

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Zhušťování dřeva a jeho dopad na změnu  
tvrdosti a kvality povrchu**

Bakalářská práce

Autor: Dominik Bejšák

Vedoucí práce: Ing. Adam Sikora, Ph.D.

2022

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Dominik Bejšák

Dřevařství  
Dřevařství

Název práce

**Zhušťování dřeva a jeho dopad na změnu tvrdosti a kvality povrchu**

Název anglicky

**Densification of wood and its impact on the change of hardness and surface quality**

---

### Cíle práce

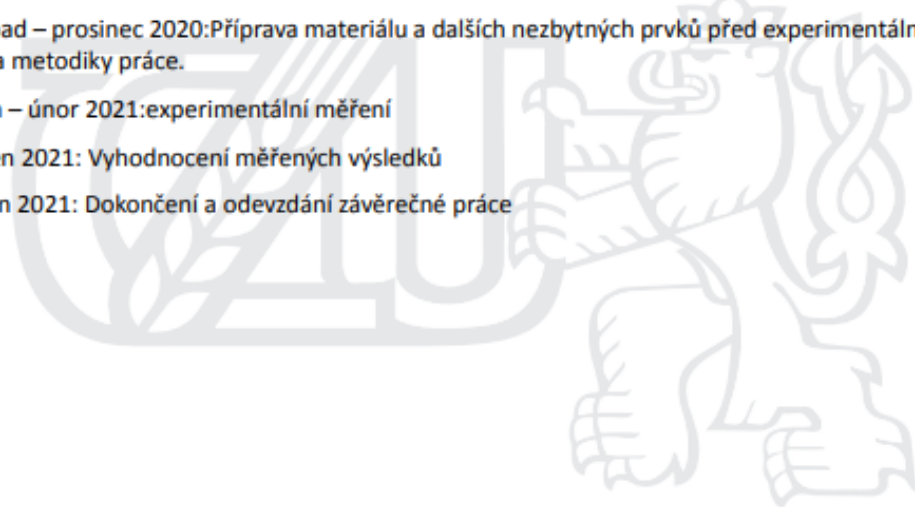
Cílem této bakalářské práce je zhodnocení vlivu procesu zhušťování bukového dřeva při různých poměrech zhuštění na změnu tvrdosti a vybraných charakteristik drsnosti a vlnitosti. Pro měření tvrdosti bude použito zařízení DuraVision-30 jedná se o dílensky tvrdoměr pro provedení zkoušky tvrdosti podle Brinella. Pro měření vybraných charakteristik drsnosti a vlnitosti bude použit kontaktní profilometr. Zhušťování bukového dřeva bude prováděno ve vyhřívaném lisu na stupně zhuštění o 10, 20, 30 a 40% vzhledem k tloušťce zhušťovaného materiálu. Na základě teoretických znalostí se předpokládá zvýšení tvrdosti po zhuštění. Z výsledků bude možné určit vliv jednotlivých stupňů zhušťování. Stejný předpoklad platí pro změnu vybraných charakteristik drsnosti a vlnitosti, kde by mělo docházet k vyrovnání povrchové struktury dřeva.

### Metodika

1. Literární rozbor problematiky zhušťování dřeva a jejich dopad na sledované charakteristiky.
2. Navržení metodiky zhušťování dřeva pro dosažení požadovaných stupňů zhuštění.
3. Experimentální zjištění vlivu zhušťování na tvrdost a vybrané charakteristiky drsnosti a vlnitosti dřeva.
4. Statistické vyhodnocení a na základě zjištěných dat navržení nejvhodnějšího stupně zhuštění na sledované charakteristiky.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuze, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. červenec – srpen 2020: Tvorba koncepčního přístupu k řešení práce
2. září – říjen 2020: Tvorba literární rešerše podle schválené koncepce řešení práce
3. listopad – prosinec 2020: Příprava materiálu a dalších nezbytných prvků před experimentálním měřením a tvorba metodiky práce.
4. leden – únor 2021: experimentální měření
5. březen 2021: Vyhodnocení měřených výsledků
6. duben 2021: Dokončení a odevzdání závěrečné práce



**Doporučený rozsah práce**

40 stran

**Klíčová slova**

buk, zhušťování dřeva, tvrdost, drsnost, vlnitost

---

**Doporučené zdroje informací**

1. Kutnar, A., Kamke, F.A., Petrič, M., and Sernek, M. (2008). „The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood“, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 329 (1), pp. 82-86.
  2. Shams, M. I., Kagemori, N., and Yano, H. (2006). „Compressive deformation of wood impregnated with low molecular weight phenol formaldehyde (PF) resin IV: Species dependency“, *Journal of Wood Science*, 52 (2), pp. 179-183.
  3. Heger, F., Groux, M., Girardet, F., Welzbacher, C., Rapp, A. O. and Navi, P. (2004). „Mechanical and durability performance of THM-densified wood“, In: *Final Workshop Cost Action E22: Environmental Optimisation of Wood Protection*, pp. 1-10.
  4. Pařil, P., Brabec, M., Rousek, R., Maňák, O., Rademacher, P., Čermák, P., and Dejmal, A. (2013). „Physical and mechanical properties of densified beech wood plasticized by ammonia“, *Pro Ligno* 9 (4), pp. 195-202.
  5. Rautkari, L., Laine, K., Kutnar, A., Medved, S., and Hughes, M. (2013). „Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification“, *Journal of Materials Science*, 48 (6), pp. 2370-2375.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2020/21 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Adam Sikora

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Elektronicky schváleno dne 8. 7. 2020

**Ing. Radek Rinn**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2020

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 04. 04. 2022

---

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Zhušřování dřeva a jeho dopad na změnu tvrdosti a kvality povrchu vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V..... dne.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce Ing. Adamovi Sikorovi, Ph.D. za konzultace, cenné rady a odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat rodině za motivaci a podporu při studiu.

## **Abstrakt:**

Práce se zabývá zhušťováním dřeva a jeho vlivem na vybrané vlastnosti. Cílem bylo zjistit vliv různých stupňů zhuštění na tvrdost a vybrané charakteristiky drsnosti a vlnitosti ( $R_a$ ,  $W_a$ ) zhuštěného bukového dřeva. Zkušební vzorky byly zhuštěny o 10, 20, 30 a 40 % vzhledem k tloušťce ve vyhřívaném lise při teplotě 140 °C kolmo k vláknům v tangenciálním směru. Následně byla provedena měření drsnosti a vlnitosti kontaktním profilometrem ve směru podél a napříč vláken. Pomocí Brinellovy metody byla zjištěna tvrdost zhuštěného dřeva. Potvrdil se předpoklad, kdy zhuštění mělo za následek zvýšení tvrdosti, rostoucí se stupněm zhuštění, a nejvyšší tvrdosti dosáhly vzorky s nejvyšším zhuštěním. Drsnost ve směru podél i napříč vláken po zhuštění klesla. U vlnitosti ve směru napříč vláken byl rovněž zaznamenán pokles. Výjimku tvořila vlnitost ve směru podél vláken, která se ukázala být nevýznamnou v závislosti na stupni zhuštění. Výsledky měření byly porovnány s výsledky podobných výzkumů.

## **Klíčová slova:**

Buk, zhušťování dřeva, tvrdost, drsnost, vlnitost

**Abstract:**

This thesis focuses on the densification of wood and its influence on its properties. Main goal was to determine the influence of different degrees of densification on hardness, and selected characteristics of roughness and waviness ( $R_a$ ,  $W_a$ ) of densified beech wood. Samples were densified to the degrees of 10, 20, 30 and 40 % of their thickness in a heated press with the temperature of 140 °C perpendicularly to the grain in the tangential direction. Next, measurements of the roughness and waviness were made with a contact profilometer, in both the longitudinal and the transversal direction in relation to the grain. Using the Brinell method, hardness of the densified wood was determined. Some of initial assumptions were confirmed. The densification of wood led to the increase in hardness, and the samples with highest degree of densification reached highest hardness values. Roughness in the longitudinal and transverse direction decreased after densification. Regarding the waviness across grain, a decrease has also been determined. The only exception from assumed trend was waviness in longitudinal direction, which proved to be irrelevant of the densification degree. Results were compared to another similar research.

**Key words:**

Beech, wood densification, hardness, roughness, waviness



# Obsah

<b>Obsah .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>12</b>
<b>Seznam zkratk a značek .....</b>	<b>13</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>14</b>
<b>Cíle práce .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Modifikace dřeva .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Význam modifikování dřeva .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Druhy modifikací .....</b>	<b>16</b>
1.2.1 Acetylace .....	16
1.2.2 Furfurylace .....	17
1.2.3 Termické modifikace .....	17
1.2.4. Impregnační polymerizace .....	18
1.2.5 Zhušťování .....	18
<b>2 Modifikace zhušťováním a její vývoj .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Historie zhušťování dřeva .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Metody zhušťování .....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Zhušťování mechanické .....	20
2.2.2 Termomechanické zhušťování .....	21
2.2.3 Termohydromechanické zhušťování .....	21
2.2.4 Úprava pomocí chemických látek .....	23
<b>2.3 Zhušťování dřeva ve vztahu ke struktuře dřeva .....</b>	<b>23</b>
2.3.1 Struktura dřeva .....	23
2.3.2 Vliv zhušťování na strukturu .....	25
<b>2.4 Významné jevy související se zhušťováním .....</b>	<b>27</b>
2.4.1 Okamžité zpětné odpružení .....	27
2.4.2 Zpětné odpružení v čase .....	27
<b>2.5 Význam zhušťování .....</b>	<b>28</b>
<b>3 Fyzikální vlastnosti ve vztahu ke zhušťování dřeva .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Hustota dřeva .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Vlhkost dřeva .....</b>	<b>30</b>
<b>4 Mechanické vlastnosti ve vztahu ke zhušťování dřeva .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Tvrdost dřeva .....</b>	<b>31</b>

4.1.1	Měření tvrdosti podle Brinella .....	32
<b>4.2</b>	<b>Drsnost a vlnitost .....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Metodika.....</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Popis vzorků .....</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>Zhušťování vzorků .....</b>	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Příprava vzorků .....</b>	<b>38</b>
<b>5.4</b>	<b>Měření drsnosti a vlnitosti .....</b>	<b>38</b>
5.4.1	Filtrování profilu .....	40
5.4.2	Měření vzorků .....	41
<b>5.5</b>	<b>Měření tvrdosti.....</b>	<b>41</b>
<b>5.6</b>	<b>Výpočet hustoty .....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Výsledky a diskuse.....</b>	<b>43</b>
<b>6.1</b>	<b>Hustota .....</b>	<b>43</b>
<b>6.2</b>	<b>Vyhodnocení tvrdosti dle Brinella.....</b>	<b>43</b>
<b>6.3</b>	<b>Vyhodnocení drsnosti (<math>R_a</math>) kontaktní metodou.....</b>	<b>45</b>
<b>6.4</b>	<b>Vyhodnocení vlnitosti (<math>W_a</math>) kontaktní metodou.....</b>	<b>48</b>
<b>Závěr</b>	.....	<b>51</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	.....	<b>53</b>

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Vlastnosti Lignamonu v porovnání s výchozím dřevem .....	19
Tabulka č. 2 Tlak a čas zhušťování pro dané stupně zhuštění.....	38
Tabulka č. 3 Hustota vzorků po zhuštění.....	43
Tabulka č. 4 Stupeň zhuštění a tvrdost .....	44
Tabulka č. 5 Duncanův test pro tvrdost .....	44
Tabulka č. 6 Zhuštění a drsnost podél vláken.....	46
Tabulka č. 7 Duncanův test pro drsnost podél vláken .....	46
Tabulka č. 8 Zhuštění a drsnost napříč vláken.....	47
Tabulka č. 9 Duncanův test pro drsnost napříč vláken .....	47
Tabulka č. 10 Zhuštění a vlnitost podél vláken .....	48
Tabulka č. 11 Duncanův test pro vlnitost podél vláken.....	49
Tabulka č. 12 Zhuštění a vlnitost napříč vláken .....	50
Tabulka č. 13 Duncanův test pro vlnitost napříč vláken.....	50

## Seznam obrázků

Obrázek č. 1 Zhušřování v radiálním a tangenciálním směru .....	20
Obrázek č. 2 Schematicky vyobrazená struktura buněčné stěny .....	24
Obrázek č. 3 Zhušřené dřevo pod mikroskopem. ....	25
Obrázek č. 4 Zhušřené dřevo po cyklu máčení a sušení pod konfokálním mikroskopem... ..	26
Obrázek č. 5 Schématické znázornění měření tvrdosti dle Brinella .....	33
Obrázek č. 6 Různé povrchy v závislosti na použitých procesech obrábění .....	36
Obrázek č. 7 Rozměry vzorků .....	37
Obrázek č. 8 Zkušební vzorky .....	38
Obrázek č. 9 Graf $R_a$ napříč vláken z měření vzorku zhušřeného o 40 % .....	40
Obrázek č. 10 Graf $W_a$ napříč vláken stejného vzorku jako u obrázku č. 9 .....	41
Obrázky č. 11 a 12 Směr a pozice měření tvrdosti ve směru podél vláken a napříč vláken .....	41
Obrázky č. 13 a 14 Měření drsnosti kontaktním profilometrem ve směru podél vláken a napříč vláken.....	41
Obrázek č. 15 Schematické znázornění bodů měření tvrdosti.....	42
Obrázek č. 16 Měření tvrdosti metodou dle Brinella v přístroji DuraVision-30.....	42
Obrázek č. 17 Vliv stupně zhušření na tvrdost .....	43
Obrázek č. 18 Vliv stupně zhušření na drsnost podél vláken .....	45
Obrázek č. 19 Vliv stupně zhušření na drsnost napříč vláken .....	46
Obrázek č. 20 Vliv stupně zhušření na vlnitost podél vláken.....	48
Obrázek č. 21 Vliv stupně zhušření na vlnitost napříč vláken.....	49

## Seznam zkratek a symbolů

UV	ultrafialové (záření)
°C	stupeň Celsia
MPa	megapascal
kg.m <sup>-3</sup>	kilogram na metr krychlový
kN	kilonewton
VTC	viskoelastická termální komprese
kPa	kilopascal
PF	fenolformaldehyd
m <sup>3</sup>	metr krychlový
kg	kilogram
g.m <sup>-3</sup>	gram na metr krychlový
mm	milimetr
N	Newton
μm	mikrometr
2D	dvoudimenzionální
LDS	metoda měření posunem laseru
3D	trojdimenzionální
ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma
ISO	norma Mezinárodní organizace pro normalizaci
THM	termohydromechanická metoda zhušťování
W <sub>a</sub>	aritmetická odchylka profilu vlnitosti
R <sub>a</sub>	aritmetická odchylka profilu drsnosti

## Úvod

Dřevo je materiálem provázejícím člověka od nepaměti a těší se velké oblibě i v současnosti. Díky posledním trendům, kdy je kladen velký důraz na ochranu životního prostředí, je v dnešní době velmi významným materiálem z hlediska trvalé udržitelnosti (Sandak a Sandak 2021). Lidstvo již přes půl století spotřebovává více surovin, než kolik je možno dlouhodobě dodávat, a s rostoucí spotřebou dochází k vyčerpávání neobnovitelných zdrojů. Proto se v současné době svět zabývá lepším využitím těchto surovin a zároveň orientací na obnovitelné zdroje, mezi které patří i dřevo (Neyses 2016). Jedná se o materiál, kterého lze při zodpovědném hospodaření mít prakticky nekonečnou kontinuální zásobu (Šlezingerová a Gandelová 2002). Často je v současné době nazýváno „materiálem 21. století“. I přesto však je materiálem s mnoha limity a problémy. Vhodnou úpravou dřeva lze však tyto limity posouvat, problémy zmírnit či dokonce eliminovat a otevřít dřevo širšímu využití. Díky novým výzkumům vznikají nové inovativní materiály s užitím modifikovaného přírodního dřeva. Zlepšení vlastností, které umožňuje delší životnost, může motivovat k většímu užívání modifikovaného dřeva v praxi (Sandak a Sandak 2021). Konkrétně bukové dřevo je ve velké míře se vyskytujícím lokálním produktem, hojně využívaným například při tradiční výrobě ohýbaného nábytku a dalších výrobků (MeziStromy.cz).

Zhuštěné dřevo, které je hlavním tématem této práce, je jedním z těchto modifikovaných produktů s velkým potenciálem budoucího využití, a to ať už samostatně, nebo ve spojení s jinými materiály v dřevních kompozitech. Termomechanická metoda užitá v této práci je přívětivějším způsobem ke kontinuálním procesům výroby oproti jiným metodám, využívajícím úplné plastifikace dřeva (Sikora 2021). Zhušťování dřeva má potenciál zlepšit vlastnosti běžně dostupných druhů dřeva s nižší hustotou. Rovněž se zpracováním těchto dostupnějších dřev na materiál s lepšími vlastnostmi navyšuje přidaná hodnota výsledného produktu (Neyses 2016).

Smyslem práce je základní analýza změn vybraných vlastností dřeva zhuštěného termomechanickou metodou. Výsledky práce mohou posloužit jako reference pro další rozsáhlejší výzkum.

## **Cíle práce**

Cílem práce je analýza vlivu různých stupňů zhuštění na vybrané charakteristiky bukového dřeva. Při zhušťování byly použity stupně 10, 20, 30 a 40 % tloušťkového zhuštění v tangenciálním směru. Zkoumána byla tvrdost zhuštěného dřeva a vybrané charakteristiky drsnosti a vlnitosti ( $R_a$ ,  $W_a$ ). Tvrdost byla měřena Brinellovou metodou pomocí dílenského tvrdoměru. Měření drsnosti a vlnitosti probíhalo ve směru podél a napříč vláken a bylo měřeno kontaktním profilometrem.

# 1 Modifikace dřeva

## 1.1 Význam modifikování dřeva

Modifikací dřeva se snažíme zlepšit či zachovat vlastnosti dřeva. Modifikací lze měnit nejen mechanicko-fyzikální vlastnosti, ale také například vzhled dřeva (n-i-s.cz). V principu jde o řízenou přeměnu přírodního dřeva tak, aby bylo dosaženo námi požadovaných vlastností pro danou aplikaci. Dřevo je pak možné použít i k účelům, ke kterým by jinak nebylo jako materiál vhodné. Procesy modifikace však často bývají energeticky náročné, což se projevuje na výsledné ceně produktů z modifikovaného dřeva (Sikora 2021). Modifikace můžeme rozdělit na aktivní, při kterých dochází ke změně chemické struktury, a na pasivní, kdy je dosaženo jiných vlastností bez změny chemické struktury (Sandberg *et al.* 2017).

Průmysl zabývající se modifikací dřeva v současnosti prochází velkým vývojem, částečně motivovaným i enviromentálními otázkami v případě použití některých způsobů konzervace dřeva. Výsledkem modifikace dřeva by měl být materiál, který při likvidaci po skončení životnosti nezatíží životní prostředí více než neupravené dřevo. Hlavními důvody zvýšeného zájmu o modifikované dřevo v současnosti jsou: změna vlastností dřeva následkem změn v pěstování lesů, znalost vzácných dřevin s vynikajícími vlastnostmi jako jsou odolnost a zajímavý vzhled, uvědomělost a restrikce při používání neekologických chemikálií pro zlepšení odolnosti dřeva, zvýšený zájem dřevařského průmyslu o přidanou hodnotu zpracovávaného dřeva, podpora vývoje udržitelné společnosti a celosvětový přístup ke globální změně klimatu. Hlavními komerčně využívanými způsoby modifikace dřeva jsou acetylace, furfurylace, termická úprava a impregnace/polymerizace pomocí pryskyřic. Základní modifikace dřeva můžeme podle užitého média rozdělit na chemické, termické, modifikace impregnací a modifikace zhušťováním (Jones a Sandberg 2020).

## 1.2 Druhy modifikací

### 1.2.1 Acetylace

Acetylace je procesem chemické modifikace, ve kterém je elektrofilní činidlo, nejčastěji anhydrid kyseliny octové, pomocí vnějšího tlaku vháněno do dřeva. Toto činidlo poté proniká dovnitř ztenčeninami u jehličnanů a cévami u listnatých dřevin, kdy reagují s nukleofilními hydroxylovými skupinami a reagují i hlouběji v buněčné stěně. Zvětšení objemu buněčné stěny a ztráta hydrofilních hydroxylových skupin snižuje schopnost přijímat vlhkost a zvyšuje odolnost vůči bobtnání a degradaci dřeva. Nejčastěji



je v současnosti užíváno dřeva borovice montereyské (*Pinus radiata* L.) díky její malé hustotě a struktuře s otevřenými póry. Acetylovat lze však i jiné druhy dřev. Snáze než dřevo lze acetylovat dřevovláknité desky, kdy lze snadno užít i jiných druhů dřeva při jejich výrobě (Jones a Sandberg 2020). Acetylované dřevo má menší sklony k bobtnání, lepší odolnost vůči biotickým činitelům, vyšší odolnost vůči erozi a UV záření (Sandak *et al.* 2021).

### **1.2.2 Furfurylace**

Furfurylalkohol je kapalina vyráběná z odpadních produktů v zemědělství, vznikajících například při produkci cukrové třtiny nebo kukuřice (Hill 2006). Při furfurylaci je dřevo impregnováno furfurylalkoholem za přítomnosti katalyzátoru. Následně je produkt tepelně vytvrzen a sušen. Chemické látky sloužící při výrobě jsou opakovaně použitelné. Výsledný produkt se vyznačuje vysokou tvrdostí a odolností. Má barvu do hněda, na slunci šedne. Prvním průmyslovým výrobcem je továrna Kebony v Norsku založená v roce 2009. Má kapacitu 20 000 metrů krychlových za rok. Další továrna byla otevřena v Belgii. Furfurylované dřevo je rovněž produkováno v Nizozemsku. Polymerizace furfurylalkoholu ve dřevě je složitou chemickou reakcí, a není doposud zcela jasné, zda je čistě chemického charakteru. Furfurylalkohol reaguje sám se sebou, kdy vytváří polymerickou strukturu, zřejmě reagující i s ligninem v buněčných stěnách. Poté kondenzuje na vodu a furanový kondenzát. Na výrobu se v současnosti používá borovicové dřevo. Využití dalších dřev však již bylo předmětem několika výzkumů (Jones a Sandberg 2020).

### **1.2.3 Termické modifikace**

Termické modifikace se vyznačují zejména prodloužením životnosti dřeva. Na mechanické vlastnosti mají spíše negativní účinek. Jones a Sandberg (2020) sem zahrnují hned několik procesů:

1. Sušení dřeva.
2. Termická úprava.
3. Zahřívání bez přítomnosti vzduchu, označováno jako pyrolýza a termolýza.
4. Zahřívání v přítomnosti vzduchu.
5. Hoření s plným přístupem vzduchu.
6. Nekompletní hoření s omezením přístupem vzduchu.

Obecně používanou metodou je metoda zahřívání s omezeným přístupem vzduchu s cílem zamezení vznícení dřeva. Zahříváním dochází ke změnám v chemickém složení dřeva. Tyto změny jsou v současnosti dobře popsány, spočívají ve změkčení a redistribuci komponentů ligninu, ztrátě kyselinových skupin a repolymerizace, která se děje v závislosti na druhu dřeva. Při teplotách 160 a 220 °C je hlavním cílem vylepšení odolnosti vůči biologickým činitelům, zvýšení rozměrové stability a kontrola barevných změn. Také se zmírňuje možné vytékání pryskyřice z hotového výrobku (Jones a Sandberg 2020). Teploty nad 300 °C však již způsobují značnou degradaci materiálu (Hill 2006). Základní principy tepelné úpravy jsou známy od 19. století. Historicky nejstarším způsobem je opalování dřeva například u dřevěných pilotů budov v době bronzové ve Skandinávii. Pro úpravu bez přístupu vzduchu se používá atmosféra parní, dusíková, nebo může být dřevo ponořeno do horkého oleje (Jones a Sandberg 2020).

#### **1.2.4. Impregnační polymerizace**

Jedná se o poměrně dobře prozkoumané odvětví, již v první polovině 20. století byly vyvinuty komerčně dostupné materiály s názvy Compreg a Impreg. Compreg je typicky impregnován fenolformaldehydovými pryskyřicemi, Impreg může založen na bázi fenolu, melaminu či močoviny a součástí procesu je i monomer jako například methylnmethakrylát či styren, které zajišťují tvrdnutí polymerizačními mechanismy. Produkty podobného typu jako Impreg, založené na polymethylakrylátech, byly industriálně produkovány od 50. let 20. století. Společnost Gammapar v USA začala komerční produkci akrylicky impregnovaných parketových podlah v roce 1963. V současnosti pokračuje ve výrobě společnost Nydree. Dalším produktem na podobné bázi je Lignia, vyráběn je ve Spojeném království (Jones a Sandberg 2020).

Dalším procesem, který je v současné době potenciálně využitelný, je použití takzvaného DMDHEU (1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyleneurea). Tato látka byla použita firmou BASF v letech 2010–2016 pro výrobek zvaný Belmadur. Produkce byla v roce 2016 ukončena, proces je však zkoumán za účelem vylepšení (Jones a Sandberg 2020).

#### **1.2.5 Zhušťování**

Zhušťování dřeva v principu spočívá ve zdeformování dřevní hmoty lisováním, přičemž dojde k jejímu zhutnění (n-i-s.cz). Tato metoda modifikace je hlavním tématem této práce, proto je zhušťování věnována samostatná kapitola.

## 2 Modifikace zhušťováním a její vývoj

### 2.1 Historie zhušťování dřeva

Koncept přetváření vlhkého dřeva pomocí stlačování a tepla je znám již poměrně dlouhou dobu. Technologie zhušťování dřeva ve směru radiálním se začala využívat koncem 19. století. Začátkem století dvacátého byl popsán vliv tepla a vody na proces plastifikace. Novými poznatky se poté začali zabývat v Německu, kde vznikl zcela nový produkt pod názvem Lignostone (Heger *et al.* 2004). Princip výroby spočívá v lisování předem vysušených bukových hranolů kolmo k vláknům na tloušťku zmenšenou přibližně o čtvrtinu původního průřezu. Poté se hranoly otočí o 90 stupňů a proces lisování se zopakuje. Lisování probíhá v párou vytápěných lisech, při tlaku 30–33 MPa a teplotě 105–125 °C. Výsledný produkt se napustí roztokem na bázi fenol-formaldehydu, případně lehkými oleji a při zvýšené teplotě 110 °C se vysuší (Lysý a Jírů 1961). Dalším podobným produktem s využitím tohoto principu byl například Staypak, který se objevil během druhé světové války ve Spojených státech (Heger *et al.* 2004).

Lignamon je již technicky pokročilejší typ zhuštěného dřeva vyvinutý ve spolupráci Československa a SSSR. Listnaté dřevo projde před lisováním procesem plastifikace za pomoci amoniaku, díky kterému je možno užít nižšího lisovacího tlaku než u dřeva neupraveného. Úprava probíhá v autoklávu za zvýšené teploty přibližně 100 °C. Poté dřevo projde samotným zhušťováním, dle určení lze regulací lisovacího tlaku ovlivnit míru zhuštění. Výsledné upravené dřevo má pronikavou texturu a tmavší odstín než dřevo surové (Eisner *et al.* 1983).

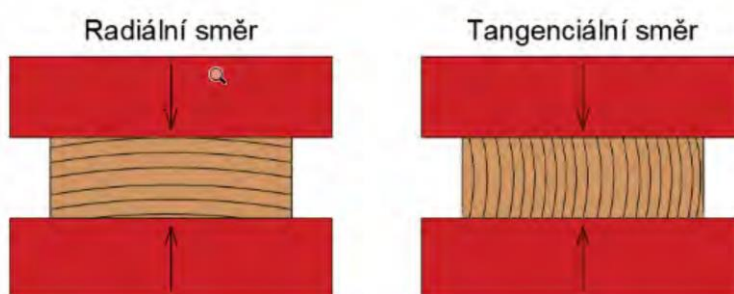
Tabulka č. 1 Vlastnosti Lignamonu v porovnání s výchozím dřevem (Eisner *et al.* 1983)

Dřevo	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Tvrdost [MPa]
Bukový Lignamon	1100	286	185	86
Buk	680	145	53	68
Břízový Lignamon	1160	295	167	93
Bříza	610	125	43	49
Topolový Lignamon	1020	260	135	61
Topol	410	55	30	30

V současnosti je známo mnoho různých metod zhušťování dřeva. Některé navazují na historicky ověřené způsoby, jiné využívají nových postupů.

## 2.2 Metody zhušťování

Základním rozdělením způsobů zhušťování je podle směru, a to buďto v podélném směru nebo ve směru příčném. Nejběžnějším způsobem je právě zhušťování ve směru příčném, kde poté rozlišujeme radiální a tangenciální směr (Sikora 2021). Dřevo je však možno lisovat prakticky ze všech směrů. Mezi další možné způsoby patří lisování dvouosé, kdy dochází zároveň k lisování v radiálním i tangenciálním směru a lisování obvodové a prostorové u válcových tvarů. Zvláštností je lisování pomocí tvarovaných desek, kdy vzniká na výrobku reliéf (Kafka *et al.* 1989).



Obrázek č. 1 Zhušťování v radiálním a tangenciálním směru (Sikora 2021)

Z hlediska efektivity při průmyslové výrobě je zajímavým řešením válcování dřeva, kdy je na rozdíl od lisování zajištěna kontinuita a rychlost procesu (Neyses 2016). Dále se zhušťování dělí na mechanické, termomechanické a termohydrmechanické (Sikora 2021).

### 2.2.1 Zhušťování mechanické

Jedná se o metodu, při které je dřevo lisováno bez jakékoliv úpravy či speciálních podmínek. Gašparík *et al.* (2016) provedl mechanické zhušťování březového a bukového dřeva pomocí hydraulického lisu za teploty 20 °C. Nejprve byly vzorky lisovány na požadovanou tloušťku po dobu 5 minut. Během další fáze byly vzorky po dobu 2 minut stlačeny. Nakonec byl tlak postupně uvolňován po dobu 3 minut. Vzorky byly následně 5 minut ponechány odležet. Následnými zkouškami bylo zjištěno, že na houževnatost nemělo zhuštění významný vliv a tvrdost byla u bukového dřeva po zhuštění mírně zvýšena, u břízy v závislosti na tloušťce významněji zvýšena.

### 2.2.2 Termomechanické zhušťování

Při termomechanickém zhušťování se dřevo obvykle lisuje v hydraulickém lisu s vyhřívanými plotnami (Laskowska 2020). Jedná se o otevřený systém, kde není kontrolována vlhkost. Pro dosažení zhuštění povrchového lze užít způsobu, při kterém je vyhřívána pouze jedna lisovací plocha. Při tomto hybridním způsobu se projevuje rozdíl hustotního profilu mezi povrchovou vrstvou a vrstvou pod povrchem, zatímco při oboustranném vyhřívání je hustotní profil stejný jako u dřeva neupraveného (Sikora 2021). Toho je možno využít například při výrobě podlahovin, kdy je žádoucí ponechat spodní vrstvu neupravenou kvůli tlumení vibrací. Takto upravené dřevo potom funguje jako kompozit podobně jako vícevrstvé podlahové materiály. Výhodou je však jednodušší recyklace, jelikož není třeba lepení více vrstev (Neyses 2016).

Laskowska (2020) provedla experimentální zkoumání vlivu zhuštění na hustotu a tvrdost buku, dubu a borovice. Vzorky byly nejprve při normálních podmínkách (teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %) vysušeny na vlhkost 9,8 %. Poté byly zahřívány při teplotě 100 °C a následně stlačeny na požadovanou tloušťku. Celkový čas vyhřívání činil 720 sekund, lisování 300 sekund. Vzorky byly poté v nevyhříváném lisu bez vyvíjení tlaku zchlazeny na teplotu 70 °C a poté opět ponechány v normálních podmínkách 7 dní. Výsledkem byla homogenizace struktury u buku a dubu. U borovice byly u tohoto parametru patrné rozdíly mezi letním a jarním dřevem. U dubu a buku byl dosažen stupeň zhuštění 28–30 %, u borovice pouze 23 %. Hustota u dubu, buku a borovice se zvýšila o 25 %, 26 % a 41 %. Nejvyšší hustoty a zároveň tvrdosti bylo dosaženo u buku, nejnižší u borovice. Hodnoty tvrdosti byly oproti nezhuštěnému dřevu dvojnásobné.

### 2.2.3 Termohydromechanické zhušťování

Princip lisování je stejný jako u termomechanického způsobu. Navíc je však realizována hydrotermická úprava dřeva, nejčastěji pomocí páry. Tato úprava má za následek zejména zmírnění navracení zhuštěného dřeva do původního stavu vlivem působení vlhkosti. Hydrotermická úprava může být realizována různými způsoby v různých fázích procesu lisování (Sikora 2021).

Jedním z možných postupů při tomto typu zhušťování je zhušťování ve vyhříváném lisu s dodatečnou úpravou pomocí horké páry. Rautkari *et al.* (2013) provedl zhuštění borovice pomocí jednostranně vyhříváného lisu s teplotou 150 °C. Vzorky lisoval na požadovanou tloušťku po dobu jedné minuty. Poté je ponechal stlačené a zároveň byla spodní vyhřívána plotna zchlazena na 80 °C za účelem zmírnění okamžitého

zpětného odpružení. Následně vzorky dodatečně hydrotermicky upravil v komoře za normálního tlaku nejprve horkým vzduchem o teplotě 140 °C po dobu 30 minut v rámci zamezení zpětného odpružení v čase. Poté do komory vpustil páru a teplotu zvýšil na 200 °C. V těchto podmínkách vzorky setrvaly po dobu 3 hodin. Vzorky byly následně sušeny 12 hodin při teplotě 103 °C. Následně byly testovány vybrané parametry materiálu. Zjištěno bylo zvýšení hustoty povrchových vrstev. Přestože dodatečná hydrotermická úprava měla za následek úbytek hmotnosti, profil hustoty se od dodatečně neupravených vzorků výrazně nelišil. Lisováním se značně zvýšila tvrdost povrchu, a to až o 90 %, nehledě na míru zhuštění. Na tvrdost měly vliv zejména povrchové vrstvy, výsledná tloušťka vzorků nehrála zásadní roli. Dodatečná hydrotermická úprava neměla na tvrdost žádný vliv.

Heger *et al.* (2004) vyvinul metodu zhušťování ve speciálním reaktoru. Válcové vzorky byly zhuštěny v radiálním směru za působení nasycené páry s mírou stlačení 66 %. Nejprve byl vzorek v reaktoru zahřátý nasycenou párou na teplotu 140 °C, kde během 10 minut probíhá plastifikace, poté byl stlačen na požadovaný objem. Maximální síla stlačení byla přibližně 22 kN. Po stlačení byly vzorky dodatečně upraveny nasycenou párou za teploty 140 až 200 °C. Píst zůstal ve stejné pozici po zhuštění i při dodatečné úpravě. Poté byla z reaktoru pára vypuštěna a vzorek ochlazen na 60 °C. Tato metoda se osvědčila ve zlepšení mechanických vlastností a snížení hygroskopicity. Díky dodatečné úpravě dochází k oslabení vazeb realizovaných mezi deformovanými mikrofibrilami a ligninem pomocí hemicelulóz a nastává uvolnění vnitřního pnutí. Hydrolýza hemicelulóz a jejich následné vyplavení vedou k zeslabení spojení mezi mikrofibrilami a ligninem. Hydrolýza hemicelulóz je zásadní pro snížení pnutí v dřevních komponentech. Kompletní fixace byla získána při 180 °C po 20 minutách nebo při 140 °C po 3 hodinách a 28 minutách. Exponenciální pokles času se zvýšením teploty páry koresponduje s exponenciálním nárůstem kinetiky hydrolýzy hemicelulóz.

Další metodou nazvanou VTC (Viscoelastic thermal compression) se zabýval Kutnar *et al.* (2008). Tento proces spočívá ve stlačování dřeva po změkčení jeho buněčných stěn, čehož je dosaženo hydrotermickou úpravou před lisováním. Je užito páry se zvýšeným tlakem, za účelem dosažení teplot vyšších, než je teplota skelné přeměny dřeva. Tento stav umožňuje mechanické lisování dřeva bez porušení buněčných stěn. Tím je zvýšena síla a tuhost dřeva. Dřevo dosáhne změny barvy z bělavé do hnědé. Pro experiment bylo užito dřeva topolu. Vzorky byly nejprve vystaveny působení nasycené

páry pod tlakem 860 kPa a teplotě 175 °C. Poté je pára vypuštěna a následuje lisování na cílenou tloušťku pomocí tlaku 1380 kPa. Po lisování je teplota ploten zvýšena na 175–200 °C po dobu 5 minut, čímž se zajistí uvolnění vnitřního pnutí a produkt se stabilizuje. Poté dojde k ochlazení na 100 °C. Celkově trval proces 15 minut. Výsledkem byly mírné změny v chemické struktuře a značné změny v charakteru povrchu, kdy byla zjištěna snížená smáčivost a zvýšená hydrofobnost.

#### **2.2.4 Úprava pomocí chemických látek**

Další možností úpravy dřeva pro dosažení lepší stability po lisování je pomocí chemických látek. Jako příklad plastifikace amoniakem zde již byl uveden historický produkt Lignamon. Dalším možným způsobem chemické úpravy je například použití fenolformaldehydové (PF) pryskyřice.

Vlivem zhušťování na dřevo japonského cedru napuštěného PF pryskyřicí se zabýval Shams *et al.* (2006). Vysušené vzorky byly namočeny do 20% vodného roztoku pryskyřice. Následně byly udržovány střídavě 12 hodin pod sníženým tlakem a poté dalších 12 hodin za atmosférického tlaku a teploty 20 °C. Cyklus byl opakován sedmkrát, aby se docílilo co největší penetrace dřeva pryskyřicí. Po třech dnech sušení na vzduchu byly vzorky vakuově dosušeny při 50 °C po dobu 12 hodin. Poté byly vzorky lisovány ve vyhřívaném lise za teploty 150 °C v radiálním směru za tlaku 10 MPa. Po dosažení tohoto tlaku byly 30 minut v lise ponechány, aby se umožnilo vytvrzení pryskyřice. Bylo zjištěno celkové zlepšení mechanických vlastností, obzvláště u dřeva nižší hustoty.

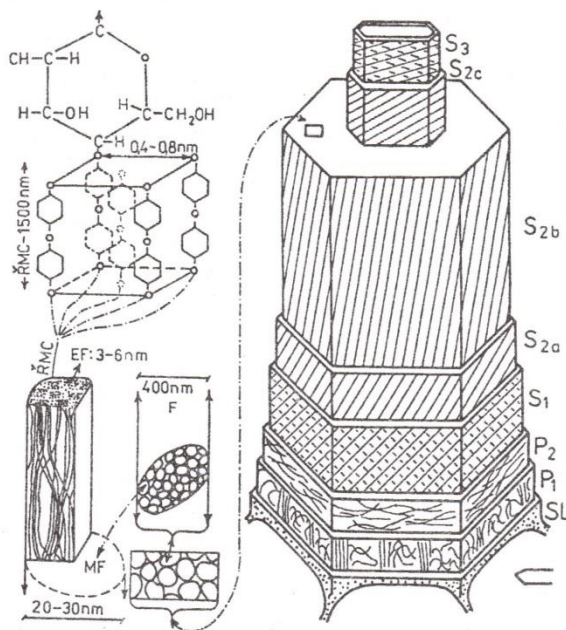
### **2.3 Zhušťování dřeva ve vztahu ke struktuře dřeva**

#### **2.3.1 Struktura dřeva**

Dřevo je ve své podstatě přírodním kompozitním materiálem. Skládá se ze tří základních složek, označovaných také jako biopolymery – ligninu, hemicelulóz a celulózy. Základní strukturální složkou je krystalická celulóza. Lignin je jakýmsi adhezivem, které spojuje zbylé dvě hlavní složky, čímž je dosaženo lepší mechanické pevnosti (Sikora 2021).

Tyto základní složky následně tvoří anatomickou strukturu dřeva. Základním elementem je buňka, jejíž buněčná stěna je tvořena elementárními fibrilami z celulózy. Několik desítek těchto fibril je dále sloučeno v mikrofibrily, kde je již mírné zastoupení hemicelulóz a ligninu. Vnější vrstva buněčné stěny se označuje jako střední lamela. Mívá vysoký obsah ligninu, dalšími složkami jsou hemicelulózy a pektinové látky. Je nazývána

také jako lepící lamela, jelikož slouží ke spojení mezi buňkami. Základním stavebním elementem buněčné stěny je sekundární buněčná stěna. Tvoří značnou část celkové tloušťky buněčné stěny. Zajišťuje tvar elementů dřeva. Skládá se ze tří vrstev označovaných S1, S2, S3. Vrstvy mají odlišnou orientaci mikrofibril. Vrstva nejhlouběji v buňce má zanedbatelný vliv na mechanické vlastnosti. Nejpriznivější vliv na tuhost a pevnost má vrstva S2, díky odklonu mikrofibril. (Sikora 2021, Šlezingerová a Gandelová 2002).



**Obrázek č. 2** Schematicky vyobrazená struktura buněčné stěny. ŘMC jsou řetězcové makromolekuly celulózy, EF – elementární fibrila, MF – mikrofibrila, F – makrofibrila, SL – střední lamela, P 1,2 – vrstvy primární stěny, S1 – vnější vrstva sekundární stěny, S2a, 2b, 2c – podvrstvy střední vrstvy sekundární buněčné stěny, S3 – vnitřní vrstva sekundární stěny (Požgaj *et al.* 1993, Šlezingerová a Gandelová 2002)

Morfologicky lze pozorovat pletiva a izolované buněčné elementy. Typy buněk se liší podle dřeviny, nejzásadnější je rozdělení na listnaté a jehličnaté, kde je zásadně odlišná struktura. Jehličnany mají jednodušší stavbu dřeva, které je z většiny tvořeno tracheidami. Zásadním rozdílem mezi jehličnatými a listnatými dřevy je užší specializace buněk dřeva listnatého, čímž se od sebe jednotlivé buňky odlišují i morfologicky. V listnatém dřevě se vyskytují tracheje i tracheidy. Librifonní vlákna listnatého dřeva mají podíl na mechanické funkci. Tato uskupení se následně promítají do makroskopické struktury dřeva. Pozorovatelné jsou rozdíly mezi jarním a letním dřevem, bělí a jádrem a

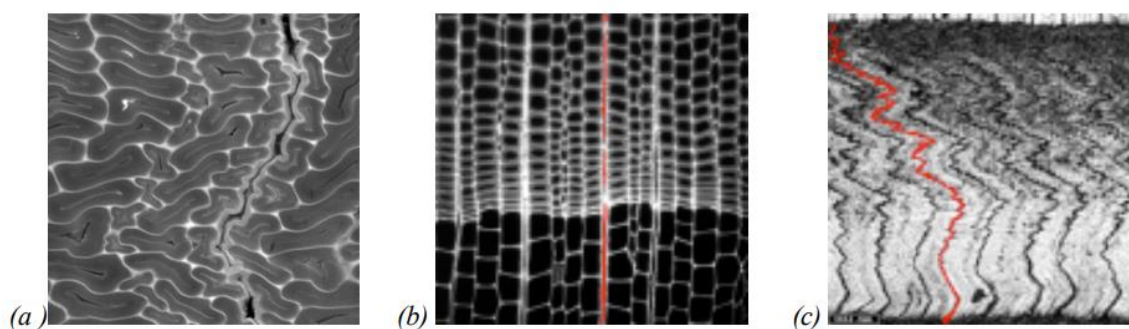


v neposlední řadě různé vady dřeva, které se také značně podílí na výsledných mechanických vlastnostech (Sikora 2021).

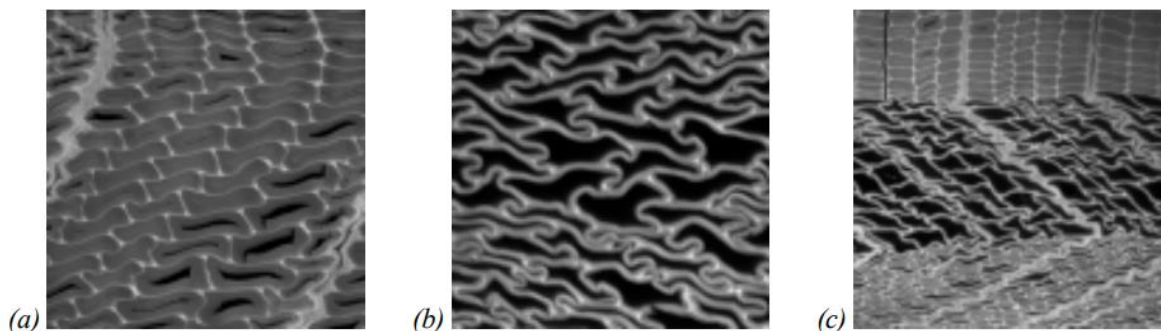
### 2.3.2 Vliv zhušťování na strukturu

Zhuštění dřeva nastává v principu díky redukci prázdných míst ve dřevě. Jedná se hlavně o redukci lumenů, což jsou prázdné prostory uvnitř dřevních buněk. Dochází přitom k deformacím buněčné stěny, která lumeny obklopuje (Kutnar *et al.* 2008).

Heger *et al.* (2004) se zabýval vlivem termohydromechanické metody na strukturu dřeva smrku. Tyto vlivy jsou patrné z mikroskopických snímků zhuštěného dřeva. Na snímku (1a) je patrné uzavření téměř všech lumenů a zhuštění. Zhuštění v radiálním směru má za následek také deformaci dřeňových paprsků v podobě klikatých útvarů na obrázcích (1b, 1c). Z porovnání snímků buněk před a po zkouškách máčení a vysoušení je zřejmé, že lumeny jarního dřeva se otevřely více než u dřeva letního (2a, 2b). Jarní dřevo se vyznačuje většími lumeny s tenčími buněčnými stěnami než letní dřevo. Následkem toho se buňky jarního dřeva při zhuštění zdeformují více a jejich mikrofibrily jsou vystaveny většímu vnitřnímu pnutí než u buněk letního dřeva. Během cyklického namáčení a sušení, kdy dojde k oslabení fyzikálně chemických vazeb, se tyto mikrofibrily s větším pnutím vrací rychleji do původního stavu před zhuštěním. Toto otevírání buněk se nejprve projevuje na rozhraní mezi jarním a letním dřevem a postupuje se zvyšujícím se navracením do původního tvaru. Buňky letního dřeva se takto otevírají až po otevření buněk jarního dřeva. Tento jev závisí zejména na rozložení vnitřního pnutí v buňkách.



Obrázek č. 3 Zhuštěné dřevo pod mikroskopem. a) Zbylé póry buněk letního dřeva a dřeňových paprsků ve zhuštěném dřevě. b) Dřeňové paprsky v nezhuštěném dřevě. c) Zhuštěný smrk. Zhuštění mělo za následek vytvarování paprsků do klikatého tvaru (Heger *et al.* 2004)



**Obrázek č. 4** Zhuštěné dřevo po cyklu máčení a sušení pod konfokálním mikroskopem. a) Pootevřené buňky letního dřeva. b) Široce otevřené buňky jarního dřeva. c) Široce otevřený přechod letní–jarní dřevo (Heger *et al.* 2004)

Elastické napětí, které je během zhušťování v semikrystalických mikrofibrilách, hemicelulózách a v ligninu, je hlavní příčinou zpětného odpružení v čase. Deformovaný tvar zhuštěného dřeva zůstává nezměněn, pokud jsou deformované mikrofibrily spojeny s ligninem a celulózu pomocí hemicelulózy silnými kovalentními a rovněž vodíkovými vazbami i přes setrvávající elastické napětí. Podmínky vznikající v prostředí vysokotlakové páry způsobují hydrolyzu polysacharidů, zejména hemicelulóz, které jsou méně chemicky odolné než celulóza mikrofibril a do určité míry i ligninu. Během konečné úpravy je hydrolyza katalyzována kyselinou octovou a glykosidové vazby jsou degradovány štěpením etherových vazeb na krátké molekuly, což vede k oslabení vazeb mezi mikrofibrilami a ligninem. Náhlým poklesem tlaku dojde k nahrazení části oligosacharidů v mikrofibrilách vodou. Během dodatečné úpravy, když je tlak udržován pístem, dochází tedy k oslabení vazeb mezi mikrofibrilami a ligninem díky hydrolyze hemicelulóz. Hemicelulózy jsou poté odstraněny vyluhováním, čímž zanechávají prostor pro pohyb celulózových mikrofibril. Chemické degradace způsobené zvýšenou teplotou při dodatečné úpravě zejména u hemicelulóz a ligninu mají za následek snížení koheze mezi komponenty dřeva, zejména mezi mikrofibrilami celulózy a ligninem. Tyto degradace jsou pravděpodobně příčinou zvýšené křehkosti, zvláště při teplotách okolo 180 stupňů, kdy je lignin více degradován (Heger *et al.* 2004).

Z mechanického hlediska je takto upravené zhuštěné dřevo slibným materiálem, jehož mechanické vlastnosti jsou zlepšeny. Dřevo má lepší smykovou odolnost a tvrdost. Zlepšení těchto vlastností je následkem uzavření lumenů, čímž se snižuje pórovitost ze 60–75 % na 10–15 % a také chemické modifikace dřevních látek. Rovněž je lepší odolnost vůči vlhkosti, a to částečně následkem vyplavení hemicelulóz, díky čemuž se

stane dřevo méně hydrofilní (Heger *et al.* 2004). Tepelná úprava dřeva vede k částečné degradaci hemicelulóz a reorganizaci lignocelulózních polymerů, které jsou hlavní příčinou hydrofobního charakteru tepelně upraveného dřeva (Kutnar *et al.* 2008).

## **2.4 Významné jevy související se zhušťováním**

### **2.4.1 Okamžité zpětné odpružení**

Okamžité zpětné odpružení neboli „spring-back“ nastává okamžitě po uvolnění lisovacího tlaku. Tento efekt je přičítán uvolnění elastických napětí v chemických vazbách dřeva způsobených vnějším zatížením. Míra tohoto jevu se odvíjí od vlhkosti a teploty dřeva. U plastifikovaného dřeva je tento efekt výraznější než u dřeva které neprošlo plastifikací a má teplotu pod úrovní teploty skelného přechodu. „Spring-back“ nelze zcela eliminovat (Neyses 2016).

### **2.4.2 Zpětné odpružení v čase**

Jedním z hlavních problémů při výrobě zhuštěného dřeva je jev zvaný „set-recovery“ neboli zpětné odpružení v čase. Při vystavení zvýšené vlhkosti je zhuštěné dřevo schopno bobtnat téměř do původních rozměrů před zhuštěním. Tento jev souvisí s tvarovou pamětí dřeva a je způsoben uvolněním vnitřních pnutí ve zhuštěných dřevních buňkách (Neyses 2016). Rautkari *et al.* (2009) pozoroval po několika cyklech vystavení zhuštěného dřeva střídavě nízké a vysoké vlhkosti kompletní návrat tvaru povrchově zhuštěného dřeva.

Po zhuštění je plastifikované dřevo ochlazeno a vysušeno. Po zchlazení pod teplotu skelné přeměny lignin, hemicelulózy a semikrystalické celulózy ztuhnou a snížení molekulární termální aktivační energie a obsahu vlhkosti umožní zformování Van der Waalových a vodíkových vazeb na molekulární úrovni. Původně pouze pružně deformovaná krystalická celulóza se tak zafixuje plasticky zdeformovaným ligninem, hemicelulózami a semikrystalickými celulózami. Tento stav však není stabilní. Pokud dojde k opětovné plastifikaci zhuštěného dřeva například mokrem nebo vzdušnou vlhkostí bez nějakého způsobu fixace, vrátí se do původních rozměrů, protože se uvolní elastická deformace krystalické celulózy. Zhuštěné dřevo se potom v praxi vrátí na 70–90 % původních rozměrů. To je způsobeno buďto poškozením buněk, nebo uvolněním napětí ve dřevě v průběhu plastifikace. Jakmile se buňky vrátí do původního stavu, zmizí i vylepšené vlastnosti zhuštěného dřeva. Proto byly navrženy následující postupy, jak tento efekt zvrátit (Neyses 2016):

- Uvolněním vnitřního pnutí ve dřevě během zhušťování například použitím THM.
- Omezením nasáklivosti buněčné stěny pomocí termické úpravy.
- Formace vazeb mezi molekulami dřeva chemickou modifikací – například acetylací nebo pomocí formaldehydu.
- Mechanické fixace pomocí hřebíků, šroubů, lepidel, epoxidové pryskyřice, impregnace.

## 2.5 Význam zhušťování

Zhušťování dřeva má příznivý vliv na většinu mechanických vlastností. Po hydrotermické modifikaci dřeva mají výsledné produkty vyšší hustotu, odolnost vůči biotickým činitelům, sníženou rovnovážnou vlhkost ovlivněnou prostředím a větší rozměrovou stabilitu. Působení vlhkosti a tepla způsobuje změny na chemické úrovni, které se projevují znatelnou změnou zbarvení. Nastalé tvarové změny jsou významné, jejich míra závisí na stupni zhuštění. Mění se také struktura povrchu, což může mít vliv krom vlastností sledovaných v této práci jako je drsnost, tvrdost, vlnitost, například i na smáčivost povrchu, která je významná pro lepení a nátěry (Kutnar *et al.* 2008).

Pro lisování se u nás používá zejména listnaté dřevo. Jehličnaté dřevo je méně vhodné zejména kvůli značným rozdílům mezi vlastnostmi jarního a letního dřeva. Důležitá je vysoká kvalita vstupní suroviny, vady ve dřevě jako jsou například suky, negativně ovlivňují lisovací proces. Cílem zhušťování dřeva je zejména zlepšení mechanických vlastností. Nejvýznamnějším přínosem této úpravy je zvýšení pevnosti a tvrdosti (Eisner *et al.* 1983). Takto upravené dřevo potom může do budoucna sloužit například jako náhrada exotických dřev s velkou hustotou, jejichž dovoz je zatížen vysokými ekonomickými náklady vzhledem k omezenému množství a vzdálenosti, jednak možnými etickými otázkami a v neposlední řadě ekologickými dopady těžby na životní prostředí a obyvatele vyvázejících zemí (Neyses 2016). Lisované dřevo se v praxi užívá například ve slévárenství k výrobě forem, k dekorativním účelům jako drobné výrobky, k výrobě kluzných součástí, na podlahy, části hudebních nástrojů či v nábytkářství (Janák a Král 2003).

### 3 Fyzikální vlastnosti ve vztahu ke zhušťování dřeva

#### 3.1 Hustota dřeva

Hustota dřeva je významným činitelem, co se týče jeho vlastností mechanických a fyzikálních. Dle hustoty lze dřevo kategorizovat na vhodné účely. Hustota dřeva je přímo ovlivněna vlhkostí. U vlastnosti přímo označované jako hustota dřeva bereme v potaz vlhkost dřeva, která je stejná jak pro hmotnost, tak pro objem, a je poměrem hmotnosti ku objemu dřeva (Požgaj *et al.* 1993):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg \cdot m^{-3}] \quad (1)$$

Kde  $m_w$  je hmotností dřeva při určité vlhkosti v kg,  $\rho_w$  je hustotou dřeva při určité vlhkosti v  $kg \cdot m^{-3}$  a  $V_w$  je objemem dřeva při určité vlhkosti v  $m^3$  (Požgaj *et al.* 1993).

Nejpoužívanějšími jednotkami pro hustotu jsou  $kg \cdot m^{-3}$  a  $g \cdot m^{-3}$ . V literatuře se běžně udávají hodnoty při 12% vlhkosti dřeva. Pro výpočet se též užívá hodnot při vlhkosti dřeva 0 %, tedy v absolutně suchém stavu (Požgaj *et al.* 1993).

Druhy dřev lze rozdělit podle hustoty do skupin. Dělení je v posloupnosti od dřev s hustotou nízkou ( $\rho_{12} < 550 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ ) přes dřeva s hustotou střední ( $\rho_{12} = 550\text{--}750 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ ) až po dřeva s hustotou vysokou ( $\rho_{12} > 750 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ ) (Šlezingerová a Gandelová 2002).

Při zhušťování dřeva dochází ke značnému zvýšení hustoty. Její hodnota se odvíjí od stupně zhuštění (Rautkari *et al.* 2013).

### 3.2 Vlhkost dřeva

Dřevo je hygroskopickým materiálem, tudíž je schopno zadržovat vodu. Množství vody ve dřevě označujeme jako vlhkost. Vlhkost výrazně ovlivňuje mechanicko-fyzikální vlastnosti dřeva. Absolutní vlhkost je poměrem hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva. Relativní vlhkost je poměrem hmotnosti vody a mokrého dřeva (Požgaj *et al.* 1993). Relativní a absolutní vlhkost lze spočítat dle vzorců (Požgaj *et al.* 1993):

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} * 100 = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 [\%] \quad (2)$$

$$w_r = \frac{m_v}{m_w} * 100 = \frac{m_w - m_0}{m_w} * 100 [\%] \quad (3)$$

Kde  $w_a$  je absolutní vlhkost,  $w_r$  je relativní vlhkost,  $m_0$  je hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu a  $m_w$  je hmotnost dřeva při vlhkosti  $w$  (Požgaj *et al.* 1993).

Čím vyšší je vlhkost zhušťovaného dřeva a teplota zhušťování, tím je dřevo více ochotné se zhušťovat. Vlhkost má vliv na skelný přechod částí dřeva a způsobí změknutí dřeva (Laskowska 2020). Se zvyšující se vlhkostí klesá teplota potřebná pro dosažení skelného přechodu. Vlhkost má však také negativní vliv, kdy vlhké prostředí způsobuje navrácení zhuštěného dřeva do původního tvaru před zhuštěním (Neyses 2016).

## 4 Mechanické vlastnosti ve vztahu ke zhušťování dřeva

### 4.1 Tvrdost dřeva

Tvrdost je schopnost odolat vniknutí cizích těles do struktury dřeva. Tato schopnost je ovlivněna zejména tvarem cizího tělesa a anatomickým směrem vnikání tělesa do dřeva. Tato vlastnost se obecně začala zkoumat asi před 300 lety, u dřeva asi před 160 lety. Prvním, kdo se pokusil vědecky popsat tvrdost dřeva, byl H. Nördlinger (1860). Seskupil dřevěné materiály podle náročnosti příčného řezání a rozdělil je do osmi skupin tvrdosti. To našlo své využití zejména ve stavitelství. Jednalo se pouze o relativní metodu, která však uspokojovala tehdejší potřeby. Na počátku 18. století L. de Buffon poprvé popsal souvislost mezi tvrdostí a hustotou materiálů (Vörös a Németh 2020).

Tvrdost povrchu má značný vliv na obrobitelnost dřeva. Také je důležitým faktorem u podlah, nábytkových dřív, v kuchyňském a kancelářském nábytku. U parketových podlah přímo souvisí s jejich nejdůležitějšími parametry, což jsou odolnost vůči poškrábání, opotřebení a ošoupaní. Běžný způsob zkoušky tvrdosti spočívá ve vtlačování tvrdého nástroje se známou geometrií do dřeva, a tvrdost je následně zjištěna z poměru použité síly a velikosti otlačení. U elastických materiálů se tvrdost určuje při zatížení, protože vzniká minimální, či dokonce žádná permanentní deformace, zatímco u plastických materiálů se měří jejich trvalá deformace. V Evropě se nejvíce užívá Brinellovy metody, na americkém kontinentu se více užívá Jankova metoda. Brinellova metoda se podle výzkumů ukazuje jako vhodnější než Jankova metoda, která je náchylnější k nežádoucím jevům při měření (Grekin a Verkasalo 2013). Jankova metoda užívá ocelové kuličky o průměru 11,284 mm. Ta je zatlačována do vzorku do poloviny jejího průměru. Užitá síla potřebná k zatlačení hemisféry pod okolní povrch je pak ukazatelem tvrdosti (Hirata *et al.* 2001).

Zkouška tvrdosti je relativně levným způsobem, jak zjistit kvalitu dřeva bez způsobení velkých poškození vzorku. Vzhledem k propojení s hustotou se dá odhadnout i zcela nedestruktivně, avšak přesné stanovení je náročné a nelze ji stanovit pouze dle hustoty (Lykidis *et al.* 2016).

Šlezingerová a Gandelová (2002) dělí dřeva dle tvrdosti čelní, při vlhkosti 12 % na:

- Měkká (<40 MPa) - topol, smrk, jedle, lípa, olše.
- Středně tvrdá (41–80 MPa) - dub, modřín, jilm, platan, buk.
- Tvrdá (81–100 MPa) - habr, akát.
- Velmi tvrdá (101–150 MPa) - některé keře.
- Super tvrdá (>150 MPa) - exotická dřeva – guajak, eben.

Tvrdot může být v různých částech kmene odlišná. To je dáno zejména anizotropním charakterem dřeva (Šlezingerová a Gandelová 2002). Značný rozdíl je mezi tvrdostí letního a jarního dřeva. Obecně má letní dřevo vyšší tvrdost než jarní dřevo (Hirata *et al.* 2001).

Vzhledem k souvislosti hustoty a tvrdosti u zhuštěného dřeva předpokládáme zvýšení tvrdosti (Rautkari *et al.* 2013). Právě zvýšení tvrdosti je jedním z hlavních cílů zhušťování (Neyses 2016).

#### **4.1.1 Měření tvrdosti podle Brinella**

Tento způsob měření tvrdosti byl představen v roce 1900. Má velký význam i v dnešní době, a ačkoliv byl původně vytvořen pro měření tvrdosti kovů, našel výrazné uplatnění i v oblasti dřevařství (Vörös a Németh 2020). Měření probíhá tak, že přístroj vtlačuje kuličku do povrchu vzorku. Je užití síly přiměřené průměru kuličky a zkoušenému materiálu. V porovnání s jinými testy Brinellova kulička dělá nejhlubší a nejširší prolis, takže test průměruje tvrdost na větší ploše materiálu, čímž lépe zaznamená celou strukturu a nepravidelnosti. Na druhou stranu zanechá na povrchu výraznější stopu (Petřík *et al.* 2008).

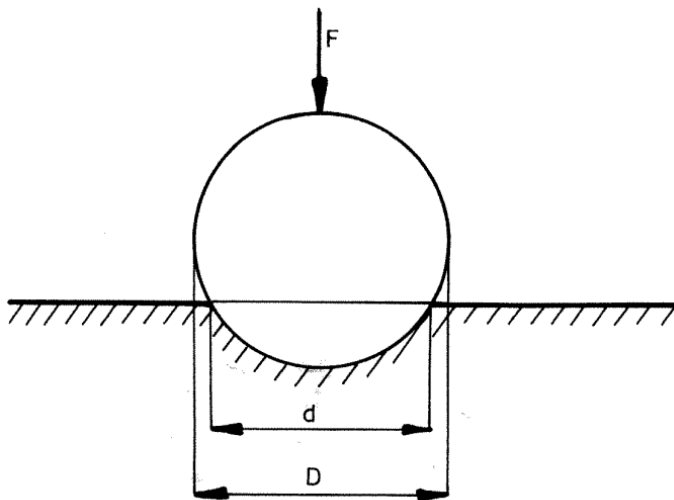
U dřeva se běžně užívá ocelové kuličky o průměru 10 mm (Lykidis *et al.* 2016). U měření tvrdších materiálů je možno použít kuličky z wolframu. Tato metoda měření se pak označuje jako HBW (z anglických slov hardness, Brinell, wolfram). Metoda měření ocelovou kuličkou se označuje HBS (podle slov hardness, Brinell, steel) (Petřík *et al.* 2008). Pro měření je možno použít různě velké síly. Například Lykidis *et al.* (2016) užil ke zkoušce tvrdosti dřeva síly 1000 N po dobu 25 s. Sám tvůrce metody Brinell použil pro dřevo sílu 500 N (Vörös a Németh 2020). Požgaj *et al.* (1993) dělí užití síly dle předpokládané známé tvrdosti dřev, kdy u velmi měkkých dřevin popisuje užití síly 100 N, u středně tvrdých síly o velikosti 500 N a u velmi tvrdých 1000 N.



Tvrdość dle Brinella je spočtena z průměru otlačeného obrysu, který je změřen s přesností 0,2 mm. Nevýhodou oproti Jankově metodě je náročné měření otisku konzistentně a s vysokou přesností vizuálně. Může se vyskytnout jev zvaný „propad“, který je možné pozorovat na okrajích otisku v radiálním a tangenciálním směru. Tento jev způsobuje těžší vizuální určení velikosti otisku, protože zkouška je teoreticky založena na měření přesného otisku kuličky. Na základě toho byly zkoumány alternativy. Například je současnými technologiemi možno měřit hloubku otisku s vysokou přesností, ze které je možné následně spočítat velikost otisku. Určení hloubky otisku nebere v potaz přesný tvar otisku ve dřevě. Touto metodou může být zároveň určena pružnost povrchu dřeva (Lykidis *et al.* 2016). Pro výpočet tvrdości z průměru otisku slouží následující vzorec:

$$H_B = \frac{F}{D\pi h} = \frac{2F}{D\pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

Kde  $H_B$  je tvrdość dle Brinella,  $F$  je síla působení zkušebního tělesa,  $D$  je průměr tělesa,  $h$  je počáteční hloubka vtisku,  $d$  je průměr vtisku (Grekin a Verkasalo 2013, Vörös a Németh 2020)



Obrázek č. 5 Schématické znázornění měření tvrdości dle Brinella.  $F$  je síla působící na kuličku,  $d$  je průměr otisku,  $D$  je průměr kuličky (Požgaj *et al.* 1993)

## 4.2 Drsnost a vlnitost

Každý materiál má povrch složen z miniaturních vrcholků a prohlubní. Velikost a rozmístění těchto prvků má vliv na vlastnosti povrchu. Hlavními cíli zkoumání povrchu materiálu je jednak určení vlastností povrchu ve vztahu k následnému užití výrobku a

jednak sledování výrobního procesu. Speciálně u dřeva je velkým měřítkem při určování výsledného povrchu estetický faktor. Není vždy cílem co nejhladší povrch. Bylo vyvinuto množství technologií umožňujících tvorbu záměrně hrubého, nepravidelného povrchu za účelem dosažení unikátního vzhledu. Jedná se zejména o podlahy či obklady. Dále je u některých zákazníků žádaný nábytek vyrobený tak, aby vzhledem byl opotřebený, i za cenu vyšších nákladů. Drsnost obrobeného dřeva je spjata s opotřebením dřevoobráběcích nástrojů. Sledování drsnosti může poukázat na opotřebením obráběcího nástroje a naopak. Na drsnosti dále závisí pevnost lepení a jiné mechanické vlastnosti. Pokud je například vyrobená dýha příliš hrubá, může se kvalita spoje snížit až o třetinu v porovnání s hladkou dýhou. Dle studií hladší povrch potřebuje méně nátěrové hmoty a barva dosáhne lepších vlastností (Sandak a Negri 2015, Ímirzi *et al.* 2013).

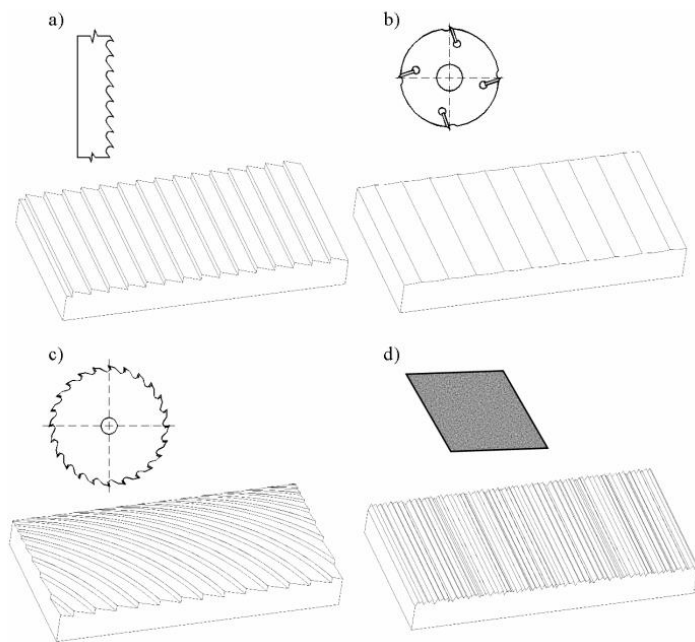
Drsnost je nejběžnějším způsobem popisování celistvosti povrchu. Drsnost Sandak a Negri (2015) definují různými způsoby jako:

1. Každá hodnota aritmetického průměru drsnosti ( $R_a$ ) a dalších souvisejících veličin. Tyto hodnoty se běžně uvádí v mikrometrech [ $\mu\text{m}$ ].
2. Blízce kladené komponenty textury povrchu.
3. Textura, která není hladká, ale vyznačující se nepravidelnostmi a nerovnostmi.
4. Drobné nerovnosti povrchu, které jsou důsledkem obráběcího procesu.
5. Detail geometrie pevného povrchu, zaměřený na odchylky ve výšce.
6. Odchylka od průměrné přímky profilu povrchu drsnosti.
7. Odchylka od ideálního povrchu, rovného na molekulární úrovni.

Zásadní vliv na povrch dřeva má obrábění. Pořezem dřeva dochází k narušení anatomických elementů a vzniku komplexního povrchu. Další vliv na strukturu povrchu mají faktory jako anizotropie, hustota, vlhkost, kinematika řezných procesů, opotřebením nástrojů a další (Sandak a Negri 2015).

Tyto faktory Sandak a Negri (2015) třídí následovně:

- Vlhkost – Dřevo jako hygroskopický materiál při přejímání vlhkosti z okolního prostředí bobtná a sesychá, čímž se mění velikost a tvar. Navíc malé pozůstatky a nedokonalosti po opracování jako jsou třísky a vlákna mají tendenci se zvýšenou vlhkostí vystupovat z povrchu. Vliv mohou mít i malé změny vlhkosti.
- Hustota dřeva a pórovitost – Pórovitost a hustota a s tím související tvrdost má značný vliv na drsnost.
- Anatomie – Dřevo je složeno z nevyplněných podlouhlých buněk probíhajících vedle sebe celou délkou kmene. Kvůli tomu nebude nikdy povrch zcela hladký.
- Kinematika řezných procesů – Při obrábění mohou vznikat různé typy povrchů (viz. Obrázek č. 6). Každý povrch má jinou geometrii, směr řezu a parametry jako rychlost posuvu a řeznou rychlost. Lze vytvořit matematický model.
- Stav stroje – Jedná se o další parametry, které nespádají pod kinematiku řezání. V praxi jsou dalšími faktory konstrukce stroje, vibrace, opotřebení nástroje, kvalita ostření, uchycení nástroje a obrobku.
- Další faktory – Vliv na povrch dřeva může mít dále teplota, vlhkost vzduchu, povrchová úprava (nátěrové hmoty), oxidace a degradace, biotičtí činitelé (hniloba, hmyz).



**Obrázek č. 6 Různé povrchy v závislosti na použitých procesech obrábění. a) řez pásovou pilou, b) frézování, c) řez kotoučovou pilou, d) broušení (Sandak a Negri 2015)**

Vlnitost je v principu velice podobná drsnosti a je ovlivněna stejnými jevy, avšak označuje nerovnosti vyskytující se v delších intervalech než u drsnosti. Jedná se o odchylku od ideálně rovného povrchu, která se vyskytuje v delších intervalech, než je hloubka nerovnosti. (keyence.com). Vlnitost má v zásadě delší vlnovou délku než drsnost (viz. Obrázky č. 9 a 10) (digitalmetrology.com).

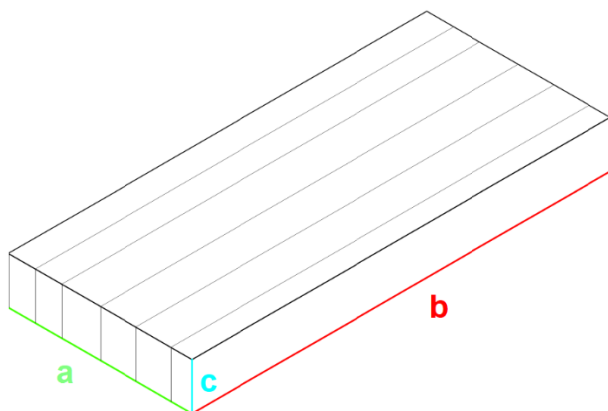
Předpokládá se, že zhušťování má za následek snížení drsnosti a vlnitosti povrchu. Neplatí to však ve všech případech. Ímirzi *et al.* (2013) při nižších teplotách dle předpokladů pozoroval snížení drsnosti, avšak při zvýšení teploty zhušťování na 160 °C pozoroval naopak její nárůst.

## 5 Metodika

### 5.1 Popis vzorků

Vzorky pro experimentální část práce byly vyrobeny z bukového dřeva. Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) se řadí mezi listnaté, roztroušeně pórovité dřeviny. Jeho dřevo je střední tvrdosti, čelní tvrdost při vlhkosti 12 % je průměrně 61 MPa. Jedná se o dřevo se střední hustotou, která činí průměrně  $670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Buk je díky svým vlastnostem velmi významnou dřevinou v dřevařském průmyslu. Využívá se k výrobě nábytku, charakteristickým produktem je nábytek ohýbaný. Vyrábí se z něho překližky, lamely, loupané i krájené dýhy a rovněž lisované dřevo. Lze jej také využít při výrobě aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Hodí se na výrobu předmětů z oblasti domácích potřeb. Je málo odolný vůči škůdcům, avšak je dobře impregnovatelný (Matovič 1984).

Z bukového dřeva byly vytvořeny radiální lamely šíře 35 mm. Byly vyrobeny za užití běžných postupů a vymanipulovány tak, aby byly bez vad. Délka výsledných vzorků činila 80 mm a tloušťka 9 mm (viz. Obrázek č. 7).



Obrázek č. 7 Rozměry vzorků, a – šířka, b – délka, c – tloušťka

### 5.2 Zhušťování vzorků

Zhuštění bylo provedeno termomechanickou metodou. Vzorky byly zhuštěny v celém objemu, ve směru tangenciálním. Bylo užito hydraulického lisu TOS Rakovník s oboustranným vyhříváním. Lisování probíhalo při teplotě desek  $140 \text{ °C} (\pm 5 \text{ °C})$ . Lamely měly před lisováním vlhkost 12 % ( $\pm 1 \text{ %}$ ) zajišťující podmínky pro skelný přechod. Podmínky lisování jako je tlak a čas pro příslušný stupeň zhuštění jsou uvedeny v Tabulce č. 2.

Tabulka č. 2 Tlak a čas zhušťování pro dané stupně zhuštění

Stupeň zhuštění [%]	Tlak [MPa]	Čas [min]
10	37,7	9
20	39,3	10
30	42,7	11
40	43,4	12

### 5.3 Příprava vzorků

Vzorky byly rozčleněny a označeny. První číslo označovalo hodnotu zhuštění (10, 20, 30, 40) a druhé číslo za lomítkem bylo číslem vzorku v dané skupině. Vzorky označené jako R byly neupravené, sloužící jako referenční. Zkušební vzorky byly zváženy a jejich rozměry změřeny posuvným měřítkem. Tloušťka a šířka byla měřena u každého vzorku na třech místech – na krajích a uprostřed. Délka byla změřena v prostřední části vzorku.



Obrázek č. 8 Zkušební vzorky

### 5.4 Měření drsnosti a vlnitosti

Pohled na drsnost může být subjektivní, hodnocen na základě našich smyslů. Drsnost lze pozorovat okem, kdy vidíme povrch jako celek a můžeme si všimnout určitých detailů povrchu, které mají na drsnost vliv. Dále je možné cítit drsnost pomocí hmatu, kdy cítíme rozdíly ve výšce jednotlivých nerovností povrchu. Pro výzkum a výrobu je však potřeba objektivních, měřitelných hodnot (Sandak a Negri 2015).

Nejčastěji užívanou metodou je měření pomocí kontaktního profilometru. Měření se provádí pomocí hrotu, který se pohybuje po povrchu dřeva jedním směrem a

zaznamenává nerovnosti v podobě grafu. Tímto způsobem získáme 2D profil drsnosti. Nevýhodami této metody jsou (Sandak a Negri 2015):

- Špička hrotu má vždy určitou kontaktní plochu, čímž je omezena přesnost, kdy nelze změřit velmi drobné odchylky.
- Nízká rychlost měření, čímž je limitována kontrola, například během výrobního procesu.
- Kuželovitý tvar hrotu, kdy může docházet ke skluzu z vyvýšených fragmentů na povrchu.
- Fakt, že se jedná o kontaktní metodu může být v některých případech limitující kvůli možnému poškození povrchu.

Metoda LDS (Laser displacement sensor) se nabízí jako lepší metoda než měření pomocí hrotu. Prochází kontinuálním vývojem, a tak se stále zlepšuje a stává přesnější, rychlejší a dostupnější. Stejně jako předchozí metoda však umožňuje měření pouze jedné sekce povrchu v jednom směru, vzniká tedy stejný 2D graf. Toto je velmi limitující právě u anizotropních materiálů jako je dřevo, kdy je nutné pro zvýšení přesnosti provádět větší počet měření v různých směrech (Sandak a Negri 2015).

Pro měření drsnosti anizotropních materiálů by bylo žádoucí stanovení drsnosti celého povrchu (měření ve 3D). U zmíněných metod by toto bylo možné realizovat buďto velkým počtem měření, což je velmi časově náročné, nebo pomocí většího počtu senzorů. Toto řešení se však pojí s vysokými náklady. Vhodným řešením by tedy byla zcela nová metoda měření. (Sandak a Negri 2015).

### 5.4.1 Filtrování profilu

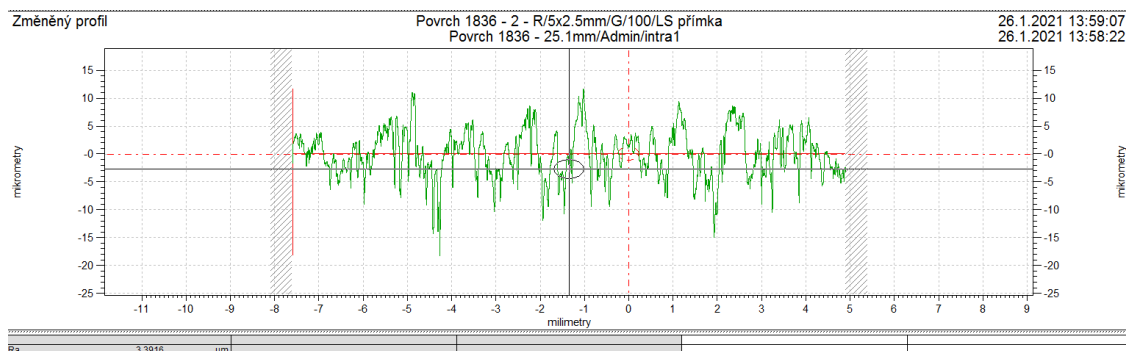
Ve výsledném grafu je možné klasifikovat různé skupiny nerovností. Obecně se jedná u dřeva o čtyři skupiny (řazeno od největších odchylek po nejmenší):

1. Chyba tvaru – největší vlnové délky, je způsobena nechtěnými chybami vzniklými při obrábění dřeva.
2. Vlnitost – menší vlnové délky než u chyby tvaru, jsou většinou důsledkem kinematiky obrábění.
3. Drsnost – výsledek samotného obrábění – povrch vzniklý kontaktem s obráběcím nástrojem.
4. Mikro-drsnost – mikroskopické odchylky způsobené pórovitostí.

Při měření se do grafu také promítá nežádoucí šum. Je velice těžké tomuto jevu předcházet. Konkrétně se jedná například o elektrický šum, vibrace vzorku či měřícího přístroje, špatná kvalita vybavení, případně povrch nevhodný pro měření (zejména metoda LDS může být negativně ovlivněna barvou, leskem a pohltivostí povrchu) a další (Sandak a Negri 2015).

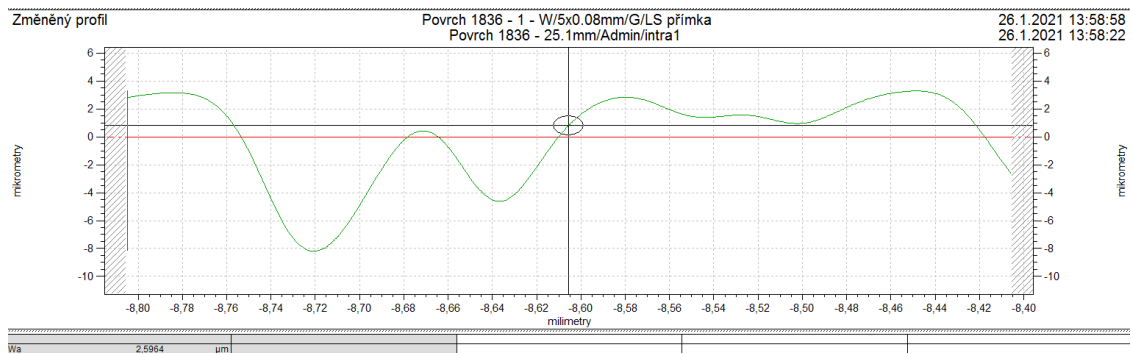
Pro odlišení jednotlivých skupin je nutno graf filtrovat. Každý filtr bohužel částečně zkresluje výsledná data, což je významné zejména u materiálů s výraznými prohlubněmi (jako je dřevo). Vypočtené parametry se poté jeví drsnější, než je skutečnost. S vývojem nových filtrů se však toto zlepšuje (Sandak a Negri 2015).

V této práci byly konkrétně hodnoceny parametry  $R_a$ , který je aritmetickou odchylkou profilu drsnosti a  $W_a$ , který je aritmetickou odchylkou profilu vlnitosti. Tyto parametry jsou aritmetickými průměry absolutních hodnot odchylek profilů drsnosti u  $R_a$  a vlnitosti u  $W_a$  od střední přímky v sekci základní měřené délky (Sikora 2016). Graf  $R_a$  z konkrétního měření a korespondující vyfiltrovaný graf  $W_a$ :



Obrázek č. 9 Graf  $R_a$  napříč vláken z měření vzorku zhuštěného o 40 %

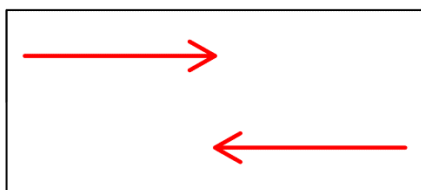




**Obrázek č. 10** Graf  $W_a$  napříč vláken stejného vzorku jako u obrázku č. 9

### 5.4.2 Měření vzorků

Jednotlivé vzorky byly podrobeny měření drsnosti kontaktním profilometrem Taylor Hobson Talysurf Intra dle normy ČSN EN ISO 4288. Základní měřená délka činila 12,5 mm. Měření bylo u všech vzorků prováděno na jedné vybrané zhušťované radiální ploše. Zde byly provedeny celkem čtyři měření, dvě ve směru podél vláken a dvě napříč vláken (viz. Obrázky č. 11 a 12).



**Obrázky č. 11 a 12** Směr a pozice měření tvrdosti ve směru podél vláken (obr. vlevo) a napříč vláken (obr. vpravo)

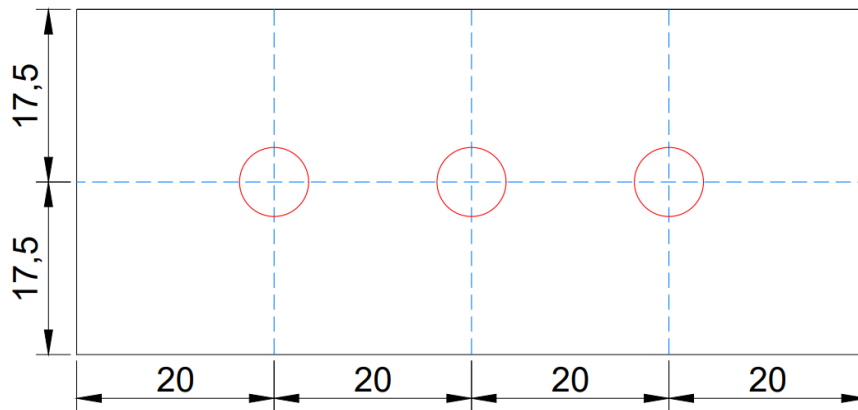


**Obrázky č. 13 a 14** Měření drsnosti kontaktním profilometrem ve směru podél vláken (obr. vlevo) a napříč vláken (obr. vpravo)

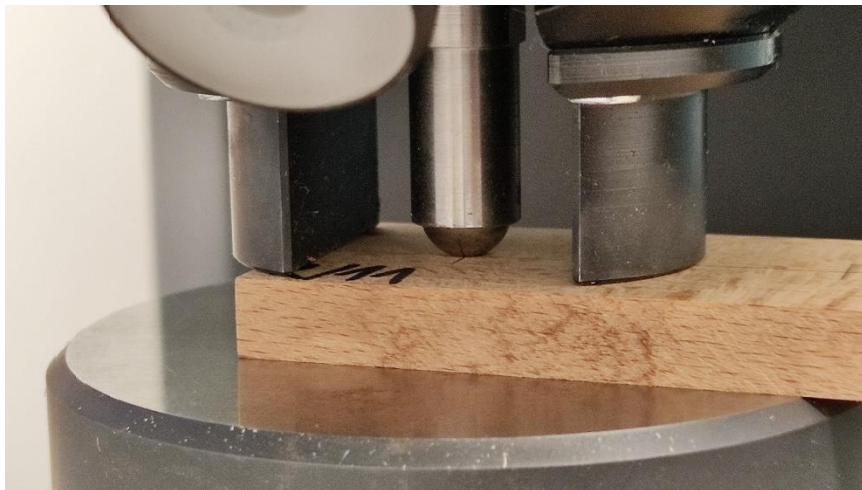
### 5.5 Měření tvrdosti

Tvrdost byla měřena Brinellovou metodou dle normy ČSN EN 1534 se zatížením 250 N. Pro měření bylo užito přístroje DuraVision-30. Vzorky byly zkoušce podrobeny

na radiálním řezu na stejné ploše, na které byla měřena drsnost a vlnitost. Každý vzorek byl měřen třikrát, v předem vyznačených místech, a to na třech průsečících přímkách rozdělujících vzorek na čtvrtiny délky po 20 mm a poloviny šířky vzorků (viz. Obrázek č. 15).



Obrázek č. 15 Schematické znázornění bodů měření tvrdosti (červeně)



Obrázek č. 16 Měření tvrdosti metodou dle Brinella v přístroji DuraVision-30

## 5.6 Výpočet hustoty

Z naměřených rozměrů tloušťky a šířky vzorku byly vypočteny aritmetické průměry. Následně byl spočten objem tělesa podle základního vzorce pro objem kvádrů. Z hmotnosti vzorku a jeho příslušného objemu byla následně spočtena hustota pro daný vzorek dle vzorce (1). Nakonec byly vypočteny průměry pro skupiny vzorků podle míry zhuštění.

## 6 Výsledky a diskuse

Před vlastním vyhodnocováním byla provedena kontrola normálnosti hodnot. Výsledky měření byly následně vyhodnoceny v programu Statistica. Pro každý soubor hodnot byl proveden Duncanův test.

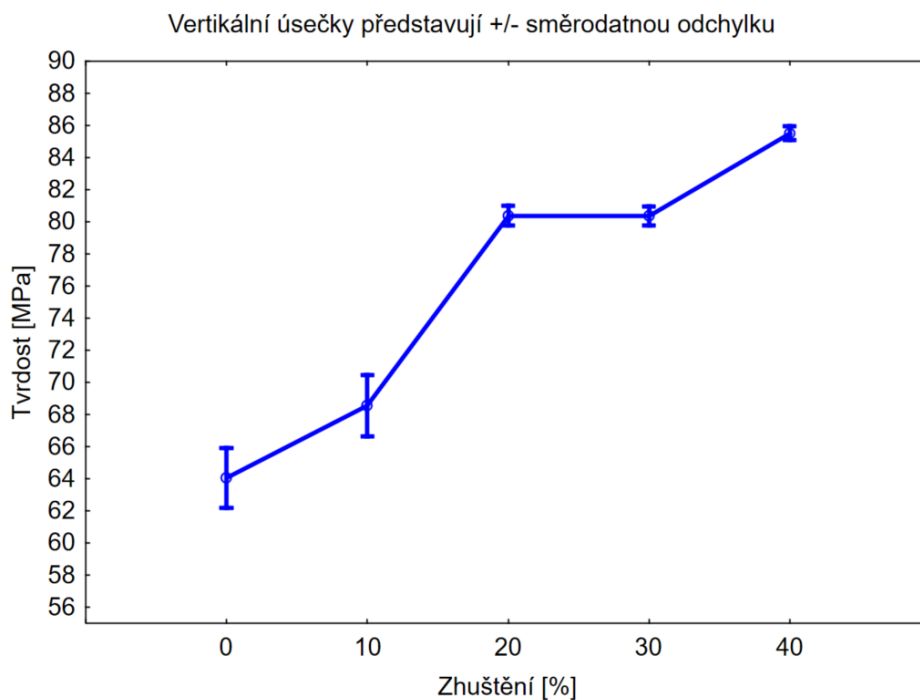
### 6.1 Hustota

Díky vypočtení hustoty je možné zjistit průměrný nárůst hustoty u zhuštěných vzorků. Jedná se o procentuální nárůst hustoty oproti nezhuštěnému dřevu. Skutečný vypočtený nárůst hustoty dosahuje nižších hodnot, než jsou stupně zhuštění vztažené k tloušťce dřeva. Výpočet byl proveden pomocí vzorce (1).

Tabulka č. 3 Hustota vzorků po zhuštění

Zhuštění [%]	Průměrná hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Nárůst hustoty [%]
0	700	0
10	729	4,1
20	816	16,6
30	865	23,6
40	971	38,7

### 6.2 Vyhodnocení tvrdosti dle Brinella



Obrázek č. 17 Vliv stupně zhuštění na tvrdost

Podle očekávání se tvrdost s vyšším stupněm zhuštění vzorku zvyšovala. Mezi stupni zhuštění 20 % a 30 % nedošlo ke změně tvrdosti, dle provedeného Duncanova testu však tento výsledek není statisticky významný. Nejvyšší tvrdosti dosáhly vzorky se 40% zhuštěním a to tvrdosti vyšší o 34,4 % oproti průměrné tvrdosti referenčních vzorků. Hodnoty včetně procentuálních nárůstů jsou uvedeny v Tabulce č. 4.

Pařil *et al.* (2013) testoval vlastnosti průmyslově vyrobeného Lignamonu, tedy zhuštěného buku upraveného amoniakem. Hustota vzorků byla v rozsahu od 885 do 1185 kg.m<sup>-3</sup>. Stejně jako v našem případě pozoroval zejména navýšení tvrdosti ve směru kolmo k vláknům, a to až o 41 % oproti přírodnímu buku.

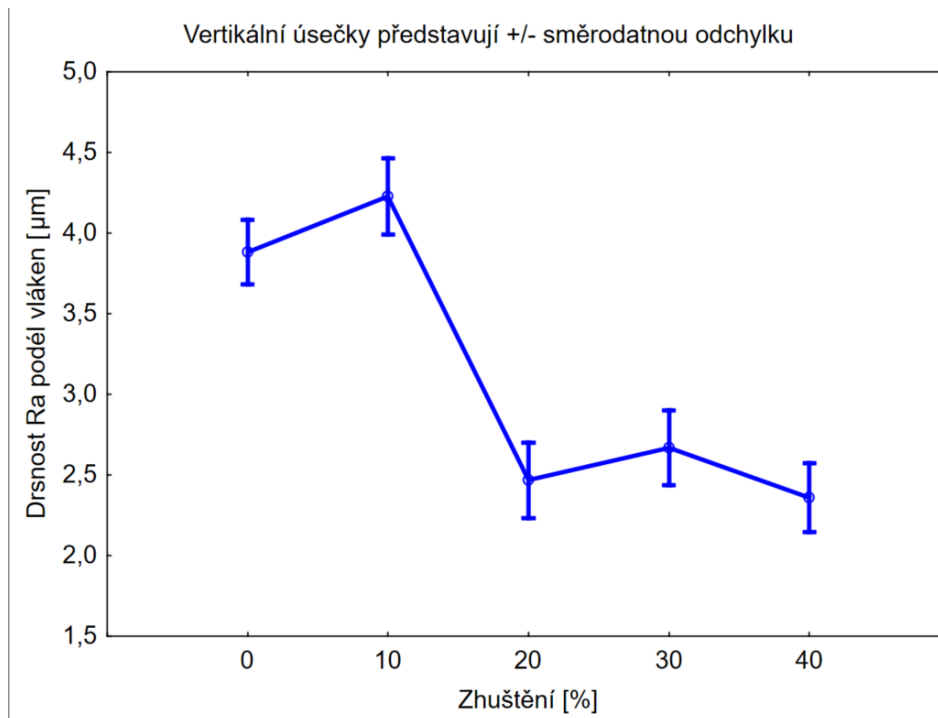
**Tabulka č. 4 Stupeň zhuštění a tvrdost**

Zhuštění [%]	Průměrná tvrdost [MPa]	Nárůst tvrdosti [%]
0	64	0
10	69	7,8
20	80	25
30	80	25
40	86	34,4

**Tabulka č. 5 Duncanův test pro tvrdost**

Číslo buňky	Zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,013671	0,000053	0,000060	0,000032
2	10	0,013671		0,000060	0,000111	0,000053
3	20	0,000053	0,000060		0,989532	0,005255
4	30	0,000060	0,000111	0,989532		0,006814
5	40	0,000032	0,000053	0,005255	0,006814	

### 6.3 Vyhodnocení drsnosti ( $R_a$ ) kontaktní metodou



Obrázek č. 18 Vliv stupně zhuštění na drsnost podél vláken

Drsnost  $R_a$  podél vláken se s vyšším zhuštěním snižuje. To odpovídá předpokládanému průběhu. Zvýšení mezi stupni 0 a 10 je statisticky nevýznamné. Drsnost se mezi stupni 10 a 20 skokově snížila o 40,5 %. Hodnoty mezi stupni 20 až 40 jsou rovněž statisticky nevýznamné, dá se tedy předpokládat, že se již drsnost dále výrazně nemění. Toto snížení na určitou úroveň u stupně 20, kdy nedošlo k dalšímu významnému poklesu zhuštění u dalších stupňů, lze vysvětlit drsností výchozího materiálu, kterou již nelze nikdy zcela vyhladit.

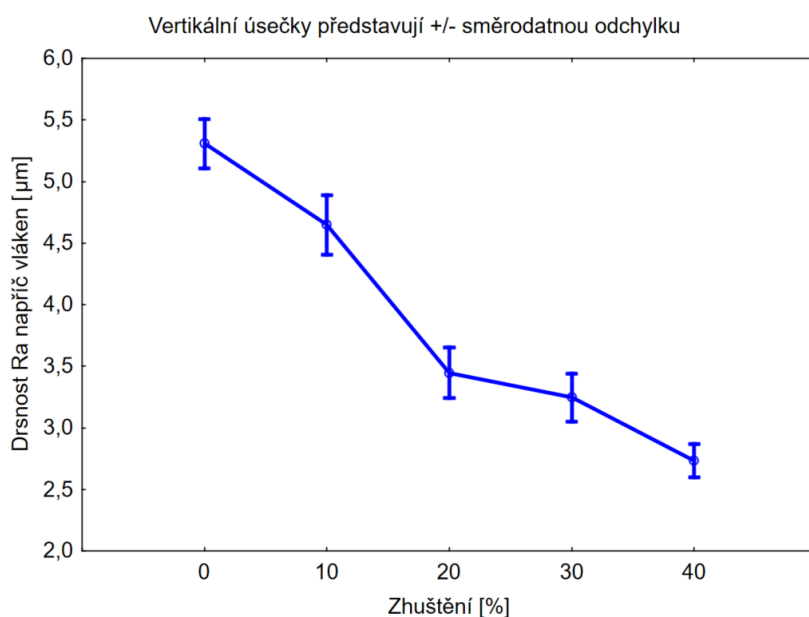
Kamenská (2009) po lisování tangenciální plochy buku dosáhla  $R_a = 2,09$  až  $2,21$   $\mu\text{m}$  ve směru podél vláken. Jedná se o hodnoty blíží se hodnotám pro vzorky zhuštěné o 40 % v této práci.

**Tabulka č. 6 Zhuštění a drsnost podél vláken**

Zhuštění [%]	Průměrná drsnost $R_a$ podél vláken [ $\mu\text{m}$ ]	Pokles (-) nebo nárůst (+) drsnosti [%]
0	3,9	0
10	4,2	+7,7
20	2,5	-35,9
30	2,7	-30,8
40	2,4	-38,5

**Tabulka č. 7 Duncanův test pro  $R_a$  podél vláken**

Číslo buňky	Zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,282363	0,000113	0,000439	0,000073
2	10	0,282363		0,000054	0,000070	0,000032
3	20	0,000113	0,000054		0,526130	0,735350
4	30	0,000439	0,000070	0,526130		0,362657
5	40	0,000073	0,000032	0,735350	0,362657	



**Obrázek č. 19 Vliv stupně zhuštění na drsnost napříč vláken**

U drsnosti ve směru napříč vláken byl pozorován, na rozdíl od podélného směru, postupný a poměrně lineární pokles drsnosti  $R_a$ . Nejvýraznější efekt v porovnání s referenčním vzorkem byl dosažen u zhuštění o 20 %, kdy došlo ke snížení od 10%

zhuštění o 26 %. U vyšších hodnot zhuštění již není efekt tak výrazný, avšak hodnoty mezi stupni 20 až 40 nejsou statisticky významné.

Ímirzi *et al.* (2013) rovněž po zhuštění dřeva při teplotě 140 °C termomechanickou metodou pozoroval snížení drsnosti povrchu dřeva po zhuštění. Jednalo se o borovicové dřevo. Právě při této teplotě dosáhl nejlepšího výsledku, kdy došlo ke snížení drsnosti o 26 %.

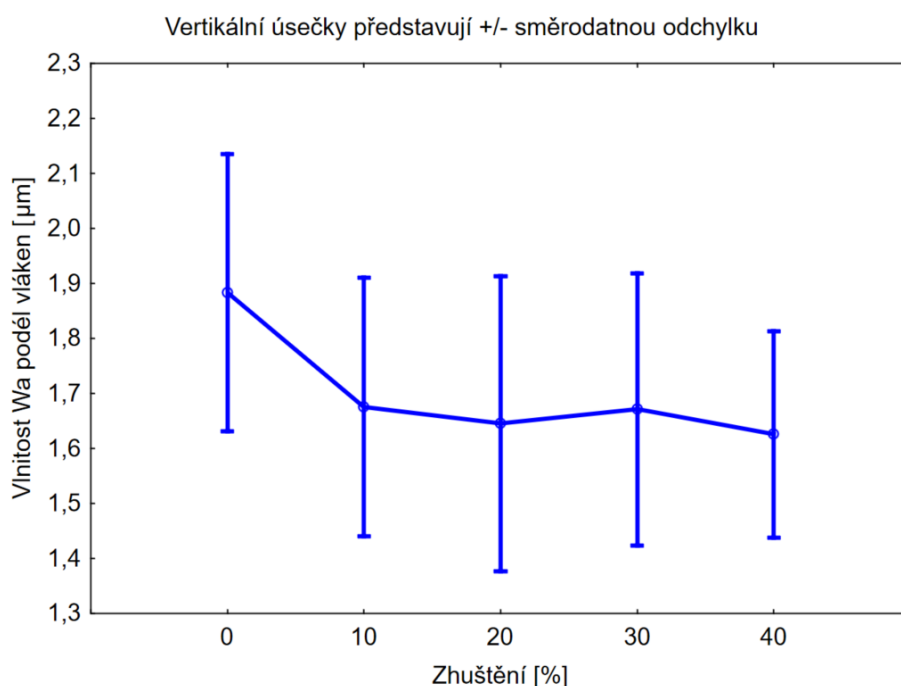
**Tabulka č. 8 Zhuštění a drsnost napříč vláken**

Zhuštění [%]	Průměrná drsnost $R_a$ napříč vláken [ $\mu\text{m}$ ]	Pokles (-) nebo nárůst (+) drsnosti [%]
0	5,3	0
10	4,6	-13,2
20	3,4	-35,8
30	3,2	-39,6
40	2,7	-49,1

**Tabulka č. 9 Duncanův test pro  $R_a$  napříč vláken**

Číslo buňky	Zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,022984	0,000060	0,000053	0,000032
2	10	0,022984		0,000183	0,000067	0,000053
3	20	0,000060	0,000183		0,476979	0,018762
4	30	0,000053	0,000067	0,476979		0,074713
5	40	0,000032	0,000053	0,018762	0,074713	

## 6.4 Vyhodnocení vlnitosti ( $W_a$ ) kontaktní metodou



**Obrázek č. 20** Vliv stupně zhuštění na vlnitost podél vláken

Vlnitost  $W_a$  podél vláken dle výsledků nedosáhla při žádném stupni zhuštění jakékoli významné změny. Při nejvyšším stupni zhuštění bylo podle našich výsledků dosaženo snížení vlnitosti o 15,8 % oproti nezhuštěnému dřevu. Veškeré hodnoty jsou však statisticky nevýznamné. Navíc je zde velká směrodatná odchylka, z čehož lze dále usuzovat nízkou váhu těchto výsledků.

Gaff *et al.* (2015) zkoumal vliv termické modifikace na vlnitost povrchu dřeva břízy po frézování. Závěry byly podobné jako při měření vlnitosti podél vláken u vzorků po termomechanické úpravě v této práci. Termická modifikace rovněž neměla na vlnitost výrazný vliv.

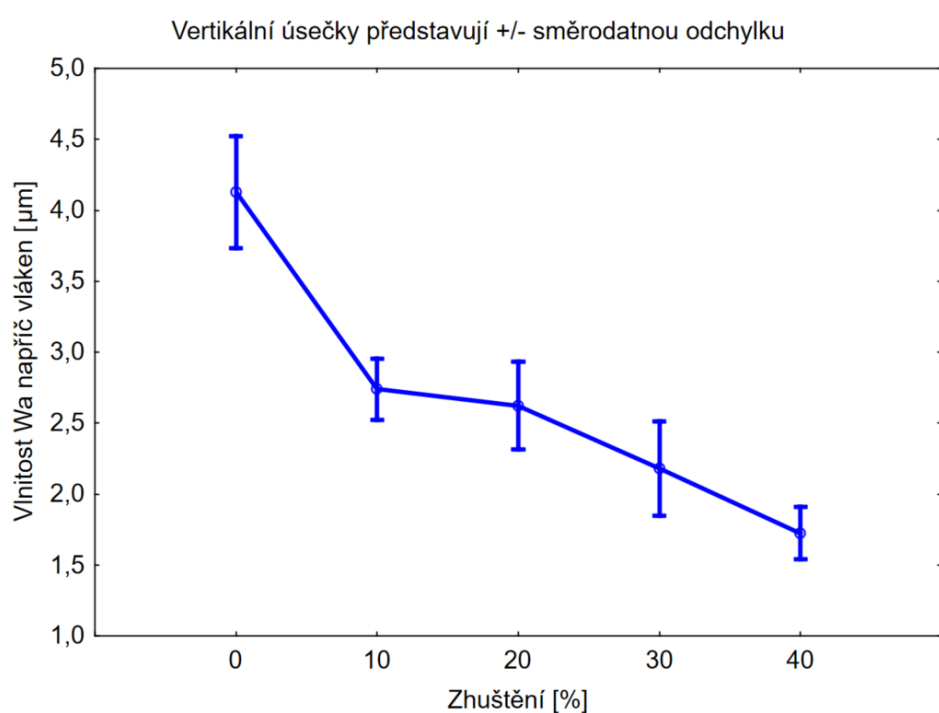
**Tabulka č. 10** Zhuštění a vlnitost podél vláken

Zhuštění [%]	Průměrná vlnitost $W_a$ podél vláken [ $\mu\text{m}$ ]	Pokles (-) nebo nárůst (+) vlnitosti [%]
0	1,9	0
10	1,7	-10,5
20	1,6	-15,8
30	1,7	-10,5
40	1,6	-15,8



**Tabulka č. 11 Duncanův test pro  $W_a$  podél vláken**

Číslo buňky	Zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,543890	0,531270	0,562065	0,509496
2	10	0,543890		0,935069	0,990409	0,899182
3	20	0,531270	0,935069		0,939632	0,955319
4	30	0,562065	0,990409	0,939632		0,902240
5	40	0,509496	0,899182	0,955319	0,902240	



**Obrázek č. 21 Vliv stupně zhuštění na vlnitost napříč vláken**

V případě vlnitosti  $W_a$  ve směru napříč vláken se oproti vlnitosti podél vláken vliv zhuštění projevil. Změna je oproti neupravenému dřevu nejvýraznější hned po zhuštění na nejnižší stupeň 10 %, kdy jsme dosáhli snížení vlnitosti o 34,1 % oproti referenčnímu vzorku. S vyšším stupněm zhuštění pak vlnitost dále klesá, nikoli však lineárně, efekt se zmírňuje. Hodnoty v grafu jsou od stupně 10 dále statisticky nevýznamné, mezi hodnotami tedy není statisticky významný rozdíl.

**Tabulka č. 12 Zhuštění a vlnitost napříč vláken**

Zhuštění [%]	Průměrná vlnitost $W_a$ napříč vláken [ $\mu\text{m}$ ]	Pokles (-) nebo nárůst (+) vlnitosti [%]
0	4,1	0
10	2,7	-34,1
20	2,6	-36,6
30	2,2	-46,3
40	1,7	-58,5

**Tabulka č. 13 Duncanův test pro  $W_a$  napříč vláken**

Číslo buňky	Zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,001850	0,001116	0,000092	0,000035
2	10	0,001850		0,784549	0,215250	0,029961
3	20	0,001116	0,784549		0,295454	0,047276
4	30	0,000092	0,215250	0,295454		0,286121
5	40	0,000035	0,029961	0,047276	0,286121	

## Závěr

Analýzou dat bylo zjištěno, že předpokládané vlivy zhušťování na vybrané vlastnosti se potvrdily, krom vlnitosti  $W_a$  podél vláken. Vliv zhuštění na její pokles nebyl vzhledem k statisticky nevýznamným výsledkům s velkou směrodatnou odchylkou měření prokázán. Tvrdost se s vyšším stupněm zhuštění, kromě určité statisticky nevýznamné stagnace při zhuštění o 20 % a 30 %, zvyšovala téměř lineárně. Nejvyšší stupeň zhuštění dosáhl tedy i nejvyšší tvrdosti. U drsnosti  $R_a$  a vlnitosti  $W_a$  již nebyl efekt zhuštění tak jednoznačný. Projevil se značný rozdíl mezi hodnotami změřenými podél a napříč vláken, což je dáno zejména anizotropií dřeva a jeho anatomickou strukturou. Ve směru napříč vláken jednotlivá vystupující vlákna a mezery mezi nimi tvoří množství vrcholů a prohlubní. Hrot profilometru se tedy při měření vychyluje střídavě nahoru a dolů ve velmi krátkých úsecích, kdy přejíždí přes výstupky v celé šířce. Naproti tomu ve směru podél vláken nepřekoná hrot při stejné základní měřené délce nikdy tolik jednotlivých vláken jako ve směru napříč, chvílemi zůstává v prohlubních, chvílemi na vrcholcích, ze kterých má však tendenci sklouzávat opět do prohlubní. Na rozdíl od směru napříč vláken je tedy teoreticky možný i případ, kdy nepřekoná téměř žádný výškový rozdíl. Krom  $W_a$  podél vláken, která se dle měření ukázala jako nevýznamná, došlo u  $R_a$  a  $W_a$  k výraznému poklesu již při nižších stupních zhuštění a u dalších stupňů již nenastal pokles se stejnou intenzitou. Drsnost podél vláken se projevila nejvýrazněji při zhuštění o 20 %, při vyšším zhuštění zůstala prakticky na stejné úrovni. U drsnosti napříč vláken se efekt zhuštění projevoval i při vyšších stupních, avšak po výrazném poklesu při zhuštění o 10 % a následně i 20 % se křivka začíná narovnávat a další pokles drsnosti není oproti těmto stupňům zhuštění tak strmý. Vlnitost podél vláken se zhušťováním významně nezměnila. Oproti tomu vlnitost napříč vláken klesla významně již při stupni zhuštění o 10 % a s dále rostoucím zhuštěním již klesá mírněji.

Výzkum provedený v rámci této práce by mohl být v současné době přínosný pro oblast výroby vrstvených materiálů ze zhuštěného dřeva, kde je užito například ve spojení s tkaninou ze skelných vláken. Drsnost zhuštěného dřeva má význam z hlediska lepené spáry pro následné lepení, kdy je nutné vědět, zda je nutné povrch zdrsnět pro zlepšení adheze lepidla. Další možný přínos je v oblasti užití tvrdých dřev, kdy při stupni zhuštění o 40 % lze dosáhnout u buku vysoké tvrdosti, což teoreticky umožňuje jeho použití namísto vzácnějších dřevin podobné tvrdosti. Obecně by širší využívání zhuštěného dřeva mohlo mít jednak ekologický přínos, kdy by bylo možné například místo tropických

dřevin užívat lokálních druhů dřeva upravených zhuštěním tak, aby měly vlastnosti s exotickými dřevinami srovnatelné. Tím by se jednak omezilo mýcení pralesů v zahraničí, jednak by surovina měla i ostatní výhody lokálního produktu, kdy nevzniká tak velká uhlíková stopa kvůli dopravě, lokální výroba vytváří pracovní příležitosti a přináší finance do státního rozpočtu. Hladký, nezvlněný povrch zhuštěného dřeva lze rovněž subjektivně hodnotit jako příjemnější na omak než povrch nezhuštěných vzorků. Lze tudíž doporučit širší využití například u částí nábytku, se kterými přichází člověk do bezprostředního kontaktu, kdy navíc díky zvýšené tvrdosti budou odolnější vůči opotřebení.

## Seznam použité literatury

1. ČSN EN 1534 (492124) Dřevěné podlahoviny - Stanovení odolnosti proti vtisku - Metoda zkoušení, 2020. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
2. ČSN EN ISO 4288 (014449) Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu, 1999. Praha: Český normalizační institut.
3. EISNER, Karel, Vladimír HAVLÍČEK a Miloš OSTEN, 1983. *Dřevo a plasty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
4. GAFF, Milan, Monika KVIETKOVÁ a Miroslav GAŠPARÍK, 2015. Effect of Selected Parameters on the Surface Waviness in Plane Milling of Thermally Modified Birch Wood. *BioResources* [online]. **10**(4), 7618-7626 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/7644>
5. GAŠPARÍK, Miroslav, Milan GAFF, Lenka ŠAFAŘÍKOVÁ, Carlos Rodriguez VALLEJO a Tomáš SVOBODA, 2016. Impact Bending Strength and Brinell Hardness of Densified Hardwoods. *BioResources* [online]. **11**(4), 8638-8652 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.11.4.8638-8652
6. GREKIN, Mika a Erkki VERKASALO, 2013. Variations in and Models for Brinell Hardness of Scots Pine Wood from Finland and Sweden. *Baltic Forestry* [online]. **19**(1), 128-136 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1392-1355. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/259561439\\_Variations\\_in\\_and\\_Models\\_for\\_Brinell\\_Hardness\\_of\\_Scots\\_Pine\\_Wood\\_from\\_Finland\\_and\\_Sweden](https://www.researchgate.net/publication/259561439_Variations_in_and_Models_for_Brinell_Hardness_of_Scots_Pine_Wood_from_Finland_and_Sweden)
7. HEGER, Frédéric, Mélanie GROUX, Fred GIRARDET, Christian WELZBACHER, Andreas O. RAPP a Parviz NAVI, 2004. Mechanical and Durability Performance of THM-Densified Wood. *Final Workshop COST Action E22 'Environmental Optimisation of Wood Protection' Lisboa – Portugal, 22nd - 23rd March 2004* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/268011700\\_Mechanical\\_and\\_Durability\\_Performance\\_of\\_THM-Densified\\_Wood](https://www.researchgate.net/publication/268011700_Mechanical_and_Durability_Performance_of_THM-Densified_Wood)

8. HILL, Callum A. S., 2006. *Wood Modification* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons [cit. 2022-04-06]. ISBN 9780470021743. Dostupné z: doi:10.1002/0470021748
9. HIRATA, Seiji, Masamitsu OHTA a Yasuo HONMA, 2001. Hardness distribution on wood surface. *Journal of Wood Science* [online]. **47**(1), 1-7 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1435-0211. Dostupné z: doi:10.1007/BF00776637
10. ĪMIRZI, Hasan Özgür, Onur ŪLKER a Erol BURDURLU, 2013. Effect of Densification Temperature and Some Surfacing Techniques on the Surface Roughness of Densified Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *BioResources* [online]. **9**(1), 191-209 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.9.1.191-209
11. JANÁK, Karel a Pavel KRÁL, 2003. *Technologie I pro studijní obor Nábytkářství*. Praha: Informatorium. ISBN 80-7333-003-2.
12. JONES, Dennis a Dick SANDBERG, 2020. A Review of Wood Modification Globally – Updated Findings from COST FP1407. *Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment* [online]. **1** [cit. 2022-04-06]. ISSN 2738-5418. Dostupné z: doi:10.37947/ipbe.2020.vol1.1
13. KAFKA, Emanuel, 1989. *Dřevarská příručka. Část 1*. Praha: SNTL. ISBN 80-03-00009-2.
14. KAMENSKÁ, K., 2009. *Effect of different kinds of mechanical processing of beech on selected properties of the coating*. Zvolen. Diplomová práce. Technická univerzita vo Zvolene.
15. KUTNAR, Andreja, Frederick A. KAMKE, Marko PETRIČ a Milan SERNEK, 2008. The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. **329**(1-2), 82-86 [cit. 2022-04-06]. ISSN 09277757. Dostupné z: doi:10.1016/j.colsurfa.2008.06.047
16. LASKOWSKA, Agnieszka, 2020. Density profile and hardness of thermo-mechanically modified beech, oak and pine wood. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty* [online]. **63**(205), 26 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1644-3985. Dostupné z: doi:10.12841/wood.1644-3985.D06.08

17. LYKIDIS, Charalampos, Miltiadis NIKOLAKAKOS, Evaggelos SAKELLARIOU a Dimitrios BIRBILIS, 2016. Assessment of a modification to the Brinell method for determining solid wood hardness. *Materials and Structures* [online]. **49**(3), 961-967 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-015-0551-4
18. LYSÝ, František a Pavel JÍRŮ, 1961. *Nauka o dřevě*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: SNTL.
19. MATOVIČ, Anton, 1984. *Nauka o dřevě: Určeno pro posl. fak. les*. Praha: SPN. ISBN (Brož.):.
20. Modifikované dřevo. *Nábytkářský Informační Systém* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/>
21. NEYSES, Benedikt, 2016. *Surface-Densified Wood: From Laboratory-Scale Research Towards a Competitive Product* [online]. Luleå: Luleå University of Technology [cit. 2022-04-06]. ISBN 978-91-7583-758-1. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1045759/FULLTEXT01.pdf>
22. PAŘIL, Petr, Martin BRABEC, Radim ROUSEK, Ondřej MAŇÁK, Peter RADEMACHER, Petr ČERMÁK a Aleš DEJMAL, 2013. Physical and mechanical properties of densified beech wood plasticized by ammonia. *PRO LIGNO* [online]. **9**(4), 195-202 [cit. 2022-04-06]. ISSN 2069-7430. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/275518943\\_Physical\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_densified\\_beech\\_wood\\_plasticized\\_by\\_ammonia](https://www.researchgate.net/publication/275518943_Physical_and_mechanical_properties_of_densified_beech_wood_plasticized_by_ammonia)
23. PETRÍK, Jozef, Vojtech MIKLOŠ a Tomáš TOMPOŠ, 2008. The influence of the ball material on the brinell hardness. *MAPAN - Journal of Metrology Society of India* [online]. **23**(4), 197-205 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/287937466\\_The\\_influence\\_of\\_the\\_ball\\_material\\_on\\_the\\_brinell\\_hardness](https://www.researchgate.net/publication/287937466_The_influence_of_the_ball_material_on_the_brinell_hardness)
24. POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK, 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. Bratislava: Príroda. ISBN 80-07-00600-1.
25. RAUTKARI, Lauri, Kristiina LAINE, Andreja KUTNAR, Sergej MEDVED a Mark HUGHES, 2013. Hardness and density profile of surface densified and

- thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. *Journal of Materials Science* [online]. **48**(6), 2370-2375 [cit. 2022-04-06]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-012-7019-5
26. RAUTKARI, Lauri, Milena PROPERZI, Frédéric PICHELIN a Mark HUGHES, 2009. Surface modification of wood using friction. *Wood Science and Technology* [online]. **43**(3-4), 291-299 [cit. 2022-04-06]. ISSN 0043-7719. Dostupné z: doi:10.1007/s00226-008-0227-0
27. SANDAK, Anna a Jakub SANDAK, 2021. Special Issue “Wood Modification: Characterization, Modelling, and Applications”. *Coatings* [online]. **11**(7), 1-2 [cit. 2022-04-06]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings11070869
28. SANDAK, Anna, Edit FÖLDEVÁRI-NAGY, Faksawat POOHPHAJAI, Rene Herrera DIAZ, Oihana GORDOBIL, Nežka SAJINČIČ, Veerapandian PONNUCHAMY a Jakub SANDAK, 2021. Hybrid Approach for Wood Modification: Characterization and Evaluation of Weathering Resistance of Coatings on Acetylated Wood. *Coatings* [online]. **11**(6), 1-3 [cit. 2022-04-06]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings11060658
29. SANDAK, Jakub a Martino NEGRI, 2015. Wood surface roughness – what is it? [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267805159\\_Wood\\_surface\\_roughness\\_-\\_what\\_is\\_it](https://www.researchgate.net/publication/267805159_Wood_surface_roughness_-_what_is_it)
30. SANDBERG, D, A KUTNAR a G MANTANIS, 2017. Wood modification technologies - a review. *IForest - Biogeosciences and Forestry* [online]. **10**(6), 895-908 [cit. 2022-04-06]. ISSN 19717458. Dostupné z: doi:10.3832/ifor2380-010
31. SHAMS, Md. Iftekhar, Noriko KAGEMORI a Hiroyuki YANO, 2006. Compressive deformation of wood impregnated with low molecular weight phenol formaldehyde (PF) resin IV: Species dependency. *Journal of Wood Science* [online]. **52**(2), 179-183 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1435-0211. Dostupné z: doi:10.1007/s10086-005-0746-3
32. SIKORA, Adam, 2016. *Vliv urychleného stárnutí na kvalitu povrchové úpravy dřeva upraveného nátěrovými látkami*. Zvolen. Diplomová práce. Technická univerzita vo Zvolene.



33. SIKORA, Adam, 2021. *Základní mechanické charakteristiky kompozitních materiálů na bázi dřeva a nedřevních komponentů*. Praha. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
34. ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ, 2002. *Stavba dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-636-0.
35. Surface Roughness Terminology. *Introduction to Roughness* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z:  
<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/waviness.jsp>
36. Vlastnosti a využití jednotlivých dřevin. *MeziStromy.cz* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/vlastnosti-a-vyuziti-jednotlivych-drevin2/odborny>
37. VÖRÖS, Á a R. NÉMETH, 2020. The History of Wood Hardness Tests. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. **505** [cit. 2022-04-06]. ISSN 1755-1315. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/505/1/012020
38. What kind of waviness?. *Digital Metrology* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://digitalmetrology.com/what-kind-of-waviness/>