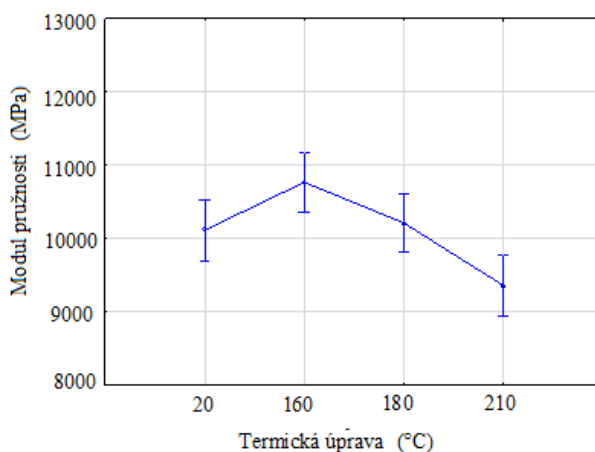
* Hladina významnosti byla akceptována na P<0,01

Z obr. 76 který popisuje vliv použité dřeviny na modul pružnosti je patrné, že účinek použité dřeviny k testování se projevil jako faktor statisticky významný, na hodnoty sledované charakteristiky. Mezi použitím dřevin smrku a teaku se ovšem neprojevila statistická významnost. Celkově nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosáhl dub při teplotě termické úpravy 160°C.



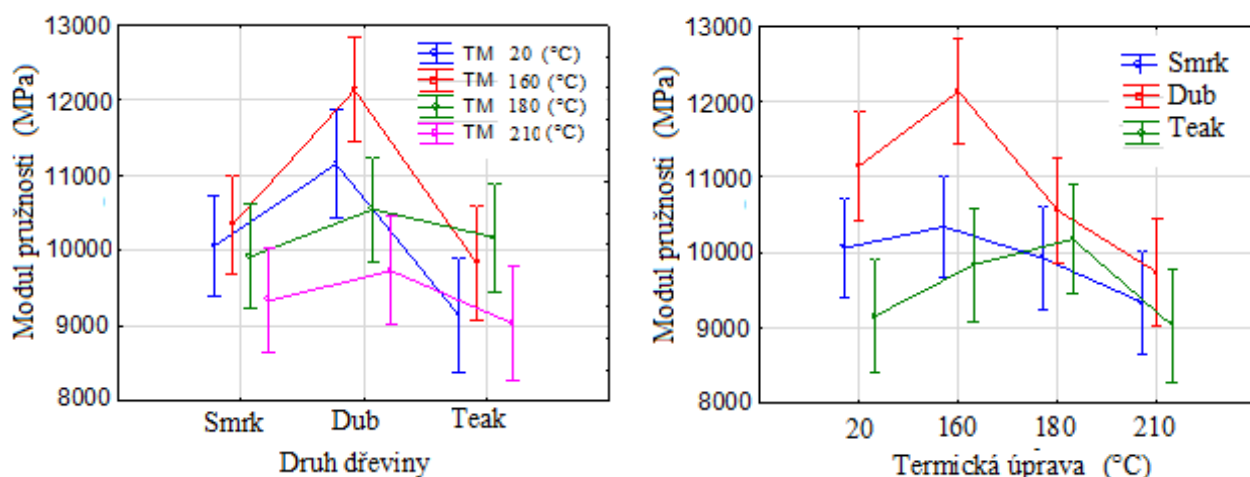
Obr. 76 Vliv druhu dřeviny na hodnoty modulu pružnosti

Statisticky významným faktorem se projevila teplota termické úpravy při zvýšení teploty ze 160°C na 210°C. U všech sledovaných dřevin hodnoty při zvýšení teploty termické úpravy na 210°C klesly (obr. 77).



Obr. 77 Vliv teploty termické úpravy na hodnoty modulu pružnosti

Pokud posoudíme význam teploty termické úpravy na použitou dřevinu, jsou tyto faktory ve vzájemné interakci statisticky nevýznamné. Dub a smrk při úpravě teplotou 160°C nabývají největších hodnot modulu pružnosti. Naopak teak získal největší hodnoty modulu pružnosti při použité teplotě úpravy 180°C. Statistický význam se projevil pouze mezi použitými teplotami úpravy 160°C a 210°C u dubu (obr. 78).



Obr. 78 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty modulu pružnosti

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v tab. 40.

Tab. 40 Porovnání účinků jednotlivých faktorů s využitím Duncanova testu na hodnotách modulu pružnosti

Modul pružnosti													
Číslo buňky		(1) 10057	(2) 10341	(3) 9922.4	(4) 9336.7	(5) 11151	(6) 12136	(7) 10552	(8) 9732.2	(9) 9148.8	(10) 9833.7	(11) 10175	(12) 9028
1	S 20		0.602	0.792	0.213	0.054	0.000	0.382	0.569	0.121	0.683	0.816	0.081
2	S 160	0.602		0.461	0.089	0.133	0.001	0.678	0.305	0.044	0.384	0.744	0.026
3	S 180	0.792	0.461		0.300	0.032	0.000	0.278	0.728	0.180	0.861	0.643	0.127
4	S 210	0.213	0.089	0.300		0.001	0.000	0.039	0.436	0.712	0.360	0.153	0.571
5	D 20	0.054	0.133	0.032	0.001		0.052	0.239	0.014	0.000	0.023	0.079	0.000
6	D 160	0.000	0.001	0.000	0.000	0.052		0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	D 180	0.382	0.678	0.278	0.039	0.239	0.003		0.170	0.017	0.224	0.489	0.009
8	D 210	0.569	0.305	0.728	0.436	0.014	0.000	0.170		0.282	0.843	0.449	0.210
9	T 20	0.121	0.044	0.180	0.712	0.000	0.000	0.017	0.282		0.224	0.082	0.812
10	T 160	0.683	0.384	0.861	0.360	0.023	0.000	0.224	0.843	0.224		0.548	0.162
11	T 180	0.816	0.744	0.643	0.153	0.079	0.000	0.489	0.449	0.082	0.548		0.053
12	T 210	0.081	0.026	0.127	0.571	0.000	0.000	0.009	0.210	0.812	0.162	0.053	

V následující tabulce jsou zaznamenány průměrné hodnoty modulu pružnosti pro určitou dřevinu, hustoty a teplota termické úpravy, kterou byly soubory vzorků upraveny. Mez úměrnosti při statickém ohybu je průměrně 70% meze pevnosti. Z pohledu diagramu napětí-deformace pro dřevo je mez úměrnosti charakterizována jako lineární část tohoto diagramu. Je definována jako takové napětí, při kterých vznikají v tělese pouze deformace pružné, případně pružné v čase, a napětí je rozloženo v tělese rovnoměrně. Takto definované deformace zanikají po ukončení silového působení a těleso se vrací do

předešlého stavu. Následující tabulky a obrázky zobrazují statistické zhodnocení vlivů faktorů na mez úměrnosti ve statickém ohybu.

Tab. 41 Základní statistická analýza pro výpočet meze úměrnosti

Druh dřeviny	Termická úprava (°C)	Modul pružnosti (Mpa)	Hustota (Kg/m ³)
Smrk	20	10057 (9,4)	445 (5,39)
Smrk	160	10341 (9,2)	449 (4,45)
Smrk	180	9922 (7,3)	467 (1,96)
Smrk	210	9337 (8,7)	461 (4,94)
Teak	20	9149 (11,3)	651 (1,57)
Teak	160	9834 (15,8)	588 (2,97)
Teak	180	10175 (14,2)	525 (24,17)
Teak	210	9028 (13,8)	572 (26,67)
Dub	20	11151 (14,1)	747 (5,29)
Dub	160	12136 (12,9)	753 (14,49)
Dub	180	10552 (12,8)	722 (4,76)
Dub	210	9733 (10,4)	687 (3,67)

* Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %

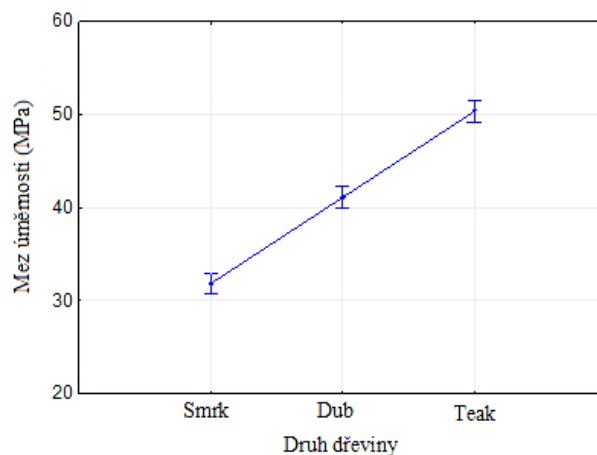
V tab. 42 je uvedena významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny a teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky. Interakce obou sledovaných faktorů se však neprojevila jako statisticky významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky.

Tab. 42 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na mez úměrnosti ve statickém ohybu

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Abs. člen	229590,5	1	229590,5	15235,436	0,000
Druh dřeviny	7727,3	2	3863,6	256,388	0,000
Termická úprava	2438,5	3	812,8	53,938	0,000
Druh dřeviny* Termická úprava	1875,6	6	312,6	20,744	0,000
Chyba	1883,7	125	15,1		

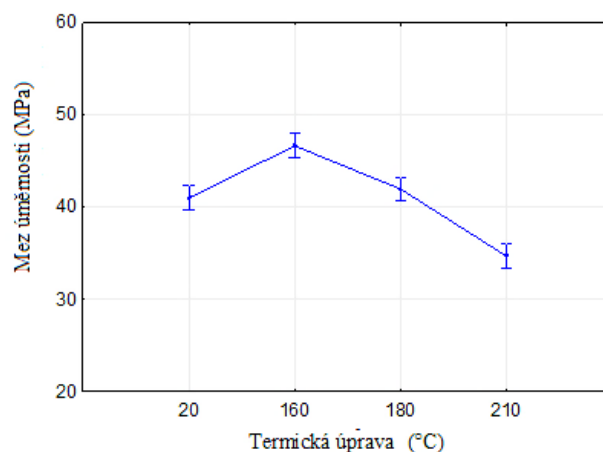
Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Z grafického vyhodnocení (obr. 79) vyplývá, že druh dřeviny je pro výsledky meze úměrnosti ve statickém ohybu statisticky velice významným faktorem. Největší variabilita, co se výsledků týká je mezi smrkem a teakem. Kdy teak dosáhl hodnot nejvyšších a smrk nejnižších.



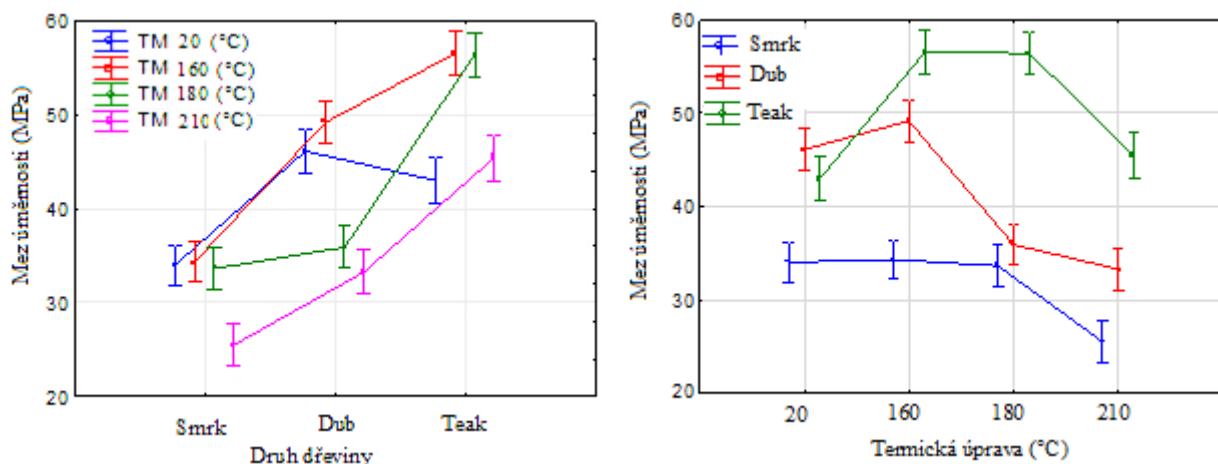
Obr. 79 Vliv druhu dřeviny na hodnoty meze úměrnosti ve statickém ohybu

Použitá teplota termické úpravy je pro výsledné hodnoty meze úměrnosti ve statickém ohybu statisticky významným faktorem. Mezi teplotami termické úpravy 20°C a 180°C se statisticky významný faktor na mez úměrnosti ve statickém ohybu neprojevil.



Obr. 80 Vliv teploty termické úpravy na meze úměrnosti ve statickém ohybu

Z obr. 81 vyplývá, že u smrku se ve výsledných hodnotách meze úměrnosti neprojevila téměř žádná variabilita v závislosti na teplotě termické úpravy, pouze při použití úpravy 210°C se hodnoty výrazně snížily. Pokud porovnáme hodnoty meze úměrnosti při teplotě úpravy 160°C a 180°C u teaku, což jsou nejvyšší získané hodnoty, neprojevil se mezi nimi statisticky významný rozdíl. Dub projevil statisticky významné snížení hodnot při zvýšení teplot termické úpravy ze 160°C na 180°C. Statisticky významný nárůst meze úměrnosti je též zřetelný u teaku při úpravě z 20°C na 160°C.



Obr. 81 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty meze úměrnosti ve statickém ohybu

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v tab. 43.

Tab. 43 Srovnání účinků jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu na hodnotách meze úměrnosti ve statickém ohybu

Mez úměrnosti ve statickém ohybu																																				
Číslo buňky	<table border="1"> <tr> <td>(1)</td><td>(2)</td><td>(3)</td><td>(4)</td><td>(5)</td><td>(6)</td><td>(7)</td><td>(8)</td><td>(9)</td><td>(10)</td><td>(11)</td><td>(12)</td> </tr> <tr> <td>34.012</td><td>34.311</td><td>33.627</td><td>25.457</td><td>46.136</td><td>49.172</td><td>35.892</td><td>33.270</td><td>42.999</td><td>56.563</td><td>56.423</td><td>45.439</td> </tr> </table>												(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	34.012	34.311	33.627	25.457	46.136	49.172	35.892	33.270	42.999	56.563	56.423	45.439
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)																								
34.012	34.311	33.627	25.457	46.136	49.172	35.892	33.270	42.999	56.563	56.423	45.439																									
1	S	20		0.855	0.813	0.000	0.000	0.000	0.280	0.672	0.000	0.000	0.000	0.000																						
2	S	160	0.855		0.696	0.000	0.000	0.000	0.332	0.569	0.000	0.000	0.000	0.000																						
3	S	180	0.813	0.696		0.000	0.000	0.000	0.210	0.827	0.000	0.000	0.000	0.000																						
4	S	210	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000																						
5	D	20	0.000	0.000	0.000	0.000		0.063	0.000	0.000	0.068	0.000	0.000	0.669																						
6	D	160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029																						
7	D	180	0.280	0.332	0.210	0.000	0.000	0.000		0.156	0.000	0.000	0.000	0.000																						
8	D	210	0.672	0.569	0.827	0.000	0.000	0.000	0.156		0.000	0.000	0.000	0.000																						
9	T	20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.068	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.135																						
10	T	160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.931	0.000																						
11	T	180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.931		0.000																						
12	T	210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.669	0.029	0.000	0.000	0.135	0.000	0.000																							

V následující tabulce jsou zaznamenány průměrné hodnoty modulu pružnosti pro určitou dřevinu, hustoty a teplota termické úpravy, kterou byly soubory vzorků upraveny.

Abychom mohli hodnotit kvalitu dřeva, musíme znát vztah mezi modulem pružnosti a pevností, případně hustotou dřeva. Čím větší je pevnost dřeva v ohybu, tím větší je modul pružnosti E.

Následující tabulky a obrázky zobrazují statistické zhodnocení vlivů faktorů na mez pevnosti ve statickém ohybu.

Tab. 44 Základní statistická analýza pro výpočet meze pevnosti ve statickém ohybu

Druh dřeviny	Termická úprava (°C)	Modul pružnosti (MPa)	Hustota (Kg/m ³)
Smrk	20	81 (9,1)	445 (5,39)
Smrk	160	77 (5,3)	449 (4,45)
Smrk	180	66 (7,5)	467 (1,96)
Smrk	210	55 (13,3)	461 (4,94)
Teak	20	83 (6,5)	533 (1,57)
Teak	160	93 (5,6)	531 (2,97)
Teak	180	94 (3,3)	576 (24,17)
Teak	210	62 (6,9)	572 (26,67)
Dub	20	91 (7,0)	747 (5,29)
Dub	160	87 (7,8)	753 (14,49)
Dub	180	54 (11,3)	722 (4,76)
Dub	210	46 (5,7)	687 (3,67)

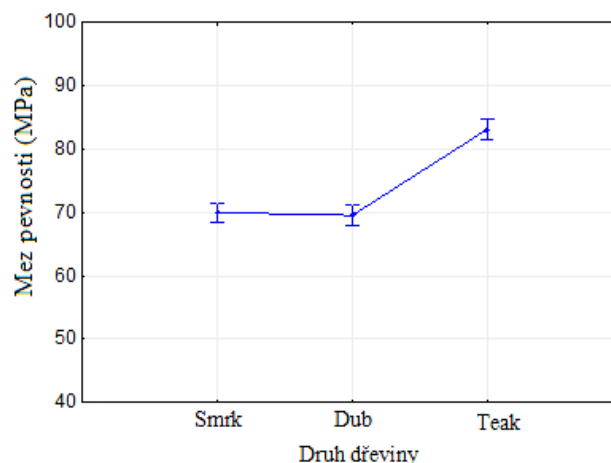
Tab. 45 tab.45 je uvedena významnost jednotlivých faktorů na sledovaný parametr. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme konstatovat, že druh dřeviny a teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv na hodnoty sledované charakteristiky. Stejně tak i interakce obou sledovaných faktorů se projevila jako statisticky významná na hodnoty sledované charakteristiky.

Tab. 45 Statistické zhodnocení vlivu faktorů na mez pevnosti ve statickém ohybu

Hodnocený faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	Hladina významnosti p
Abs. člen	748442,1	1	748442,1	24024,54	0,000
Druh dřeviny	5110,2	2	2555,1	82,02	0,000
Termická úprava	21669,9	3	7223,3	231,86	0,000
Druh dřeviny* Termická úprava	7515,5	6	1252,6	40,21	0,000
Chyba	3894,2	125	31,2		

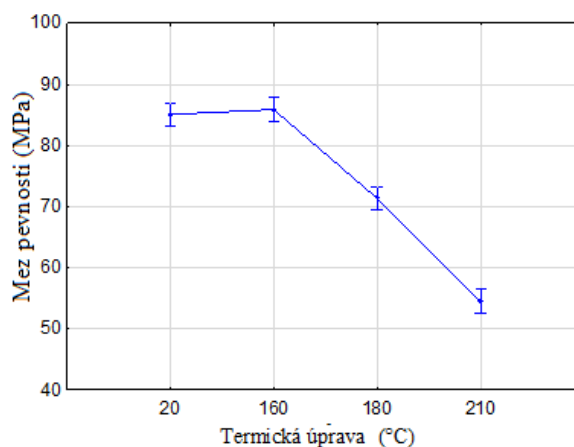
Hladina významnosti byla akceptována na $P < 0,01$

Druh dřeviny je v případě pevnosti v ohybu statisticky významný. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti bylo dosaženo u zkušebních těles teaku. Mezi hodnotami pevnosti v ohybu smrku a dubu nejsou statisticky významné rozdíly (obr. 82).



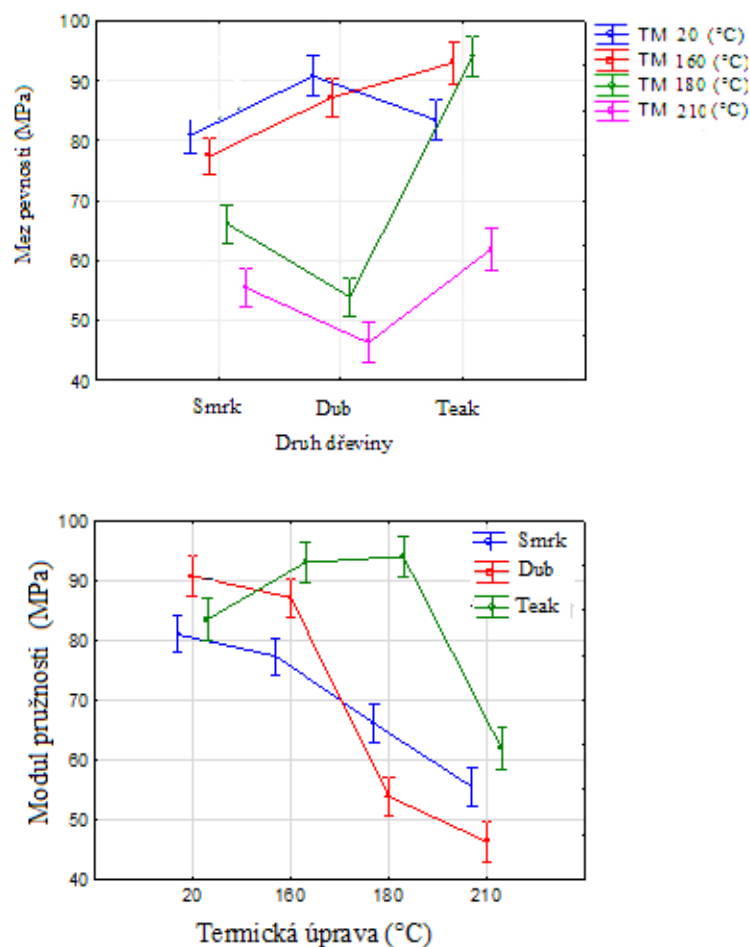
Obr. 82 Vliv druhu dřeviny na hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu

Mezi zvýšením teploty termické úpravy z 20°C na 160°C na výsledné hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu není statisticky významný rozdíl. Dalším zvyšováním teplot dochází ke značnému poklesu hodnot meze pevnosti. V tomto případě můžeme pokles hodnot se zvyšující se teplotou termické úpravy prohlásit, že se projevil statisticky významný rozdíl.



Obr. 83 Vliv teploty termické úpravy na meze pevnosti ve statickém ohybu

Pokud posoudíme význam teploty termické úpravy na použítou dřevinu, jsou tyto faktory ve vzájemné interakci statisticky významné až velice významné. U smrku a dubu je patrná tendence poklesu pevnosti v ohybu s čím vyššími teplotami jsou upraveny. U teaku hodnoty pevnosti v ohybu při tepelné úpravě 160°C a 180°C z 20°C vzrostou, nicméně při úpravě 210°C se projevil výrazný pokles.



Obr. 84 Společné působení teploty termické úpravy a druhu dřeviny na hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v tab. 46.

Tab. 46 Srovnání účinků jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu na hodnotách meze pevnosti ve statickém ohybu

Mez pevnosti ve statickém ohybu												
Číslo buňky	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
	81.004	77.392	66.105	55.485	90.784	87.203	53.911	46.287	83.497	93.075	94.056	61.862
1 S 20		0.124	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.288	0.000	0.000	0.000
2 S 160	0.124		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000
3 S 180	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.071
4 S 210	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.502	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007
5 D 20	0.000	0.000	0.000	0.000		0.127	0.000	0.000	0.003	0.329	0.190	0.000
6 D 160	0.011	0.000	0.000	0.000	0.127		0.000	0.000	0.114	0.017	0.006	0.000
7 D 180	0.000	0.000	0.000	0.502	0.000	0.000		0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
8 D 210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001		0.000	0.000	0.000	0.000
9 T 20	0.288	0.013	0.000	0.000	0.003	0.114	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
10 T 160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.329	0.017	0.000	0.000	0.000		0.676	0.000
11 T 180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.190	0.006	0.000	0.000	0.000	0.676		0.000
12 T 210	0.000	0.000	0.071	0.007	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	

7 Závěr

7.1 Účinek termické úpravy na barevné změny

Na základě naměřených hodnot bylo dospěno k následujícím závěrům:

1. U termické úpravy při teplotě 160°C bylo dokázáno, že nejmenší změny barvy byly zaregistrovány u vzorků smrku. Tato změna byla vyhodnocena dle kritérií vyhodnocování, jako změna vysoce barevná neboli čtvrtý stupeň barevné změny. U dubu a teaku změna barvy při 160°C termické úpravy prokazovala podobné hodnoty, tyto změny byly vyhodnoceny tabulkou kritérií jako úplně odlišná barva, neboli nejvyšší stupeň barevné změny.

2. U termické úpravy při 180°C bylo dokázáno, že teak prokázal nejmenší barevné změny, tato změna byla vyhodnocena dle kritérií jako vysoká změna barvy, nicméně můžeme říci, že celková změna barvy teaku se v porovnání s hodnotami, které byly získané při termické úpravě při 160°C snížila. U dubu a smrku se hodnoty změny barvy podobaly a byly vyhodnoceny jako nejvyšší stupeň barevné změny.

3. U termické úpravy při 210°C získal nejmenší barevné změny teak. Barevné změny byly však vyhodnoceny nejvyšším stupněm změny barvy, tedy jako zcela odlišná barva. Dub získal oproti smrku výrazně menší změny barvy, nicméně obě tyto změny byly vyhodnoceny jako změny stupně nejvyššího.

7.2 Účinek rozdílné termické úpravy na rozměrové a objemové bobtnání, nasáklivost a hustoty dřeva během procesu nasákání

Na základě naměřených hodnot bylo dospěno k následujícím závěrům:

1. Druh dřeviny a termická úprava jsou významným faktorem pro přírůstek hmotnosti. Vzájemná interakce těchto dvou faktorů na přírůstcích hmotnosti významné změny neprokázala. Celkově největšího přírůstku hmotnosti dosáhl smrk při teplotě termické úpravy 160°C. Dub největší hmotnostní přírůstek vykazuje u teplotní úpravy 180°C. Teak dosáhl největších hmotnostních přírůstků u vzorků bez tepelné úpravy, se zvyšující se tepelnou úpravou hodnoty hmotnostních přírůstků klesají.

2. Bylo potvrzeno, že druh dřeviny, teplota termické modifikace a též vzájemná interakce obou vyjmenovaných faktorů má významný vliv na objemové bobtnání při nasákání. Největší přírůstek objemu dosáhl smrk u termické úpravy při 160°C. Naopak dub s teakem nabyl největších objemových přírůstků u vzorků bez termické úpravy. Nejmenší objemové bobtnání sledujeme u teploty termické úpravy 210°C a to u všech zkoušených dřevin.

3. Významný vliv na přírůstek hustoty má druh dřeviny i teplota termické úpravy. Interakce těchto dvou faktorů je u této sledované charakteristiky nevýznamná. Úprava teplotou 160°C vykazovala největších přírůstků hustoty u smrku a dubu. Teak největší hustotní přírůstek projevil u vzorků bez termické úpravy, při zvýšení teploty termické úpravy je viditelný prudký pokles přírůstků hustoty. U smrku a dubu pozorujeme se zvýšením teploty termické úpravy na 160°C mírný nárůst přírůstku hustoty, s dalším zvýšením teploty přírůstek hustoty klesá u obou zmíněných dřevin.

4. Na radiální bobtnání má významný vliv jak dřevina, tak i teplota termické modifikace. Vzájemná interakce těchto dvou faktorů je však v případě radiálního bobtnání málo významná. Největšího radiálního bobtnání po 96 hodinách nasákání dosáhl smrk při teplotě termické úpravy 160°C. Teak a dub největší přírůstky bobtnání prokázaly u vzorků bez termické úpravy. Nejmenší radiální přírůstky byly zjištěny u teploty termické úpravy 210°C a to u všech zkoumaných dřevin.

5. Na výsledné hodnoty tangenciálního bobtnání má významný vliv dřevina, teplota i interakce těchto dvou faktorů. Celkově největší tangenciální bobtnání bylo zjištěno u smrku při teplotě termické úpravy 160°C. Dub dosáhl největšího tangenciálního bobtnání též při 160°C. Největší přírůstek bobtnání u teaku byl vyhodnocen u vzorků bez termické úpravy. Nejmenší tangenciální bobtnání vykazují vzorky všech dřevin upravené teplotou 210°C.

6. Na výsledky podélného bobtnání neměla významný vliv teplota termické úpravy, druh dřeviny ani vzájemná interakce těchto dvou faktorů. Celkově největší podélné bobtnání bylo zjištěno u smrku při teplotě termické úpravy 160°C. U dubu bylo největší podélné bobtnání zjištěno u vzorků neupravených. Se zvyšující se teplotou se hodnoty podélných

přírůstků neměnily. U teaku neměla teplota termické modifikace žádný vliv na změnu podélného bobtnání.

Jestliže shrneme předchozí dílčí závěry, můžeme prohlásit, že rozdílná teplota termické modifikace má statisticky významný vliv na přírůstek hmotnosti, a hustoty, na tangenciální a radiální bobtnání, avšak nemá statisticky významný vliv na podélné bobtnání. Rovněž bylo testováním prokázáno, že termická modifikace má vliv na objemové bobtnání.

7.3 Tvrdość podle Brinella

Na základě naměřených hodnot bylo dospěno k následujícím závěrům: Druh dřeviny, teplota termické úpravy a interakce těchto faktorů má významný vliv na tvrdost podle Brinella.

Nejvyšších hodnot tvrdosti dosahují všechny dřeviny při termické úpravě 160°C. Je tedy evidentní, že tepelná úprava vzorků má pozitivní vliv na tvrdost. To je důsledkem vzrůstajícího podílu krystalické celulózy během rozkladu amorfních částic hemicelulóz (ThermoWood Handbook 2003). Tímto jsme potvrdili fakt, který v literatuře uvádí jak Reinprecht (2008) tak i Kocaefe (2008), že termická úprava s teplotami v rozsahu 100-240°C tvrdost neovlivňuje, naopak ji může i zvýšit. Největší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u dubu, zároveň byly také naměřeny největší rozdíly tvrdostí v závislosti na termické úpravě. Ukazuje největší nárůst hodnot tvrdosti oproti smrku a teaku při termické úpravě z 20°C na 160°C, při teplotě 160°C a 180°C vykazuje dub téměř totožné mechanické vlastnosti, s dalším nárůstem teploty na 210°C tvrdost ovšem opět klesá a to zejména z důvodu poklesu hustoty, která se snížila díky vyšší termické úpravě. Můžeme tedy zkonstatovat, že výslednou tvrdost ovlivňuje nejvýrazněji hustota dřeva.

Nejvíce je tvrdost ovlivněna druhem dřeviny, kde hraje nejdůležitější roli hustota. Odvíjí se od ní téměř všechny mechanické vlastnosti. Čím má tedy dřevo vyšší hustotu, tím lepší má vlastnosti.

7.4 Pevnost v tlaku

Na základě naměřených hodnot bylo dospěno k následujícím závěrům:

1. Na pevnost v tlaku podél vláken má velmi významný vliv druh dřeviny, teplota je faktorem statisticky středně významným. Interakce těchto dvou faktorů má významný vliv na pevnost tlaku podél vláken. Při teplotě termické úpravy 160 °C se hodnoty průměrné pevnosti u vzorků mírně zvýšily, zvýšila se i průměrná hustota dřeva. Během úpravy 180 °C se hodnoty snížily oproti hodnotám naměřených při 160 °C, hustota dřeva však vzrostla. Zajímavý je ovšem výsledek pevnosti v tlaku podél vláken, kdy při úpravě 210 °C, hodnoty hustoty mírně vzrostly oproti neupravenému dřevu. Tento výsledek ovšem vyvrací teorii Hilla (2006), který tvrdí, že úpravou dřeva ve vysokých teplotách se snižuje mez pevnosti, zároveň potvrzuje naměřené hodnoty ve výzkumném středisku VTT ve Finsku, že vlivem vysokých teplot se může tlaková pevnost podél vláken i zvýšit. Nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku podél vláken dosáhl dub, a to jak u vzorků termicky neupravených, tak i vzorků termicky upravených. Průměrné naměřené hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken u dubu jsou o 53,7% vyšší než průměrné hodnoty naměřené u vzorků smrku a o 21,8% vyšší než průměrné hodnoty teaku. Průměrné výsledky tlakové pevnosti ve směru vláken tepelně neupravených vzorků dubu vykazují nadprůměrné hodnoty, a to 95 MPa, to je cca o 60% větší hodnota, než které uvádí např. Požgaj et. al., (1997) 59,8 MPa nebo Gandelová (2002) 57,5 MPa. Tyto hodnoty byly znovu naměřeny u teploty při 180°C. S dalším nárůstem tepelné úpravy následovalo prudké snížení pevnosti v tlaku ve směru vláken.

2. Na pevnost v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru má významný vliv jak druh dřeviny, tak teplota termické úpravy a zároveň i interakce obou zmíněných faktorů. Nejvyšších naměřených hodnot pevnosti v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru dosáhl dub. Hodnoty dubu jsou v porovnání s hodnotami teaku o 15,3% vyšší. Hodnoty smrku v porovnání s hodnotami dubu o 66,2% nižší.

3. Na pevnost v tlaku napříč vláken v radiálním směru má významný vliv druh dřeviny, teplota termické úpravy a také interakce obou těchto faktorů. Při tomto testování vyšly největší průměrné hodnoty u teaku. Nejnižší opět u smrku. V porovnání teaku s dubem, má teak o 17,4% vyšší průměrné hodnoty pevnosti v tlaku napříč vláken v radiálním

směru. Pokud porovnáme smrk s teakem, průměrné hodnoty smrku jsou o 68,5% menší než hodnoty pevnosti v tlaku napříč vláken v radiálním směru u teaku.

Jestliže shrneme předchozí dílčí závěry, můžeme prohlásit, že na pevnost v tlaku jako takovou má významný vliv použitá dřevina a její hustota. Pevnost dřeva se obecně s rostoucí hustotou zvyšuje. Avšak vztah mezi hustotou a pevností dřeva nemusí být vždy významný, na což poukazují i výsledky našeho měření, kde se hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken snižují s rostoucí hustotou, a naopak se zvyšují s hustotou klesající. Zkouškou jsme vlastně tak potvrdili tvrzení Reinprechta a Vidholdové (2008), že pevnostní vlastnosti se vlivem vysokých teplot příliš nemění a tlaková pevnost podél vláken se u termicky upraveného dřeva může i zvýšit.

7.5 Rázová houževnatost

Na základě naměřených hodnot bylo dospěno k následujícím závěrům:

Na získané výsledky rázové houževnatosti má velmi významný vliv jak druh dřeviny, teplota termické úpravy, tak i interakce těchto dvou faktorů.

Celkově největších hodnot při zkoušení rázové houževnatosti na Charpyho kladivě dosáhl smrk i vzhledem ke své nízké hustotě v porovnání s ostatními dvěma zkoušenými dřevinami. Dub dosáhl hodnot nižších než smrk, ovšem teak nabyt ze všech tří zkoušených dřevin nejnižších hodnot, a to díky své křehkosti. Požgaj (1993) však tvrdí, že listnaté dřeviny jsou v průměru dvakrát odolnější během přerážení než dřeviny jehličnaté, což se v tomto měření nepotvrdilo. U vzorků smrku pozorujeme u termicky upravených vzorků vyšší hustotu než u vzorků neupravených. To ovšem nemělo pozitivní vliv na rázovou houževnatost. U teaku se prokázalo, že i vzhledem ke své poměrně dobré pevnosti v ohybu a vysoké pevnost v tlaku, hodnoty rázové houževnatosti vykazuje několikanásobně nižší než termicky upravené vzorky smrku a dubu. To potvrzuje teorii Požgaje (1993), že některé dřeviny mohou mít vysokou pevnost, ale při rázové houževnatosti jsou křehké a dosahují tudíž nízkých výsledných hodnot. Například hodnoty u smrku při termické úpravě 160 °C jsou o 6,3 % vyšší než naměřené hodnoty u dubu při stejné teplotní úpravě, v porovnání s teakem je to o 115,4 %. Druh dřeviny je pro měření rázové houževnatosti dřeva statisticky velice významný, stejně tak i teplota termické úpravy. Vzorky s termickou úpravou 160 °C vykazují u všech dřevin největších dosažených hodnot rázové houževnatosti. Potvrdilo se zároveň tvrzení

Požgaje (1993), že významný vliv na rázovou houževnatost, má jeho umístění do teplot vyšších než 200 °C, jelikož dochází k pyrolýze a tím pádem se stává dřevo křehčí.

7.6 Ohybové charakteristiky

Na základě naměřených hodnot bylo dospěno k následujícím závěrům:

1. V případě modulu pružnosti je významným faktorem druh dřeviny i teplota termické úpravy. Interakce těchto dvou faktorů není v tom případě významná. Celkově nejvyšších hodnot modulu pružnosti tohoto měření dosáhl dub při teplotě termické úpravy 160°C. Stejně jako dub, tak i smrk při termické úpravě 160 °C vykazuje vyšší hodnoty modulu pružnosti než neupravené vzorky těchto dřevin. Nicméně hodnoty modulu pružnosti u teaku jsou nejvyšší při teplotě termické úpravy 180°C a to i vzhledem k 19,4% poklesu hustoty vzhledem k vzorkům teaku, které neprošly termickou úpravou.

2. Na mez úměrnosti ve statickém ohybu měl významný vliv jak druh dřeviny, tak i teplota termické úpravy. Nicméně interakce těchto dvou faktorů se neprojevila jako významná. Nejvyšších průměrných hodnot dosáhl teak. Hodnoty meze úměrnosti prudce stouply se zvyšující se teplotou termické úpravy na 160°C. Další nárůst teplotních úprav neměl již na hodnoty meze úměrnosti u teaku pozitivní vliv. Smrk dosáhl nejnižších hodnot meze úměrnosti, kde se neprojevilo se zvyšováním teploty termické úpravy žádné zlepšení, a při teplotě úpravy 210°C prudký pokles. Můžeme tedy zkonstatovat, že teplota termické úpravy 210°C měla na hodnoty meze úměrnosti u všech zkoušených dřevin vliv negativní a teplota termické úpravy 160°C vliv vesměs pozitivní.

3. Na mez pevnosti ve statickém ohybu má významný vliv jak druh dřeviny, teplota termické úpravy, tak i interakce obou sledovaných faktorů. Nejvyšších průměrných hodnot bylo dosaženo u teaku. Překvapivě hodnoty meze pevnosti dubu jsou na srovnatelné úrovni hodnot, které získal smrk. Se vzrůstající teplotou termické úpravy, kterou se působilo na neupravené vzorky se dosáhlo prudkého snížení meze pevnosti v ohybu. Pouze v případě teaku se hodnoty meze pevnosti nepatrně zvýšily, se zvyšující se teplotou termické úpravy na 160°C a 180°C.

Jestliže shrneme předchozí dílčí závěry, můžeme prohlásit, že na výsledky ohybových charakteristik má zásadní vliv druh dřeviny a teplota termické úpravy. Teak, který prošel termickou úpravou projevil vylepšené vlastnosti u všech zkoušených

ohybových charakteristik. Můžeme tedy shrnout, že termická úprava měla na pevnost v ohybu u teaku pozitivní vliv.

7.7 Závěr - celkové shrnutí

Z dat, která byla získána měřením několika vybraných vlastností dřeva jak fyzikálních, tak mechanických, můžeme prohlásit, že druh dřeviny a teplota termické úpravy jsou víceméně ve všech vlastnostech, které jsme sledovali velmi důležitými faktory a ovlivňují vlastnosti dřeva jak už pozitivně, tak i negativně. Po zpracování naměřených dat bylo zjištěno, že teplota termické úpravy 160°C způsobuje ve dřevě zásadní změny, které mají ať už pozitivní nebo negativní charakter na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.

Seznam použité literatury a zdrojů

ANONYMOUS. *ThermoWood Handbook*, Finnish Thermowood Association, c/o Wood Focus Oy. Helsinki, Finland, 2003. 66 s.

BAL, B. C. (2016). "The effect of span-to-depth ratio on the impact bending strength of poplar LVL," *Construction and Building Materials* 112, 355–359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.197.

BAL, B. C., and BEKTAS, I. (2012). "The effects of some factors on the impact bending strength of laminated veneer lumber," *BioResources* 7(4), 5855–5863. DOI: 10.15376/biores.7.4.5855-5863.

BARCÍK Š.; GAŠPARÍK, M.; RAZUMOV, E. Y. *Effect of temperature on the color changes of wood during thermal modification—Cellulose chemistry and technology*, 2015, 49(9-10), 789-798.

BARLOW C Y (1997): *Materials selection for musical instruments*. In: *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 19,(5), s 69-78.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change of color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood—*Holzforschung* 57,2003, 539–546.

BLAŽEJ, A.; ŠUTÝ, L.; KOŠÍK, M.; KRKOŠKA, P.; GOLIS, E.; *Chémia dreva*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1975. 224 s.

BOONSTRA, M.J. (2008). "A two-stage thermal modification of wood," Ph.D. dissertation in co-supervision Ghent University, Ghent, Belgium and Henri Poincaré University, Nancy, France, pp.297.

BORŮVKA, V., ZEIDLER, A., HOLEČEK T. *Comparison of Stiffness and Strength Properties of Untreated and Heat-Treated Wood of Douglas Fir and Alder*. *BioResources*. Elsevier, 2015, vol. 10 (4), str. 8281-8294.

BUČAR, D., G., and MERHAR, M. (2015). "Impact and dynamic bending strength determination of Norway spruce by impact pendulum deceleration," *BioResources* 10 (3), 4740-4750, DOI: 10.15376/biores.10.3.4740-4750.

CIVIDINI, R., TRAVAN, L. and ALLEGRETTI, O. (2007). "White beech: a tricky problem in drying process." *In: International Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP), September 24-26, Québec City, Canada.*

ČEKOVSKÁ, H., GAFF, M., OSVALDOVÁ, L. M., KAČÍK, F., KAPLAN, L., and KUBŠ, J. (2017). "Tectona grandis Linn. and its fire characteristics affected by its thermal modification of wood," BioRes. 12(2), 2805-2817.

DORNYAK, O. R.; *Modeling of the rheological behavior of wood in compression processes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics* [online]. 2003. 76(3): 648–654. Dostupné na internetu: <http://www.itmo.by/jepter/762003e /conte76.html>.

DUBOVSKÝ, J., BABIAK, M., ČUNDERLÍK, I. (2003). *Textúra, Štruktúra a Úžitkové Vlastnosti Dreva (Texture, Structure and Utility Properties of Wood)*, 3rd Edition, Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovakia, pp. 106. (in Slovak).

ESTEVEZ, BM; DOMINGOS IJ, PEREIRA HM. *Pine wood modification by heat treatment in air*. Bioresources 2008;3:142.

FENGEL, D., WEGENER, G., 1989. *Wood: Chemistry Ultrastructure, Reactions*. Walter De Gruyter. 13p. ISBN 3-11-012059-3.

GAFF M., GÁBORÍK J. (2014). "Effect of cyclic loading on the elasticity of beech solid and laminated wood." BioResources 9(3). 4288-4296.
DOI:10.15376/biores.9.3.4288-4296.

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 3. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 175s. ISBN 978-80-7375-312-2.

GONZÁLES-PENA, M. M., and Hale, M. D. C. (2007). "The relationship between mechanical performance and chemical changes in thermally modified wood, „in: Proceedings of the Third European Conference on Wood Modification, 15-16th October, Cardiff, UK, pp.169-172.

GUNDUZ, G.; *The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (Pyrus elaeagnifolia Pall) wood and changes in physical properties*. Turkey: Bartın University, 2009. Dostupné na internetu: <http://www.sciencedirect.com/>.

HILL, C. *Wood Modification Chemical, Thermal, and Other Processes*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, UK. 2006. 260 s. ISBN 978-0-470-02172-9.

HON, D. N., SHIRAISHI N. *Wood and cellulosic chemistry*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 2001, 914 s. ISBN 08-247-0024-4. Dostupné z: http://www.4shared.com/office/0zbzvSDe/Wood_and_Cellulosic_Chemistry_.html

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.* dotisk. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2001, 128 s. ISBN 80-7157-347-7.

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

KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. *Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave.* 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71s. ISBN 978-80-228-2249-7.

KIM, D.-Y., NISHIYAMA, Y., WADA, M., KUGA, S., OKANO, T., 2001.: *Thermal decomposition of cellulose crystallites in wood.* *Holzforschung*, 55(5), 521–524.

KLIKA, J., ČERNOHORSKÝ, Z., 1953. *Jehličnaté.* 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 310s., 44s.

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

KOLLMANN, F. F. P. (1967). *Verformung und Bruchgeschehen bei Holz, als einem anisotropen, inhomog., porigen Festkörper (Deformation and fracture formed in a wood, such in anisotropic, inhomogeneous., porous solids),* VDI-Forschungsheft Nr. 520, Düsseldorf: VDI Verlag (in German).

KUBOJIMA, Y., OKANO, T., OHTA, M. 1998. *Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas.* *Journal of Wood Science*, 44, 1.

KUBOVSKÝ, I. and URGELA, S. (2004). *“Farba a svetlo.”* Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 103p. ISBN: 80-228-1399-0.

LEXA, J., et al.: *Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva.* Bratislava: Práca, 1952. 436 s.

MATOVIČ, A., 1993: *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva.* VŠZ Brno, 212 s. ISBN 80-7157-086-9.

MAYES, D.; OKSANEN, O. *Thermowood® Handbook.* Finsko. 2003. Dostupné na: http://www.thermowood.fi/data.php/200312/795460200312311156_tw_handbook.pdf. (25. 2. 2017).

MILITZ, H.; TJEERDSMA B. *Heat treatment of wood in Germany – state of the art.* *Thermotreatedwood* [online]. 2001 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z WWW: <www.thermotreatedwood.com/Worldwide/Germany.pdf>.

- MUSIL, I.; HAMERNÍK, J. *Jehličnaté dřeviny*. Praha: Academia, 2007. 352 s. ISBN 978-80-200-1567-9.
- NAVI, P; SANDBERG, D. *Thermo-Hydro-Mechanical processing of wood*. 1.vyd. Lausanne: EPFL Press, 2012. 357s. ISBN 978-2-940222-41-1.
- NUOPPONENN, M.; VUORINEN, T.; JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. *Thermal modification in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies*. 2004. Journal of Wood Chemistry and Technology.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D. KURJATKO, S. – BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vydání. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D. KURJATKO, S. – BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda, a. s., 1997, 485 s. ISBN 80-07-00960-4.
- RAGGERS, J.; *Process/Durability*. 2007. [online]. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z WWW: <http://www.thermotreatedwood.com/Researches/Durability%20article.pdf>.
- RAPP, A. O.; SAILER, M. *Heat treatment of wood in Germany – state of the art*. *Thermotreatedwood* [online]. 2001 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z WWW: <www.thermotreatedwood.com/Worldwide/Germany.pdf>.
- REINPRECHT, L. *Ochrana dreva*. 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.
- REINPRECHT, L.; VIDHOLDOVÁ, Z.. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 89s. ISBN 978-80-228-1920-6.
- RUSHE, H., 1973: *Thermal degradation of wood at temperatures up to 200 degrees Celsia. Reaction kinetics of loss of mass during heat treatment of wood*. Holz als Rohund Werkstoff. 307–312 p.
- SYRJÄNEN, T; OY, K.; *Heat treatment of wood in Finland – state of the art*. *Thermotreatedwood* [online]. 2001 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z WWW: <www.thermotreatedwood.com/Worldwide/Finland.pdf>.
- ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., 1996: *Nauka o dřevě*. MZLU Brno, 176 s. ISBN 978-80-7157-577-1.
- ÚŘADNÍČEK, L., CHMELARĚ J. *Dendrologie lesnická*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1995. ISBN 80-715-7169-5.

ÚŘADNÍČEK L. et al. 2009. *Dřeviny české republiky* Copyright 367 s. ISBN 978-80-87154-62-5.

VERNOIS, M. *Heat treatment of wood in France – state of the art. Thermotreatedwood* [online]. 2001 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: <www.thermotreatedwood.com/Worldwide/France.pdf>.

VIKARI, J. A.; MAYES, D.; *New generation ThermoWood – How to take Thermowood to the next level*. 2009. European Conference of Wood Modification. 2009.

WAGENFÜHR. *Holzatlas*. 5. vyd. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2000, 707 s. ISBN 3-446-21390-2.

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

Internetové zdroje:

<http://www.debaboheemia.cz>

www.prokom.cz

<http://prace-se-drevem.spibi.cz>

<http://www.arakolin.cz>

<https://www.bamboodesign.cz>

<http://ldf.mendelu.cz>

<http://www.thermowood.ca>

Normy:

ČSN 91 0001. (2007). "Furniture -Technical requirements," Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague, Czech Republic. (in Czech)

EN 942. (2007). "Timber in joinery-General requirements," *European Committee for Standardization*, Brussels, Belgium.

EN 1534. (2010). "Wood flooring-Determination of resistance to indentation-Test method," *European Committee for Standardization*, Brussels, Belgium.

ISO 3348. (1975). "Wood-Determination of impact bending strength," *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland.

ISO 13061-1. (2014). "Physical and mechanical properties of wood-Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests," *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland.

ISO 13061-2. (2014). "Physical and mechanical properties of wood-Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests," *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland.

EN 310 (1993). "Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

ISO 11664-4: 2008 Colorimetry – Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space.

ISO 11664-6: 2013 Colorimetry – Part 6: CIEDE 2000 Colour – difference formula.

ČSN 49 0101 Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky. 1980
58

ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach. 1979

ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993

ČSN 49 0115 Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979

ČSN 49 0116 Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. 1982

ČSN 49 0117 Drevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1977.

ČSN EN ISO 6506-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella: Část 1: Zkušební metoda. 2015. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.