

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta lesnická
a dřevařská**

SMYKOVÁ PEVNOST LEPENÉHO ZHUŠTĚNÉHO DŘEVA

Bakalářská práce

Autor: Michal Strnad
Vedoucí práce: Ing. Adam Sikora, Ph.D.

2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Strnad

Dřevařství
Zpracování dřeva

Název práce

Smyková pevnost lepeného zhuštěného dřeva

Název anglicky

Shear strength of glued densified wood

Cíle práce

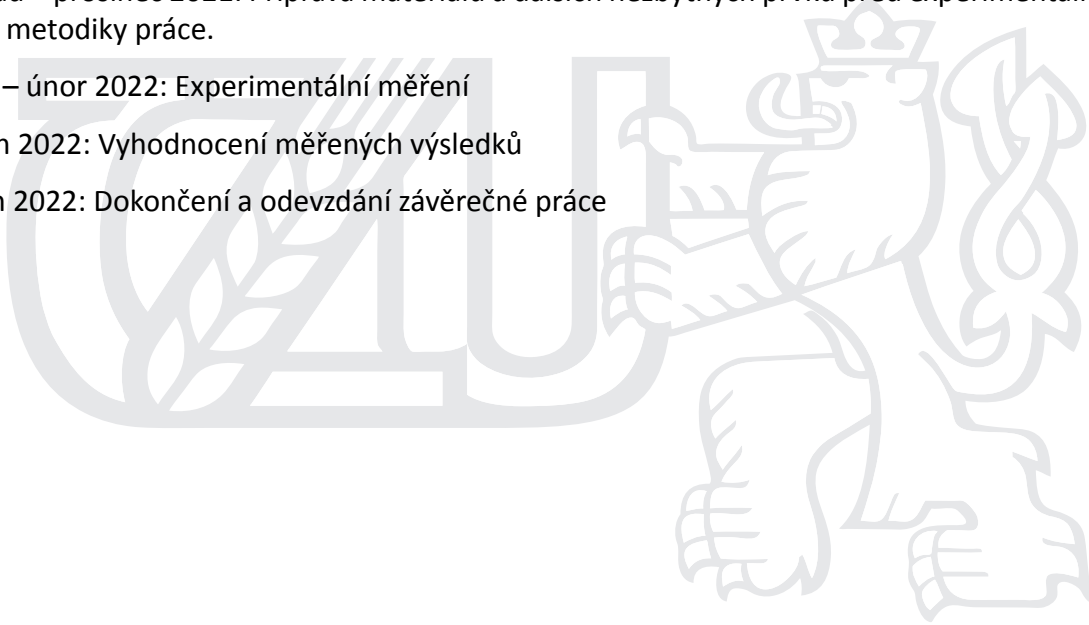
Cílem této bakalářské práce je posouzení vlivu změny smykové pevnosti lepeného zhuštěného dřeva v interakci se změnami vybraných ukazatelů drsnosti. Smyková pevnost bude stanovena podle normou stanovených postupů. V rámci práce budou aplikovány 4 stupně zhuštění vzhledem k původní tloušťce dřeva (5, 10, 15, 20%). Zhuštěné dřevo bude lepeno pomocí PUR lepidla. Výsledek práce bude posouzení změny smykové pevnosti lepeného spoje vzhledem k různým stupňům aplikovaného zhuštění, kdy stupeň zhuštění ve vztahu ke smykové pevnosti lepeného spoje bude ovlivňován zejména změnami vlastností 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 smykovou pevnost lepeného spoje v interakci se změnami vybraných ukazatelů drsnosti.
4. Statistické vyhodnocení a na základě zjištěných dat navržení nejvhodnějšího stupně zhuštění na sledované charakteristiky.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – cíl práce, úvod, literární rozbor, materiál a metodika, výsledky, diskuze, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. červenec – srpen 2021: Tvorba koncepčního přístupu k řešení práce
2. září – říjen 2021: Tvorba literární rešerše podle schválené koncepce řešení práce
3. listopad – prosinec 2021: Příprava materiálu a dalších nezbytných prvků před experimentálním měřením a tvorba metodiky práce.
4. leden – únor 2022: Experimentální měření
5. březen 2022: Vyhodnocení měřených výsledků
6. duben 2022: Dokončení a odevzdání závěrečné práce



Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

Zhušťování dřeva, smyková pevnost lepeného spoje, drsnost

Doporučené zdroje informací

- Bekhta, P., Proszyk, S., Krystófiak, T., Sedliacik, J., Novak, I., a Mamonova, M. (2017). Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers, *Wood Material Science and Engineering*, 12 (1), 40-54. DOI: 10.1080/17480272.2015.1009488
- Kariz, M., Kuzman, M. K., Sernek, M., Hughes, M., Rautkarim L., Kamke, F. A. a Kutnar, A. (2017). Influence of temperature of thermal treatment on surface densification of spruce, *European Journal of Wood and Wood Products*, 75 (1), 113-123. DOI: 10.1007/s00107-016-1052-z
- Laine, K., Serholm, K., Wålinder, M., Rautkari, L., a Hughes, M. (2016). Wood densification and thermal modification: Hardness, set-recovery and micromorphology, *Wood Science and Technology*, 50 (5), 883-894. DOI: 10.1007/s00226-016-0835-z
- Pizzi, A (2013). *Bioadhesives for Wood and Fibres, Reviews of Adhesion and Adhesives*, Scrivener Publishing, 2168-0973 (Online), Vol. 1 (1)
- Ulker, O., Imirzi, O., a Burdurlu, E. (2012). The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of Scot pine (*Pinus Sylvestris L.*), *Bioresources*, 7 (4), 5581-5592.
-

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 3. 5. 2021

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 19. 02. 2022

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Smyková pevnost lepeného zhuštěného dřeva 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 Praze dne 7.4.2022

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Sikora', written in a cursive style.

Abstrakt

S ohledem na rostoucí průmyslové využívání modifikovaného dřeva, a na důležitost kvality lepených spojů u téměř všech výrobků ze dřeva, si tato práce vzala za cíl identifikovat vliv změny vybraných parametrů drsnosti povrchu v lepené spáře na pevnost výsledného spoje, a to při použití obvyklé polyuretanové lepicí směsi.

Pro tento účel bylo vyrobeno celkem 260 vzorků z bukového dřeva a ty byly rozděleny do pěti skupin, které utvořily množiny pro čtyři stupně zhuštění oproti původní tloušťce o 5, 10, 15 a 20% plus referenční skupinu. Z každé skupiny bylo pak standardními měřicími metodami vybráno 20 vzorků tak, aby jejich hustota a rozměrové parametry oscilovaly co nejbližší středních hodnot. Vzorky byly zhuštěny na předepsané stupně na vyhřívaném lisu, uloženy tak, aby došlo k rozměrové stabilizaci a následně byla naměřena a zaznamenána drsnost povrchů jednotlivých vzorků. Následně z nich bylo PUR lepidlem slepeno 10 zkušebních těles pro každou množinu a na těchto tělesech poté byly na testovacím zařízení naměřeny hodnoty smykové pevnosti postupem, který stanovila ČSN EN 205.

Měření prokázalo významný vliv změny povrchové morfologie na pevnost lepené spáry, z čehož vyplývají doporučení pro praktická využití v závěru práce. Přímá souvislost mezi snížením hodnot u vybraných parametrů drsnosti povrchu u zhuštěných vzorků a smykovou pevností výsledného spoje nebyla prokázána.

Klíčová slova:

Zhušťování dřeva, smyková pevnost lepeného spoje, drsnost

Abstract

Considering the increasing industrial use of modified wood, and the importance of the quality of glued joints in almost all wooden products, this work aimed to identify the effect of change in the surface roughness in the glued joint on the strength of the resulting joint, using a common polyurethane glue compound.

For this purpose, a total of 260 beech wood samples were produced and these were divided into five groups to form sets for four degrees of densification from the original thickness of 5, 10, 15 and 20% plus a reference group. From each group, 20 samples were then selected by standard measurement methods so that their density and dimensional parameters oscillated as close to the mean values as possible. The samples were densified to prescribed grades on a heated press, stored to allow dimensional stabilization, and then the surface roughness of each sample was measured and recorded. Subsequently, 10 test pieces for each set were glued together with PUR glue and the shear strength values were then measured on these test pieces using the test equipment according to the procedure specified in EN 205.

The measurements showed a significant effect of the change in surface morphology on the strength of the bonded joint, resulting in recommendations for practical applications in the conclusion of the paper. A direct correlation between the reduction in values for selected surface roughness parameters in the compacted specimens and the shear strength of the resulting joint was not demonstrated.

Keywords:

Wood densification, shear strength of glued joint, roughness

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 9 |
| 2. Cíle práce | 10 |
| 3. Stavba dřeva..... | 11 |
| 3.1 Proces vzniku..... | 11 |
| 3.2 Chemicko-molekulární struktura..... | 12 |
| 4. Modifikace dřeva | 13 |
| 4.1 Úvod do problematiky modifikací dřeva..... | 13 |
| 4.2 Zhušťování dřeva..... | 14 |
| 4.3 Spring-back a jeho potlačení | 16 |
| 4.4 Proces výroby | 17 |
| 5. Lepené spoje/Vrstvené dřevo..... | 18 |
| 5.1 Alternativy k masivnímu dřevu | 18 |
| 5.2 Vrstvené dřevo..... | 19 |
| 6. Teorie lepení | 21 |
| 6.1 Úvod do problematiky lepení | 21 |
| 6.2 Skupiny lepidel..... | 22 |
| 7. Metodika | 24 |
| 8. Výsledky a diskuse | 28 |
| 8.1 Výsledky..... | 28 |
| 8.2 Diskuse | 33 |
| 9. Závěr | 35 |
| 10. Příloha I: Katalog vzorků | 36 |
| 11. Seznam použitých zdrojů | 39 |

Seznam tabulek:

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Naměřené hodnoty Ra | 28 |
| Tabulka 2: Naměřené hodnoty Rz | 29 |
| Tabulka 3: Naměřené hodnoty Rsm | 30 |
| Tabulka 4: Průměrné hustoty testovacích skupin | 30 |
| Tabulka 5: Naměřené hodnoty smykové pevnosti | 33 |
| Tabulka 6: Katalog vzorků | 36 |

Seznam obrázků:

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Mikrofotografie prostorové struktury dřev a) modřínu b) liliovníku a c) dubu | 11 |
| Obrázek 2: Část celulóзовého řetězce | 12 |
| Obrázek 3: Rozdíl vnitřních struktur před a po zhuštění na extrémně vysoký stupeň | 16 |
| Obrázek 4: Vzorky topolu zhušťovaného při různých podmínkách..... | 17 |
| Obrázek 5: Mikrofotografie radiální penetrace v lepené spáře | 21 |
| Obrázek 6: Selektce vzorků, jejich měření a vážení..... | 24 |
| Obrázek 7: Lis připravený k činnosti | 25 |
| Obrázek 8: Pracoviště pro měření ukazatelů povrchu | 26 |
| Obrázek 9: Zkušební těleso dle ČSN EN 205 | 26 |
| Obrázek 10: Lepení vzorků pro experiment | 27 |

Seznam grafů:

| | |
|--|----|
| Graf 1: Průběh skelného přechodu u obecného amorfního polymeru | 15 |
| Graf 2: Znárodnění vlivu vlhkosti na tranzitní teplotu | 15 |
| Graf 3: Závislost ukazatele Ra na stupni zhuštění..... | 28 |
| Graf 4: Závislost ukazatele Rz na stupni zhuštění..... | 29 |
| Graf 5: Závislost ukazatele Rsm na stupni zhuštění..... | 30 |
| Graf 6: Korelace smykové pevnosti a ukazatele Ra | 31 |
| Graf 7: Korelace smykové pevnosti a ukazatele Rz | 31 |
| Graf 8: Korelace smykové pevnosti a ukazatele Rsm | 32 |
| Graf 9: Závislost smykové pevnosti na stupni zhuštění | 33 |

1. Úvod

Dřevo odjakživa provází lidskou společnost a jeho vlastnosti, obzvlášť výhodný poměr pevnosti a váhy, ho učinil jedním z materiálů, které náš dávný předek vzal do ruky, aby si prvními pomůckami usnadnil život. Prudký technologický rozvoj posledních dekád umožňuje a současně vyžaduje vylepšovat i technologické postupy používané při zpracování dřevní hmoty, a tudíž se stále více setkáváme s aglomerovanými materiály stejně jako s modifikovaným dřevem.

V tomto kontextu je tedy třeba dále pečlivě zkoumat všechny vlastnosti materiálů a postupů jako je například lepení a okolnosti, které mají vliv na jejich vlastnosti. Zhuštěné dřevo, jinak nazývané také denzifikované, má mnoho vlastností účelově upraveno, přičemž hlavním smyslem modifikace je zvýšení jeho mechanických vlastností jako pevnosti a tvrdosti následkem zvýšení jeho hustoty. Ovšem metoda přípravy, spočívající v lisování (mnohdy plastifikovaného) materiálu jako vedlejší účinek způsobuje mimo jiné i změnu kvalitativních ukazatelů povrchu, která má následně přímý vliv na adhezní vlastnosti lepicích hmot běžně využívaných v dřevozpracujícím průmyslu.

Současně platí, že lepení patří mezi základní postupy spojování prvků a výroby jak polotovárů, tak finálních produktů, není tedy možné přehlížet tyto změny, a právě jejich zkoumání si bere za cíl tato práce. Jelikož je možné praktické měření provést pouze v omezeném rozsahu daném zadáním bakalářské práce, bude jako vzorek použito bukové dřevo a jako lepicí hmota běžné komerční PUR lepidlo, u kterého lze očekávat příznivější výsledky než například u PVAc lepidel, která do určité míry spoléhají na vnitřní strukturu dřeva.

Zhuštěné dřevo se vyznačuje povrchem s mnohem vyšší homogenitou, což částečně narušuje některé z fyzikálních principů, na jejichž základu proces lepení funguje, jak bude dále vysvětleno. Lze tedy očekávat negativní vliv na pevnostní charakteristiku lepené spáry, a to převážně z důvodu snížení pronikání do lepeného materiálu. Míru vlivu určilo měření v tomto experimentu.

Zhušťované dřevo má významné zastoupení na trhu s modifikovaným dřevem a výrobci stále hledají pro tuto surovinu další uplatnění. S ohledem na rostoucí použití v lepených vrstvených materiálech, například překližkách, je zájem o vlastnosti jeho lepené spáry aktuální a pokrok na tomto poli může přinést výhody ekonomické, ale také například ekologické, což je aspekt, ke kterému se v současné průmyslové výrobě přihlíží stále častěji.

2. Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je experimentálně vyhodnotit vliv změn v povrchové morfologii dřeva, proběhlých v důsledku procesu zhušťování, na pevnost lepeného spoje a pomoci tak naznačit cesty pro další výzkum této problematiky. V experimentu budou vytvořeny vzorky o 4 stupních zhuštění oproti původní tloušťce dřeva (o 5, 10, 15 a 20 %), slepeny do testovacích těles a následně otestovány na změnu smykové pevnosti dle vhodné normy (ČSN EN 205).

Protože předchozí výzkumy v tomto směru prokázaly oslabení výsledného spoje, lze očekávat podobný výsledek. Zde bude ale snaha nalézt spojitost mezi stupněm oslabení a vybranými ukazateli povrchové drsnosti vstupní suroviny, ze které byla vytvořena testovací tělesa. Zájem bude soustředěn na typické ukazatele Ra, Rz a Rsm, které budou u jednotlivých komponent zkušebních těles před lepením naměřeny, protože se tyto v průmyslu běžně využívají za účelem vyjádření povrchové drsnosti.

Posouzení tohoto vlivu pak umožní vydat jak doporučení kudy by se mohl ubírat další výzkum, tak i doporučení pro praktické postupy při lepení zhušťovaného dřeva. Průmyslové užívání zhušťovaného dřeva stále narůstá a negativa jako je zmíněné oslabení lepené spáry je třeba důkladně zkoumat a popsat metody, kterými taková omezení překonat a rozšířit tak užitnou hodnotu materiálu a dřevěné suroviny obecně.

3. Stavba dřeva

3.1 Proces vzniku

Než přistoupíme k popisu metod, jakými se zhušťování dřeva provádí, je vhodné připomenout základy stavby dřeva, protože používané postupy přímo vycházejí z fundamentálních vlastností dřevní hmoty. Ačkoli je možné analyzovat dřevo z mnoha různých pohledů, pro účely zhušťování jsou nejdůležitější fyzikální vlastnosti, které vyplývají z jeho mikroskopické struktury a buněčné stavby.

Proces vzniku dřeva přímo definuje jeho anatomickou strukturu. Mezi kůrou a dřevem stromu je pletivová vrstva živých dělivých buněk zvaná kambium. Jejich dělením dochází ke stálému přírůstku na obou stranách pletiva, směrem ke středu kmene tedy vznikají nové buňky dřeva (tzv. xylém) a směrem vnějším přibývají buňky tvořící kůru stromu. Mimo tropická klimatická pásma rostliny procházejí periodickými obdobími vegetačního klidu a kambium tak pracuje pouze na jaře a v létě. Výsledkem této přerušované činnosti je vznik letokruhu, složeného z vrstvy jarního, na vodu bohatého dřeva nižší hustoty, jehož primární účel je hlavně vedení vody obsahující rozpuštěné živiny z kořenů do koruny po zimním klidovém období, a dřeva letního, jehož vyšší hustota plní úlohu mechanickou a má přímý vliv na výsledné pevnostní charakteristiky dřeva. Nižší hustota jarního dřeva vyplývá z buněčné stavby, jeho buňky jsou v porovnání s letním velké a tenkostěnné, čímž mají zajištěnu vysokou permeabilitu roztoků.

Ačkoli jsou značné rozdíly v anatomické stavbě mezi jehličnany a listnáči, a dokonce i mezi jednotlivými druhy dřevin, společným rysem (viz. obr 1.) zůstává to, že různé typy buněk dřevní hmoty lignifikují a jsou pak tvořeny buněčnou stěnou a buněčnou dutinou, tzv. lumenem.



Obrázek 1: Mikrofotografie prostorové struktury dřev a) modřínu b) liliovníku a c) dubu
Zdroj: Šlezingerová J., Gandelová L.: Stavba dřeva (1994)

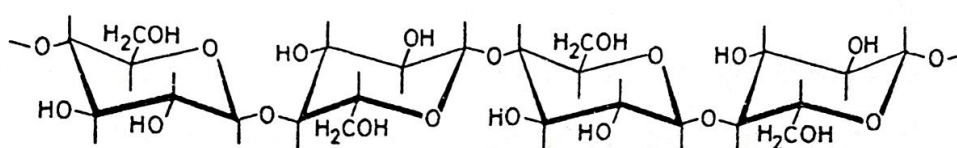
Právě množství a velikost buněčných lumenů má vliv na mnoho vlastností dřeva, jako například výslednou hustotu (samotná dřevní hmota má hustotu cca 1500 kg.m^{-3}), stupeň hygroskopicity a další. Současně platí, že z podélného uspořádání většiny buněk vyplývá i anizotropie dřeva neboli významná odlišnost většiny jeho vlastností v různých směrech, kterou nelze přehlížet při téměř žádném typu zpracování.

3.2 Chemicko-molekulární struktura

Samotnou dřevní hmotu tvoří převážně biopolymery celulóza (35-55 %), hemicelulózy (20-35 %) a lignin (15-36 %). Dlouhé řetězce makromolekul celulózy jsou uspořádány ve fibrilách, kde je část vodíkovými vazbami pravidelně uspořádána do prostorového systému, který označujeme jako krystalickou celulózu, která tvoří zhruba 70 %. Neuspořádaný zbytek označujeme jako amorfní podíl. Prostorově značně rozvětvená molekula ligninu se pak proplétá mezi molekulami celulózy a hemicelulóz, váže se na ně fyzikálními i chemickými vazbami a dodává tak výsledné molekulové konstrukci její pevnost. (Šlezingerová a Gandelová, 1994)

Z pohledu chemického se ve všech hlavních makromolekulách dřeva vyskytují stejné prvky: Převážně uhlík (50 %), kyslík (42 %), vodík (6 %) a dusík (1 %). Na rozdíl od značných rozdílů v podílech polymerů jsou poměry elementárních prvků málo rozdílné i napříč různými dřevinami a významně nekolísají. Zbylé procento pak připadá na širokou paletu anorganických látek (ve kterých však převažují vápenaté soli) a které lze zkoumat například při spalné zkoušce, kdy tvoří popel. Z pohledu modifikací a lepení zde mají hlavní význam hydroxylové -OH skupiny, které se v dlouhých řetězcích přítomných biopolymerů čteně vyskytují a které ochotně reagují s okolím. Zde může jít o žádoucí reakce, jako je tvorba vodíkového můstku s materiálem adheziva, nebo nežádoucí reakci jako je vazba s vodními parami, které bráníme například acetylací dřeva, při které je v hydroxylové skupině substituován aktivní vodík acetylovou skupinou za vzniku acetátu.

Tato znalost submikroskopického uspořádání je zásadní pro stanovení vhodného postupu pro modifikační metody a spolu s existencí buněčných lumenů ji pak využíváme při mnoha modifikacích dřeva, ať už jde třeba o impregnaci nebo právě zhušťování.



Obrázek 2: Část celulózového řetězce
Zdroj: Fengel, Wegener (1984)

4. Modifikace dřeva

4.1 Úvod do problematiky modifikací dřeva

S pochopením základních rysů stavby dřeva je možné věnovat se různým metodám modifikací. Obecně lze říci, že dřevo má kromě mnoha výhod stejně jako každý další materiál i své nevýhody. Jejich vliv lze různými metodami minimalizovat, až úplně potlačit a z tohoto důvodu vznikla dlouhá řada produktů, ať už např. nejruznější aglomerované materiály na bázi dřeva, tak i různé metody jeho modifikací.

Modifikací dřeva rozumíme proces, při kterém kontrolovaným působením různých vlivů, jako je teplota, vlhkost, tlak, záření či chemické sloučeniny měníme charakteristiky dřeva, které nám pro dané použití nevyhovují, popřípadě ještě zlepšujeme ty, které jsou pro nás už pozitivní. Nejde tedy pouze o zvyšování pružnosti či pevnosti, ale můžeme např. dosahovat vyšší rozměrové stability, zvyšovat trvanlivost nebo provádět barevné změny. Modifikační procesy ve výrobě pochopitelně představují zvýšení energetické a časové náročnosti, což se ve finále propisuje do vyšší ceny výsledného modifikovaného dřeva, a to je třeba zohlednit při rozhodování o vhodnosti využití pro daný účel.

Běžnou metodou je termická modifikace. Působením vysokých teplot dochází ve dřevě k nevratným změnám, které způsobují výrazný pokles přirozené hygroskopicity a tím pádem zvyšují rozměrovou stabilitu modifikovaného dřeva a odolnost vůči biotickým poškozením. Negativně se změna projevuje poklesem houževnatosti a pevnosti v celém objemu, jako neutrální efekt je vhodné zmínit tmavnutí dřeva. Jelikož je pro dosažení změn nutné materiál vystavit na dlouhé hodiny teplotám v rozmezí 160 – 280 °C (dle užití metody), je také potřeba zabránit přístupu kyslíku, který by způsoboval prudkou degradaci nebo mohl dokonce způsobit vzplanutí. Za tímto účelem se modifikace provádí v ochranné atmosféře nebo lázni, kdy postupy různých výrobců využívají vodních par, inertních plynů nebo rostlinných olejů. Některé z komerčních postupů jsou vysoce sofistikované a komplexní procesy sestávající z mnoha kroků s přechody mezi prostředími o různých tlacích a teplotách.

Chemická modifikace se provádí za podobným účelem jako modifikace termická, kdy v případě například acetylace snížením hygroskopicity omezujeme bobtnání a sesychání a zvyšujeme tak prostorovou stabilitu výrobku. Opět však za cenu zhoršení mechanických vlastností. Další známou chemickou modifikací jsou například i úprava amoniakem, uretanizace izokyanáty nebo impregnace nejruznějšími látkami. Opět je smyslem úprava

různých vlastností, jako navyšování odolnosti vůči nejrůznějším škůdcům, vlhkosti, nežádoucím vlivům světla, tepla a dalším.

Při impregnaci docílujeme převážně tlakovou metodou vyplnění buněčných lumenů vhodnou látkou v kapalné podobě, kde následně různými chemickými reakcemi dle užití látky vyzraje do pevného skupenství. Obvykle jde o různé oleje nebo pryskyřice. U dřevin s nízkou permeabilitou, které procesu napouštění kladou vysoký odpor, protože nejsou dobře propustné (například kvůli neprůchodnosti tracheid z důvodu uzavřených dvojteček), je možné přistoupit nejprve k úpravě materiálu mikrovlnným zářením. Ve dřevě o vysoké vlhkosti (více než 35 %) dochází působením mikrovln k vypařování vody, jejíž pára rozrušuje mikroskopickou strukturu dřeva v jeho slabších místech jako jsou buněčné ztenčeniny a při vyšších intenzitách záření způsobuje mikrotrhliny, díky kterým se prostupnost pro impregnační látky může zvýšit o několik řádů.

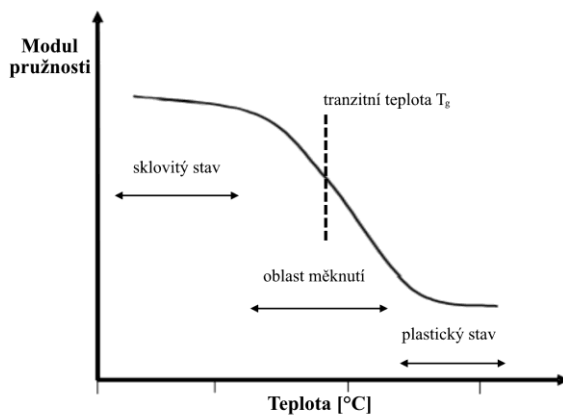
Další metodou jsou hydrotermické úpravy, ať už pářením nebo vařením, kdy působením tepla a vody či páry způsobujeme trvalé změny chemického i fyzikálního charakteru. Smyslem procesu bývá barevná egalizace v celém objemu suroviny, sterilizace či uvolnění vnitřních napětí. (Reinprecht a Pánek, 2016)

4.2 Zhušťování dřeva

Při zhušťování dřeva pak způsobujeme trvalou deformaci působením tlaku, výsledná zhutnělá struktura dřeva má lepší mechanické vlastnosti a vyšší hustotu, což přispívá vyšší odolnosti materiálu. Proces je ale náročnější, než prosté lisování: je třeba zabránit porušení struktury a usmýknutí vláken, které by naopak vedlo k významnému zhoršení mechanických vlastností. Z tohoto důvodu zahrnuje proces zhušťování působení tepla, nežřídka i předchozí plastifikaci vodní párou, a musí probíhat kontrolovanou rychlostí. Ovšem výhody jsou nesporné, proces zhušťování nám v některých případech například umožní používat levnější měkké, ale modifikované dřeviny namísto výrazně dražších tvrdých dřev, což může snadno ospravedlnit zvýšené náklady, které proces modifikace představuje. Právě toto je slibným cílem, kvůli kterému se zvyšuje zájem o postup levné a spolehlivé metody zhušťování a proč zájem o tuto modifikaci v posledních dvou dekádách roste, ačkoli postup je v základních rysech popsán už přes sto let (Sadatnezhad *et al*, 2017).

Existují procesy pro zhušťování podél vláken (touto metodou se získává dřevo, které je možné ohýbat na velice malý rádius, aniž by došlo k poškození či narušení jeho

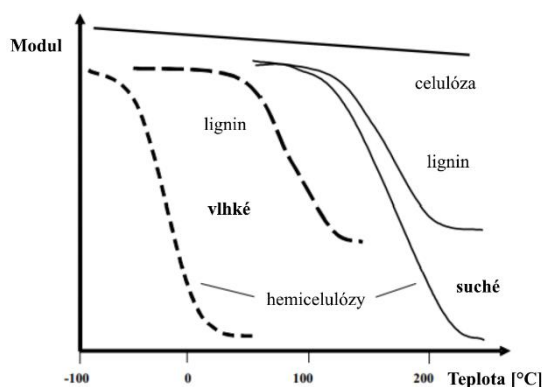
integrity) nebo pro zhušťování ve více směrech, ale pokud nebude uvedeno jinak, bude se v této práci popisovat pouze nejběžnější postup, kdy zhušťování probíhá ve směru kolmém na vlákna, protože pouze to má význam pro měření vlivu výsledné drsnosti povrchu na pevnost lepených spojů. (Kutnar a Šernek, 2007)



Graf 1: Průběh skelného přechodu u obecného amorfního polymeru
Zdroj: vlastní

Viskoelastická podstata dřeva hraje v procesu zhušťování významnou roli. V teorii polymerů krystalická fáze obnáší vyšší riziko trhlin, protože materiál je křehčí. Po skelném přechodu materiálu, způsobeném překročením tranzitní teploty však dojde k nárůstu mobility jednotlivých řetězců molekul a materiál ve své viskoelastické fázi umožňuje mnohem větší deformace bez rizika vzniku trhlin. Různé polymery, ze

kterých se dřevní hmota skládá, mají různé tranzitní teploty: nejprve měknou hemicelulózy, okolo 55 °C, následované ligninem s tranzitní teplotou v rozsahu 70 – 128 °C. U celulózy za běžných okolností skelný přechod nestanovujeme, což na zhušťování ale nemá význam, protože nejdůležitější je přechod u ligninu, který propůjčuje dřevu mechanické vlastnosti, jak bylo vysvětleno v minulé kapitole. Metodu zhušťování za pomoci pouze tlaku a tepla nazýváme termo-mechanickým procesem (TM).

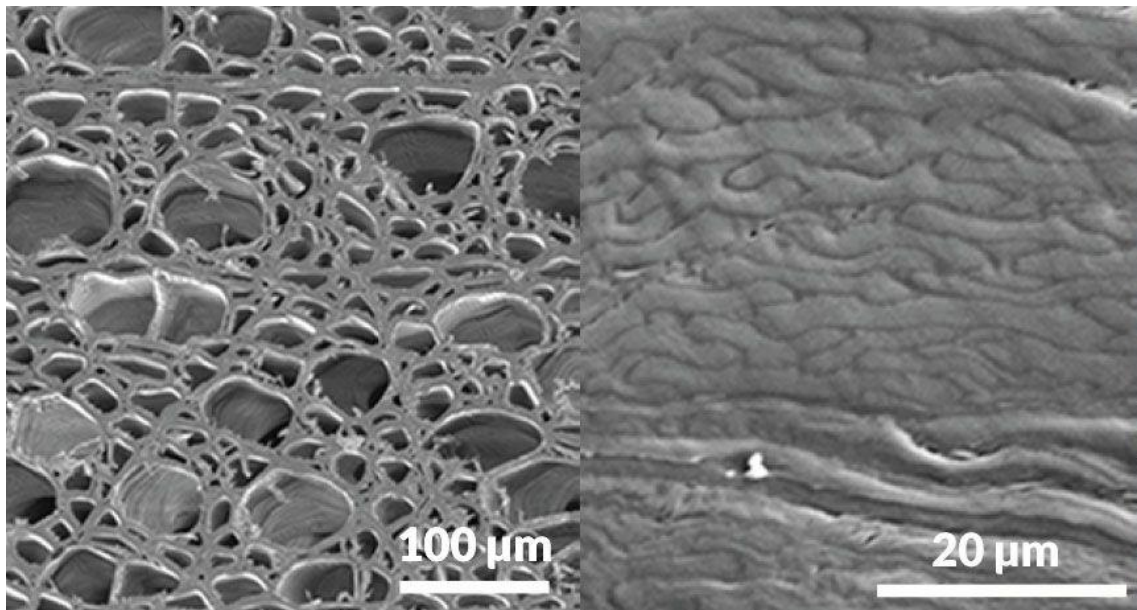


Graf 2: Znázornění vlivu vlhkosti na tranzitní teplotu
Zdroj: Kutnar, Šernek 2007

Zásadní vliv na přechodové teploty má vlhkost. Molekuly vody plastifikují materiál tím, že tvoří sekundární vazby s polárními skupinami v molekulách polymerů, oddalují tím jejich řetězce od sebe a oslabují tak jejich vzájemné sekundární vazby. Následkem je více prostoru pro pohyb řetězců molekul. Dřevo je tak snazší deformovat a také se snižuje přechodová teplota jednotlivých

složek. Proto bývá dřevo při zhušťování často plastifikováno vodní parou a pak mluvíme o termo-hydro-mechanickém procesu (THM).

Během modifikace tedy dojde působením tlaku ke kolapsu buněčných stěn, zániku buněčných lumenů a vytlačení vzduchu. Výsledkem je snížení objemu a z něj vyplývajícímu zvýšení měrné hustoty a s tímto spojený žádaný nárůst pevnosti a tvrdosti výsledného materiálu, který je smyslem celého postupu. Po uvolnění tlaku sice dojde působením vnitřních napětí pocházejících ze zbytkové pružnosti k okamžitému částečnému rozměrovému uvolnění, ale to se pohybuje v jednotkách procent.



Obrázek 3: Rozdíl vnitřních struktur před a po zhuštění na extrémně vysoký stupeň
Zdroj: Song et al/Nature 2018

4.3 Spring-back a jeho potlačení

Větší komplikaci představuje tzv. spring-back efekt, kdy vlhkost, které vystavíme zhuštěné dřevo, dokáže postupně téměř zcela negovat celý proces. Proto je třeba výsledný materiál stabilizovat a fixovat ho v novém stavu. Pracujeme se třemi metodami fixace:

1. Změna hygroskopicity buněčných stěn, kterou bráníme opětovnému změkčení
2. Tvorbou kovalentních vazeb v polymerech v deformovaném stavu
3. Uvolnění elastických pnutí uložených při zhušťování ve vláknech

Třetí metoda se ukazuje jako nejefektivnější, protože dostatečná plastifikace dřeva před zhuštěním zásadně snižuje samotný vznik vnitřních napětí v průběhu procesu a téměř úplné fixace lze dosáhnout zařazením dalšího ošetření párou na závěr lisování. Alternativně je možné zajistit eliminaci spring-back efektu závěrečným vysokoteplotním ošetřením, které zajistí termální degradaci hygroskopických komponentů v hemicelulózách. (Kariz et al, 2017)

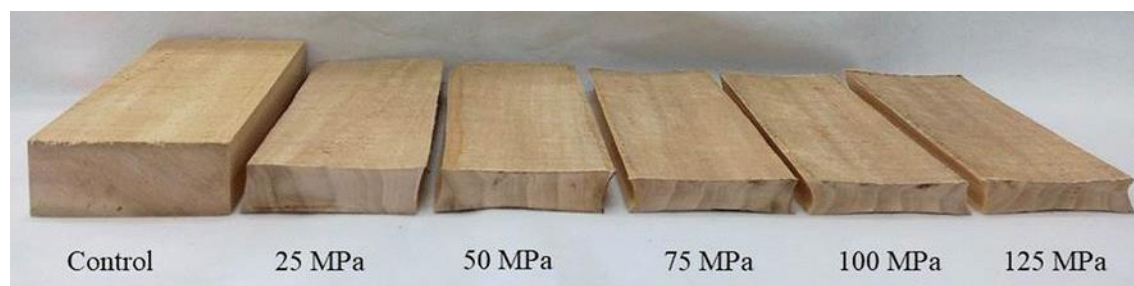
4.4 Proces výroby

První patent na zhušťování dřeva byl udělen už roku 1916 v Německu, na jeho základě vzniklá společnost Röchling Group dodnes na trh uvádí produkty pod obchodním názvem Lignostone®. Od svých počátků se metoda sice dále rozvíjí, ale základní postup zůstává stejný a je možné rozdělit ho do čtyř základních kroků:

1. Plastifikace buněčných stěn xylému
2. Tlakové působení na dřevní vlákna
3. Ochlazování a sušení v novém stavu
4. Zafixování modifikovaného stavu

Jako i u ostatních modifikací, uvedených v začátku kapitoly, i zde si každý výrobce vyvíjí a zdokonaluje vlastní postup a experimentuje s vhodným nastavením tlaku, teploty a vlhkosti v jednotlivých krocích. Rámcově se lisovací teploty uvádějí v rozmezí 100 – 200 °C a tlaky dle konkrétních dřevin, metod a požadovaných kompresních poměrů dosahují širokých rozsahů od jednotek po stovky MPa (Yu *et al*, 2020). Také v akademickém prostředí probíhá výzkum a hledání rychlé a nenákladné výroby zhušťovaného dřeva. Slibné výsledky nabízí například výzkum průběžného lisování, což je postup v dřevozpracujícím průmyslu široce užívaný například pro výrobu třískových desek. (Sadatnezhad *et al*, 2017). Taková metoda by umožnila skokové zlevnění hromadné produkce a umožnila materiály ze zhušťovaného dřeva rozšířit do více odvětví.

Při hledání nových materiálů a postupů se experimentuje se i s kombinacemi modifikací, obvykle za účelem stabilizace. Je tak možné například dřevo v průběhu zhušťování impregnovat, nebo výsledný produkt termicky modifikovat, či naopak přistoupit k zhušťování již acetylované nebo termicky modifikované suroviny (Yu *et al*, 2020, Kariz *et al*, 2017).



Obrázek 4: Vzorok topolu zhušťovaného při různých podmínkách
Zdroj: Yu *et al* 2020

5. Lepené spoje/Vrstvené dřevo

5.1 Alternativy k masivnímu dřevu

Všudypřítomné dřevo nabízí mnoho výhod, jako snadnou a víceméně neomezenou dostupnost, všestrannost, ale i estetické kvality, nezanedbatelné emoční působení či enviromentální zodpovědnost. Současně ve své přirozené podobě přichází s řadou nevýhod, spojených se sensitivitou na vnější vlivy během růstu, jeho hygroskopicitou, anizotropií, ale také s rozměrovými omezeními danými fyzickou velikostí kmene. Ovšem prostředky, které nám propůjčuje moderní technické zpracovávání umožňuje tato omezení překonávat a dřevo tak může v mnoha průmyslových odvětvích doplňovat a někdy dokonce nahrazovat ostatní konstrukční materiály jako je ocel či beton. (Sandberg *et al.*, 2019)

Na počátku, zhruba před sto lety, u prvních pokusů průmyslově zpracovávat dřevo i v jiné podobě než masivní, stály třískové desky. Vývoj probíhal spíše metodou pokusů a omylů, protože ani technologie, ani znalosti materiálů ještě nebyly na dostatečné úrovni a jak se záhy ukázalo, oproti původním očekáváním nešlo vůbec o triviální úkol. Od té doby ovšem došlo k významnému pokroku a technologickému rozmachu, a tak je velikost globálního trhu s výrobou materiálů na bázi dřeva pro rok 2022 odhadována na více než 250 miliard USD. (The Business Research Company, 2022)

Aglomerované materiály na bázi dřeva, známé také jako rekonstituované dřevo, jsou tak hlavním bodem zájmu dřevařské výroby a uplatňují se dnes nejen ve stavebnictví či při výrobě nábytku díky tomu, že nabízejí větší svobodu a širší uplatnění. To vyplývá z možností, které dřevěným kompozitům propůjčuje jejich různorodost a jelikož dřevo má v kompozitu úlohu plniva, přináší výslednému materiálu své pozitivní vlastnosti, jako je pevnost, pružnost či nízká váha a tyto je možné upravovat dle potřeby velikostí a tvarem dřevěných částic. Stejně tak je důležité zvolené pojivo, které výsledku dodává odolnost proti vlivům vlhkosti nebo teploty a z toho potom vyplývá tvarová stabilita, homogenita, snadná opracovatelnost nebo třeba rozměrová volnost.

V rodině aglomerovaných materiálů najdeme tak široké variace, jako jsou desky lisované z orientovaných plochých třísek, extrudované třískové desky různých hrubostí a hustot, ale také překližované desky či vrstvené dřevo. Je tedy zřejmé, že základní vstupní surovina může mít jakoukoli podobu od dýh, přes štěpku až po třísky nebo vlákna. Zde

za zmínku určitě stojí i fakt, že mezi dosud nezmíněné přednosti výroby aglomerovaných materiálů patří i příležitost zpracovat například odpadní dřevní hmotu z jiné výroby.

U všech těchto frakcí je zcela zásadní jejich afinita k pojicím hmotám, typicky zde uvažujeme lepicí hmotu v podobě syntetických polymerů (aglomerované materiály s minerálními pojivy jsou zcela odlišnou kapitolou z pohledu užití, vlastností i výroby, a proto jsou zde pomínuty, ač jsou hlavně ve stavebnictví také značně rozšířené). Mluvíme zde o lepicích hmotách hlavně z toho důvodu, že se v průmyslové výrobě nepoužívají samotná lepidla, ale směsi lepidel, stabilizátorů a pomocných látek, například fungicidů, hydrofobizačních prostředků (typický je parafín), retardérů hoření a dalších aditiv podle požadovaných výsledných vlastností daného výrobku. Ty se na dřevěnou frakci nanáší převážně v tekuté formě a následně jsou působením tepla a tlaku vytvrzovány. Mimo průmyslovou výrobu, například v kusové truhlářské výrobě, se používají lepidla, která vytvrzují jinými vlivy, třeba odpařením vody z disperze nebo působením vzdušné vlhkosti, působením chemických tvrdidel a dalšími.

5.2 Vrstvené dřevo

V kontextu této práce stojí za zdůraznění materiály vzniklé vrstvením. Coby základní rozdělení může posloužit orientace jednotlivých vrstev, zde rozlišujeme široce rozšířené materiály překližované, kdy orientace jednotlivých vrstev alternuje, a potom takové, kdy vrstvy mají v podélném směru stejnou orientaci. Do první skupiny patří dobře známé překližky, laťovky, biodesky a dýhovky, druhá skupina zahrnuje nosné konstrukční materiály jako je glulam, LVL, ale také parallam a některé další méně rozšířené výrobky. Překližování slouží k homogenizaci pevnostních a rozměrových charakteristik ve dvou plošných směrech a takové produkty jsou pro svou dostupnost rozšířené ve všech průmyslových sektorech, kde je využití pro materiály na bázi dřeva; materiály se stejným průběhem vláken se vyznačují významným nárůstem pevnosti a pružnosti v podélném směru a bývají využívány např. jako nosníky ve stavebním tesařství. To, co mají všechny společné je smykové působení na lepený spoj v případě namáhání vnějšími silami a u takových materiálů nás potom zajímají jejich pevnostní charakteristiky, ze kterých se odvozuje užitná hodnota daného materiálu.

Na trhu se setkáváme s produkty z vrstveného dřeva, které však nejsou tvořeny lamelami či loupanými dýhami jak je obvyklé, ale jsou založeny právě na zhušťovaném dřevě. Například výrobce Rhino (Melbourne, Austrálie) nabízí produkt jménem DensiPLY a mezi vhodnými účely použití uvádí například zátěžové podlahy

v prostředcích hromadné dopravy či v lodních kontejnerech, nebo výrobu LVL nosníků. Uvádí výslednou hustotu svého produktu až 1250 kg/m^3 (Rhino, web výrobce). Řada dalších výrobců denzifikované překližky nabízí polepované profilovaným hliníkovým plechem pro trvanlivé pochozí konstrukce, nebo voděodolné zhušťované překližky pro použití ve stavebnictví jako opakovaně použitelné bednění. U těchto využití je prospěch hlavně ze zvýšené tvrdosti a tím pádem i trvanlivosti materiálu, při ceně a hmotnosti výhodnější, než nabízí řešení například z kovu. Vrstvené zhušťované dřevo je využíváno také v elektromechanických aplikacích, například v transformátorových rozvodnách je po mnoho desítek let využíváno pro své výborné elektroizolační vlastnosti, rozměrovou stabilitu, pevnost i absorpční vlastnosti výhodné v olejových lázních transformátorů (Rancan, web výrobce). Kvůli dobrým tepelně izolačním vlastnostem je zase vyhledáváno v kryogenických aplikacích, jako je manipulace a ukládání kapalných plynů (LNG, LPG).

V takových případech nemusí být negativní vliv zhuštění na pevnost lepených spojů problém, ovšem v případě použití pro konstrukční materiály je takový efekt nepřijatelný. Vrstvené materiály jako například uvedené LVL vytváříme za zvýšených nákladů proto, abychom dosáhli výhodnějších pevnostních charakteristik výsledného materiálu oproti jiným variantám, proto je pro zachování účelu, ale i bezpečnosti, nutné zajistit plnohodnotný lepený spoj. Možnost použití zhuštěného dřeva je v takových případech nezbytné podrobit důslednému testování a vzniká nový produkt, se specifickými nároky i postupem výroby. Zde se nabízí prostor pro výzkum a výrobu zcela nových materiálů na bázi dřeva, které umožní využití výhod, které denzifikace přináší, při současném překonání průvodních omezení.

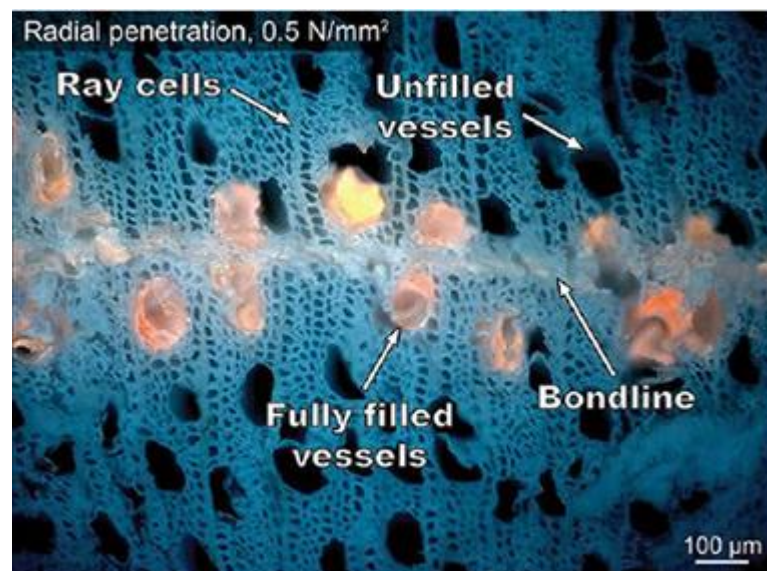
Z popsaného je zřejmé, že lepené spoje mají zásadní význam jak při výrobě konstrukčních materiálů, tak i konečných výrobků, a proto je tak důležité věnovat pozornost vlivům na jejich vlastnosti. Ve spojitosti se zhušťovaným dřevem tak můžeme řešit hlavně sníženou drsnost povrchu oproti dřevu nemodifikovanému a pak významnou proměnu vnitřní struktury. Jak bylo předestřeno, zde se soustředíme na průzkum vlivu snížené drsnosti povrchu vlivem lisování v průběhu procesu zhušťování.

6. Teorie lepení

6.1 Úvod do problematiky lepení

Lepení je konstrukční metoda spojování nejrůznějších materiálů stará tisíce let. Dlouhou dobu lidstvo používalo nejrůznější dostupné přírodní substance bez významnějších změn, ale počátkem minulého století začaly místo nich nastupovat sloučeniny na bázi uhlovodíků získávaných z ropy. (Sandberg *et al.*, 2019)

Pórovitost a anizotropní charakter dřeva způsobují to, že některá druhy lepidel jsou pro jeho lepení vhodnější. Má se za to, že na účinnost vazby lepené spáry má u dřeva hlavní vliv stupeň penetrace do pórů ve spojovaných dílech. Ačkoliv probíhá v tomto směru rozsáhlý výzkum za pomoci mikroskopie a přidružených technik, ohromné množství kombinací druhů dřev, lepidel i metod jejich aplikace ztěžuje zobecňování definice. (Ülker, 2016)



Obrázek 5: Mikrofotoografie radiální penetrace v lepené spáře
Zdroj: O. Ülker, 2016

Známý princip popisuje, že lepicí hmoty fungují na principu adheze a koheze, a adhezní vazby jsou v případě dřeva jak fyzikální, tak chemické. Pronikání lepidla do dřeva tvořící fyzikální vazbu probíhá hlavně do prostoru lumenů, popsaných ve druhé kapitole a do mikrotrhlin mezi vlákny. Nějaká část pak vniká difuzí také do buněčné stěny, kde tvoří kovalentní vazby, nebo sekundární chemické vazby vlivem elektrostatických sil. Kohezi zajišťuje soudružnost lepicí hmoty neboli vnitřní vazby v polymeru samotném, ať už v řetězcích makromolekul, nebo v jejich vzájemném

zasítování vzniklém během procesu vytvrzování. Výsledná lepená spára má za ideálních podmínek vyšší pevnost než samotný lepený materiál. (Ülker, 2016)

Z popsaného principu je zřejmé, že kvalita povrchu, jeho opracování, a obecně vše, co ovlivňuje povrch dřeva v místě lepení má přímý vliv na charakteristiky lepeného spoje, protože jmenované mění jak fyzikální vlastnosti povrchu jako jeho smáčivost či hrubost, tak i podpovrchovou strukturu např. rozrušováním buněčných stěn, a navíc spolu všechny jmenované vlastnosti navzájem přímo souvisí. (Kılıç, 2016)

Jak už bylo zmíněno v úvodu, z principu zhušťování dřeva, blíže popsaném ve třetí kapitole, vyplývá zřejmá proměna morfologie povrchu v průběhu tohoto procesu. Takto upravené dřevo má výsledný povrch egalizovaný, lumeny stlačené a výsledkem je snížená povrchová permeabilita. Lepidlo z těchto důvodů hůře proniká do materiálu, dostává se ho tam méně a do menší hloubky. V závislosti na druhu lepidla lze pak očekávat oslabení spoje proti ideálním hodnotám. (Bektha *et al.*, 2017)

6.2 Skupiny lepidel

Zde si představíme základní skupiny lepidel, běžně používané při výrobě různých materiálů na bázi dřeva:

Močovinoformaldehydová lepidla (UF) jsou základním typem, široce užívaným v nábytkářském průmyslu pro svou nízkou cenu. Špatná odolnost proti vodě je určuje k užívání v interiérových aplikacích, dnes ale spíše zastavené uvnitř konstrukcí kvůli postupnému uvolňování zdraví škodlivého formaldehydu v průběhu jejich životnosti vlivem depolymerizace.

Fenolformaldehydová lepidla (PF) nabízejí oproti UF vyšší odolnost jak proti vlhkosti, tak teple a vyznačují se celkově vyšší stálostí. Typické zastoupení je při výrobě odolných desek z orientovaných plochých třísek (OSB) určených pro použití v exteriérech. Je pro ně charakteristická tmavá barva, která komplikuje jejich použití v pohledových konstrukcích.

Melaminformaldehydová lepidla (MF) přinášejí také dobrou odolnost vlhkosti, jsou však světlá a hodí se tak lépe pro použití u pohledových dílů a konstrukcí. Značnou nevýhodou je jejich vysoká cena, způsobená přítomností melaminu, ale je obvyklé kombinovat je s močovinou, kdy si výsledek zachovává vysokou odolnost vlhkosti, ale při nižších vstupních nákladech. Taková vcelku očekávatelně nazýváme melaminmočovinoformaldehydovými lepidly.

Polyuretanová lepidla (PU) jsou dalším rozšířeným typem lepidla používaným při zpracování dřeva. Jde o polymer vyráběný polyadici diisokyanátů s vícesytnými alkoholy, kdy přesmyknutím atomu vodíku mezi monomery vzniká uretanová vazba. Významnou předností je flexibilita při nízkých teplotách a tvorba vazeb mezi izokyanáty a vodíkem v lepeném povrchu, což umožňuje úspěšný spoj i mezi materiály odlišné vlhkosti. Při zrání se k sobě jednotlivé řetězce polymeru přibližují a navzájem síťují, čímž vzniká pevná nevratná vazba odolná proti vodě, nevýhodou však je že proces vyžaduje silný tlak na lepený spoj.

Polyvinylacetátová lepidla (PVAc) jsou široce využívaná hlavně v ruční výrobě nábytku, jejich nízká odolnost proti vlhkosti je vyřazuje z většiny použití ve výrobě aglomerovaných materiálů, kromě specifik jako je např. boční lepení lat'ovek a spárovek. Přesto nabízí nesporné výhody jako je nízká cena, minimální enviromentální zátěž nebo snadná aplikace.

Dále se setkáváme s *epoxidovými lepidly*, tvořenými epoxidovou pryskyřicí vytvrzovanou chemickým teplem, s výbornou chemickou, teplotní a vlhkostní odolností, dále s *polyesterovými pryskyřicemi*, které jsou aktivovány peroxidy způsobujícími zesíťování a proměnu v termosetové lepidlo ve vinylových segmentech nebo *resorcinolová lepidla* vhodná pro extrémní podmínky konstrukčních venkovních spojů. Všechny tyto druhy mají společnou vysokou cenu, ze které vyplývá jejich využívání pouze v opodstatněných, konkrétních případech, pro které jsou specificky vhodné. (Sandberg, 2019)

Pro dosažení kvalitního spoje je nutné lepení provádět ve vhodných podmínkách a také dodržovat správné technologické postupy s přihlédnutím k instrukcím výrobce daného lepidla. Typicky jde o instrukce, zda se nanáší na jednu nebo oba lepené díly, jak dlouhý je otevřený čas, po který je možné po nanesení lepidla s díly ještě manipulovat, zda je vyžadováno zavaznutí lepidla před přiložením dílů k sobě nebo zda lepení vyžaduje lisování a po jak dlouhou dobu.

Pro lepení testovacích těles pro měření pevnosti v tomto experimentu použijeme jednosložkové polyuretanové lepidlo Kestopur 1030 finského výrobce Kiilto. Lepidlo vytvrzuje vzdušnou vlhkostí a je navrženo přímo pro lepení namáhaných spojů dřevěných komponent, proto musí splňovat CSN EN 15425 a je schváleno pro použití při výrobě glulam dle EN 14080. Dle výrobce má lepidlo otevřený čas 30 minut a vyžaduje přítlak na spoj po dobu nejméně 90 minut.

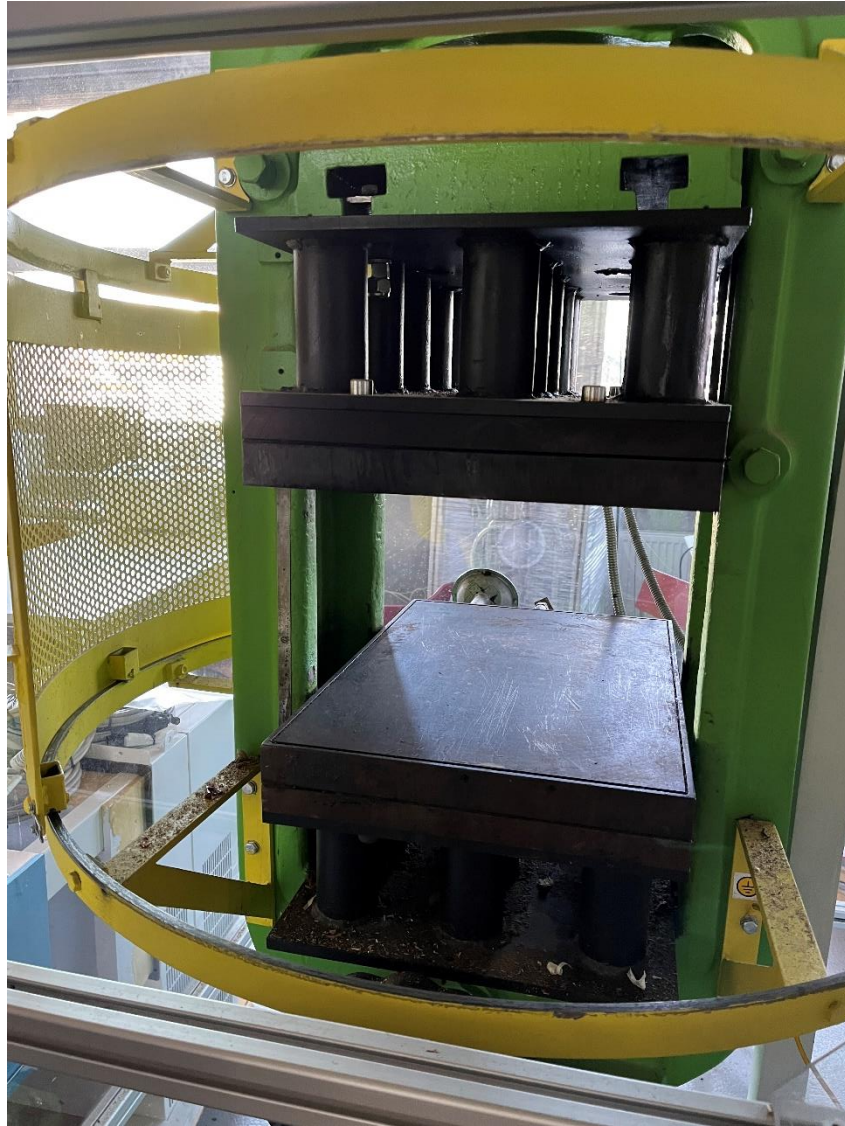
7. Metodika

První fáze přípravy na měření byl výběr vhodných kandidátů z kompletního souboru připravených bukových lamel. Všechny byly změřeny ve třech bodech na šířku i tloušťku, jednou ve směru podélném, následně byla každá lamela zvážena a všechny údaje byly zaneseny do katalogové tabulky. Tam byly rozděleny na jednotlivé výběrové soubory podle stupně zhuštění, pro který byly určeny. V tomto kroku byly optickou kontrolou rovnou vyřazeny vzorky, které z různých důvodů nesplňovaly požadovaný standard.



Obrázek 6: Selektce vzorků, jejich měření a vážení
Zdroj: vlastní

Průměrná hustota celého souboru byla 735 kg.m^{-3} , z každého výběrového souboru bylo tedy vybráno 20 vzorků, které byly nejbližší celkové průměrné hodnotě (nejprve byly vyřazeny vzorky, které se lišily o více než standardní odchylku a následně byl stanoven rozsah pro každý výběrový soubor zvlášť). Vybrané vzorky byly klimatizovány po dobu dvou týdnů na 12 % vlhkost, znovu změřeny popsáním postupem a následně zhuštěny na vyhřívaném lisu na požadovaný stupeň při teplotě ploten $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Zhuštění proběhlo dle zadání do čtyřech skupin, na které byly lamely tloušťkově připraveny, a to o 5, 10, 15 a 20 % tloušťky a každá lamela byla ponechána v zatíženém stavu 120 sekund.



*Obrázek 7: Lis připravený k činnosti
Zdroj: vlastní*

Po zhuštění byly lamely ponechány v klidu po dobu čtyř týdnů, kdy se mohl naplno projevit spring-back efekt tak, aby se uvolnila denzifikací vytvořená vnitřní napětí a aby byly vzorky rozměrově stabilní.

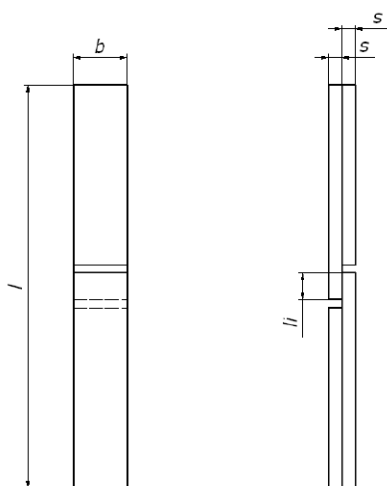
Dále bylo přistoupeno ke stanovení kvalitativních ukazatelů povrchu. Zde posloužil profilometr Form Talysurf Intra britského výrobce Taylor Hobson. Jde o kontaktní profilometr běžného typu: přístroj využívá měřící jehlu, kterou přejíždí po povrchu měřeného vzorku a analýzou jejího vertikálního pohybu, který představuje funkci polohy při horizontálním posunu, dokáže stanovit celou řadu ukazatelů, které přenáší do aplikace v připojeném PC. Tam je možné naměřené hodnoty zobrazit například graficky a také dále zpracovávat. Pro potřeby experimentu byly zásadní hlavně následující hodnoty:

- **Ra**, což je nejrozšířenější, ale současně nejobecnější ukazatel určující průměrnou aritmetickou absolutní odchylku profilu drsnosti od střední čáry
- střední hloubka drsnosti **Rz**, která popisuje průměrnou hodnotu pěti největších výškových rozdílů na pěti základních délkách měření a oproti Ra je citlivější vůči extrémům
- **Rsm**, které popisuje střední hodnotu roztečí nerovností v měřeném profilu v rozsahu vyhodnocované délky

Tyto údaje byly doplněny do katalogu vzorků.



Obrázek 8: Pracoviště pro měření ukazatelů povrchu
Zdroj: vlastní, vzorek je ilustrativní



Obrázek 9: Zkušební těleso dle ČSN EN 205

Dalším krokem pak bylo slepení lamel do testovacího tělesa, které specifikuje norma ČSN EN 205. Páry lamel jsou slepeny naplocho a po vytvrzení lepidla jsou zářezy z opačných stran přerušeny tak, aby vznikl překryv li o ploše 1 cm^2 . Ten při namáhání tělesa v tahu nese smykové namáhání a jeho selháním zjišťujeme pevnost lepeného spoje v této ploše. Měření pevnosti bylo provedeno na testovacím stroji UTS50 s čelistmi uzpůsobenými pro uchycení zkušebních těles. Do čelistí jsou upnuty testovací

tělesa tak, aby silové působení probíhalo ve střední ploše v rovině lepené spáry. Následně je vzorek zatěžován až do okamžiku selhání a je zaznamenána hodnota maximální síly F_{max} v Newtonech. Setrvalé zatěžování je nastaveno tak, aby k selhání došlo mezi 30 a 60 vteřinami po začátku. (ČSN EN 205)

Následně z naměřených hodnot vypočítáme smykovou pevnost τ [MPa] pomocí vzorce

$$\tau = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{l_2 \times b}$$

kde

F_{max} je maximální síla v Newtonech [N]

A je plocha lepeného povrchu ve čtverečních milimetrech [mm²]

l_2 je délka lepeného povrchu v milimetrech [mm]

b je šířka lepeného povrchu v milimetrech [mm]



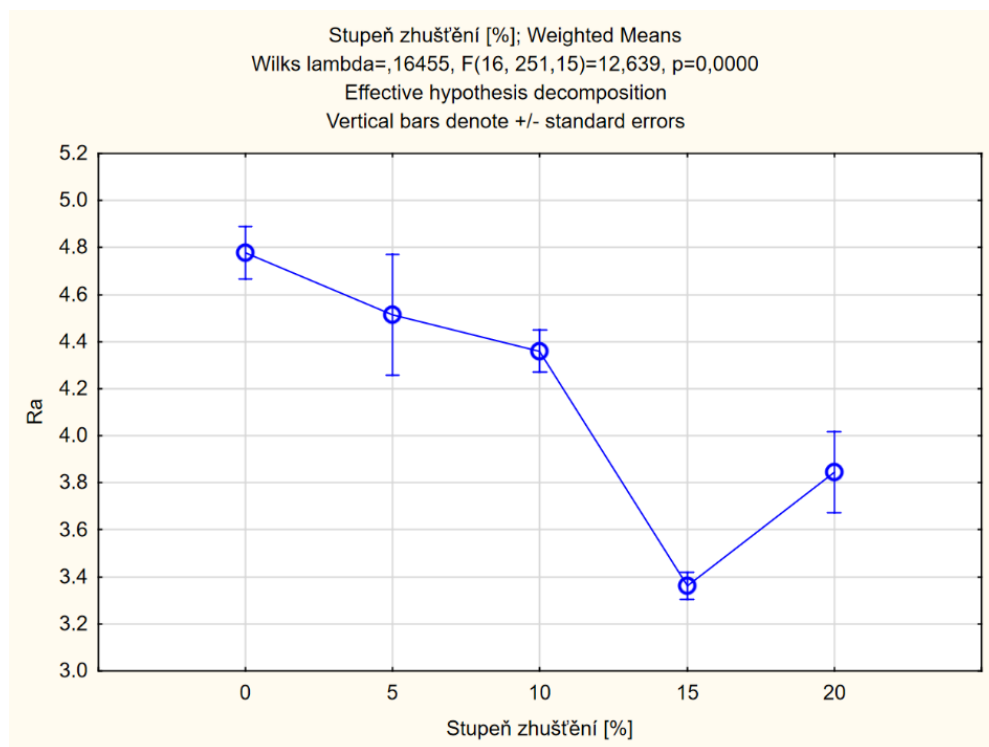
Obrázek 10: Lepení vzorků pro experiment
Zdroj: vlastní

V poslední kroku byla výsledná data zadána do aplikace TIBCO Statistica 14 pro analýzu a další zpracování.

8. Výsledky a diskuse

8.1 Výsledky

Nejprve se podíváme na vztah mezi ukazatelem Ra, určujícím průměrnou odchylku profilu drsnosti a stupněm zhuštění jednotlivých vzorků:



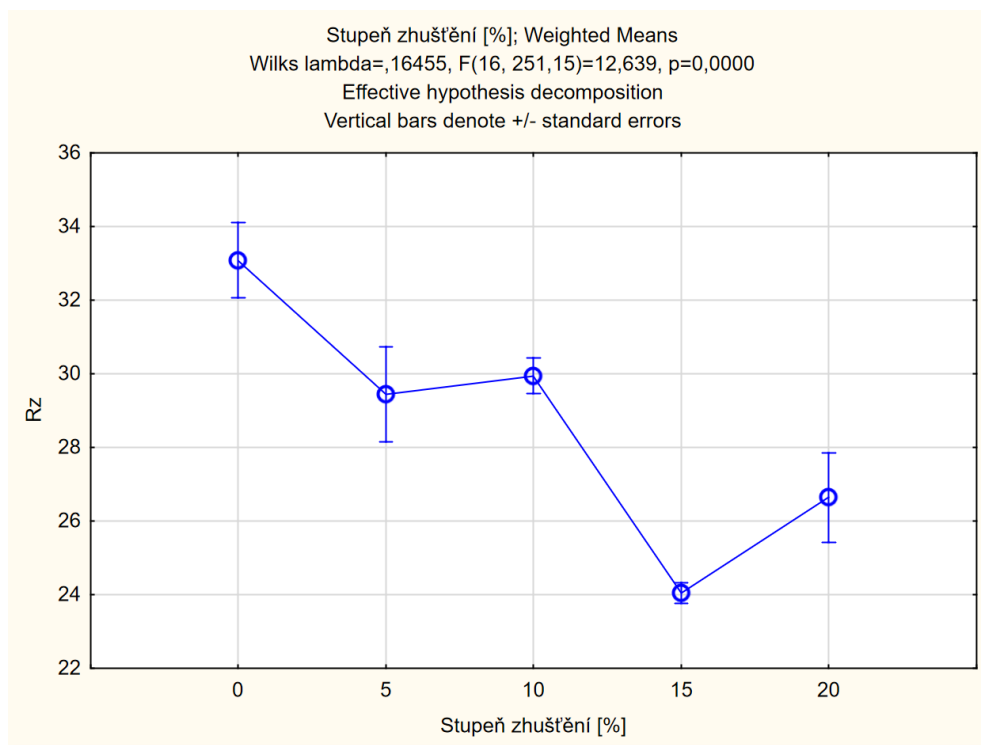
Graf 3: Závislost ukazatele Ra na stupni zhuštění

Se vzrůstajícím stupněm zhuštění je možné pozorovat očekávatelný pokles hodnot Ra v důsledku lisování materiálu, při kterém došlo k povrchové egalizaci měřených lamel. Vrcholy vystupující nad plochu materiálu byly stlačeny a celkový výškový rozptyl oproti rýhám se snižuje, což ukazatel správně odráží. Na každý nárůst zhuštění o 5 % vidíme pokles hodnoty ukazatele Ra o přibližně 5 %. Za zvýšenou pozornost zde stojí hodnota pro 15 % zhuštění, která odskakuje od trendu do ještě nižších hodnot, k tomuto fenoménu se vrátíme v kontextu ostatních výsledků.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty Ra

| Stupeň zhuštění [%] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---------------------|-------|------|------|------|------|
| Ra | 4.78 | 4.51 | 4.36 | 3.36 | 3.85 |
| Změna | 100 % | 94 % | 91 % | 70 % | 80 % |

Následuje graf pro ukazatel Rz:



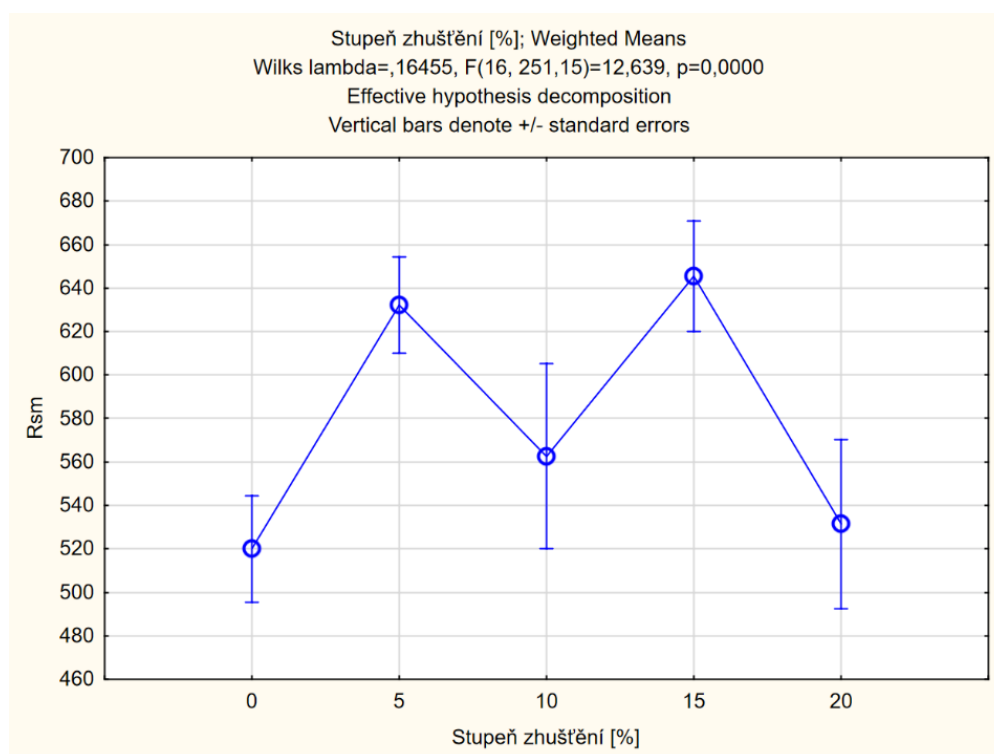
Graf 4: Závislost ukazatele Rz na stupni zhuštění

Také u hodnoty Rz můžeme sledovat sestupnou tendenci, ačkoli už ne tak jednoznačnou, ovšem s přihlédnutím ke standardní chybě jde stále o tendenci porovnatelnou s průběhem u Ra, a protože ukazatel Rz je citlivější na extrémní hodnoty, v menších skupinách vzorků lze očekávat vyšší variabilitu než jakou ukazuje Ra. Opět pozorujeme pokles drsnosti až o 20 % v závislosti na stupni zhuštění vzorku. I zde je hodnota pro 15 % zhuštění nižší, než napovídá celkový trend.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty Rz

| Stupeň zhuštění [%] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Rz | 33.09 | 29.44 | 29.94 | 24.04 | 26.64 |
| Změna | 100 % | 89 % | 90 % | 73 % | 80 % |

Rsm, které popisuje průměrné vzdálenosti jednotlivých nerovností, v souladu s očekáváním žádnou jednoznačnou závislost na stupni zhušťování nevykazuje, jelikož nedocházelo k žádnému dodatečnému opracovávání povrchu dřeva:



Graf 5: Závislost ukazatele Rsm na stupni zhuštění

Pro úplnost a potřeby případné reference zde uvádím naměřené hodnoty Rsm.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty Rsm

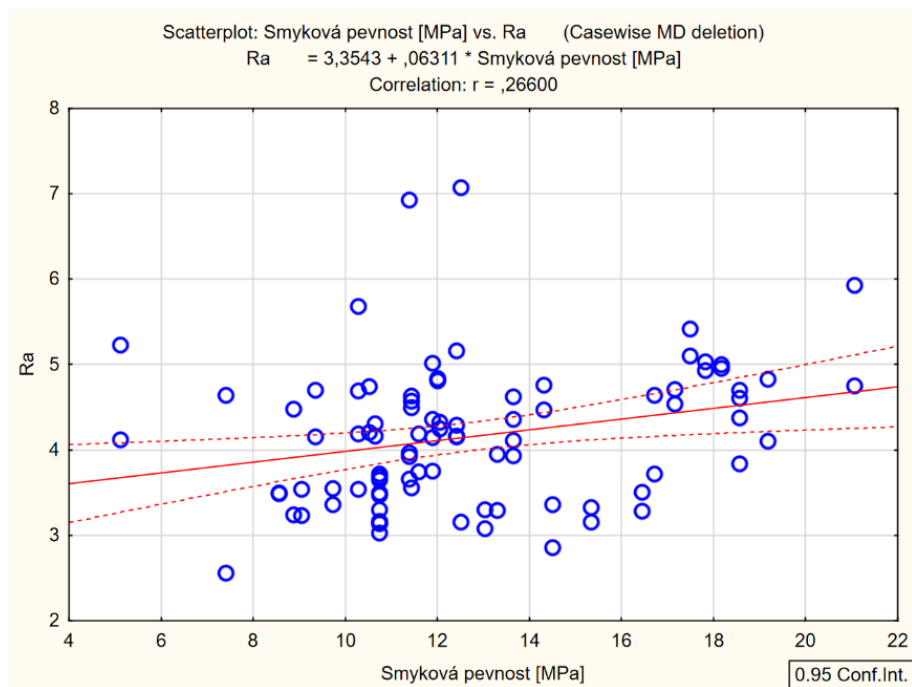
| Stupeň zhuštění [%] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Rsm | 519.93 | 632.09 | 562.63 | 645.52 | 531.39 |
| Změna | 100 % | 122 % | 108 % | 124 % | 102 % |

Možná příčina odchylky poklesu hodnot Ra a Rz u vzorků s 15 % zhuštěním by mohla být způsobena vyšší průměrnou měrnou hustotou této skupiny vzorků. Vliv hustoty dřeva na výslednou povrchovou morfologii po zhušťování je ale mimo rozsah této práce a tato hypotéza by vyžadovala samostatný výzkum.

Tabulka 4: Průměrné hustoty testovacích skupin

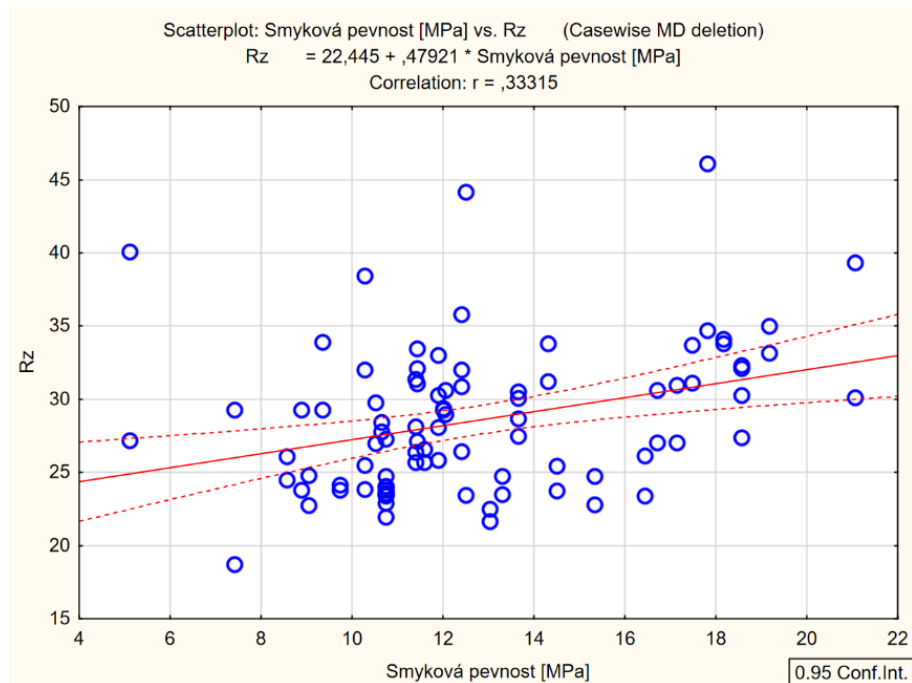
| ρ_{ref} [g/cm ³] | ρ_5 [g/cm ³] | ρ_{10} [g/cm ³] | ρ_{15} [g/cm ³] | ρ_{20} [g/cm ³] |
|--|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0.742 | 0.733 | 0.742 | 0.791 | 0.749 |

Následuje kontrola korelací, opět nejprve pro Ra:



Graf 6: Korelace smykové pevnosti a ukazatele Ra

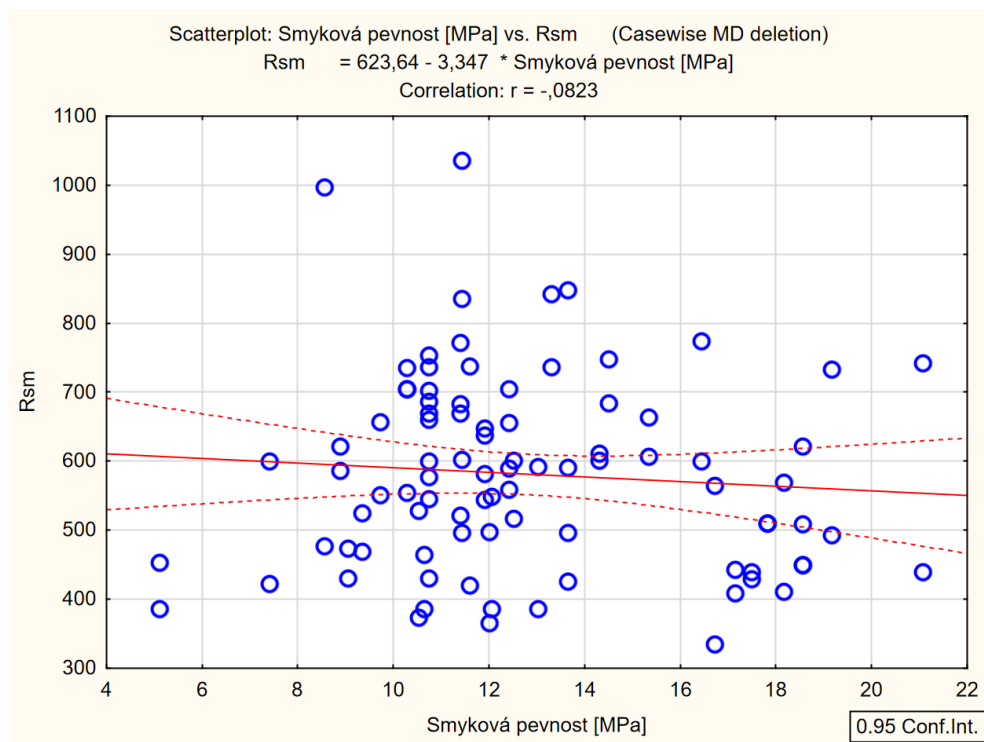
Ze statistické korelace je možné vyvodit, zda na sobě veličiny závisí, ovšem koeficient 0.266 naznačuje, že mezi těmito veličinami lineární vztah neexistuje. Pro hodnotu Rz:



Graf 7: Korelace smykové pevnosti a ukazatele Rz

I zde je hodnota korelace nízká, pouze 0.333, tudíž s 95 % spolehlivostí lze vyloučit vztah těchto vybraných ukazatelů kvality povrchu na pevnost lepené spáry.

Opět hlavně pro úplnost uvádím korelaci pro ukazatel Rsm:

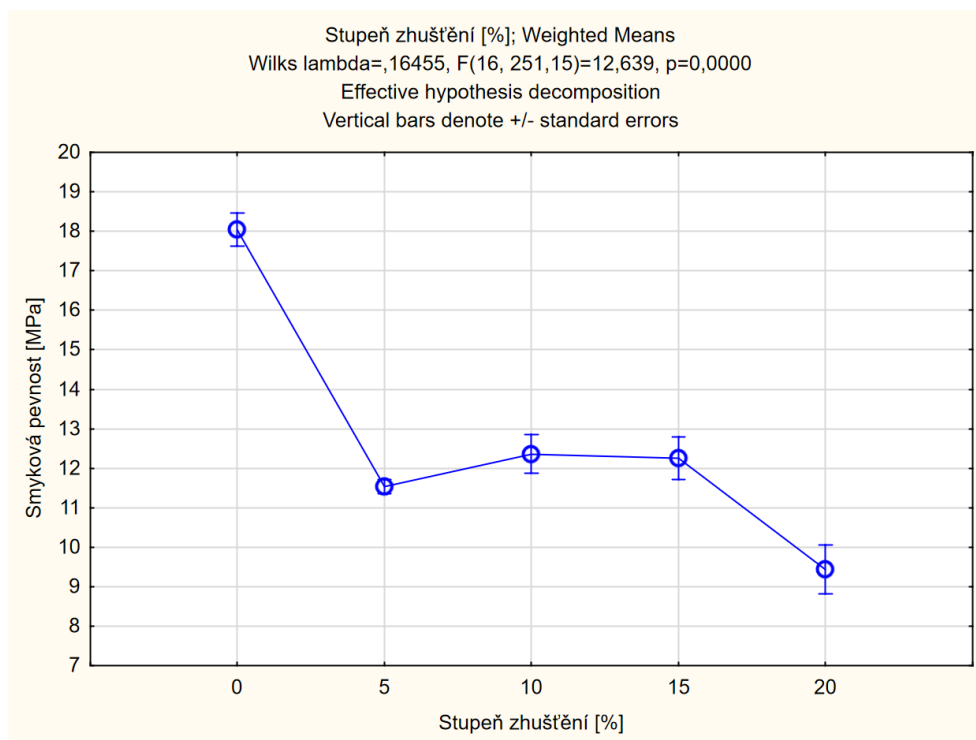


Graf 8: Korelace smykové pevnosti a ukazatele Rsm

Jeho korelační koeficient je pouze -0,082, tudíž lze jakoukoli lineární závislost vyloučit, jak už nasvědčoval předchozí graf.

8.2 Diskuse

Důležitý je ale graf popisující závislost smykové pevnosti na stupni zhuštění, který očekávanou závislost prokazuje. Zhušřované vzorky vykazují nejméně 30 % pokles pevnosti lepené spáry a z vývoje grafu a ve světle ostatních výzkumů lze očekávat pokračující pokles s dalším zvyšováním stupně zhuštění. Takové chování ostatně potvrzují měření provedená při srovnatelných pokusech (Vnučec *et al* 2017).



Graf 9: Závislost smykové pevnosti na stupni zhuštění

Je patrné, že i nejnižší stupeň zhuštění vede v experimentu k významnému poklesu pevnosti lepení:

Tabulka 5: Naměřené hodnoty smykové pevnosti

| Stupeň zhuštění [%] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Smyková pevnost [MPa] | 18.04 | 11.53 | 12.36 | 12.25 | 9.44 |
| Změna | 100 % | 64 % | 69 % | 68 % | 52 % |

Vnučec za pravděpodobnou příčinu uvádí snížené pronikání lepidla do dřeva kvůli nižší permeabilitě materiálu vlivem zmenšených až zaniklých lumenů, a tedy menší objem, ve kterém jsou vytvořeny adhezní vazby. Vliv snížené povrchové drsnosti pak dále přispívá k tomu, že je větší množství lepidla vytlačeno z lepené spáry a výsledný spoj je tak oslaben.

K podobnému závěru dospěl i další experiment, ve kterém byly navíc testovány různé metody zdrsňení povrchu, které vedly ke zvýšení pevnosti. Zde autor připomíná i význam zvětšení spojovaných ploch v důsledku zvýšení povrchových nerovností a zmiňuje i odlišný efekt v případě jarního a letního dřeva, což v jeho případě bylo způsobeno odlišným oddělením a rozdělením buněčných stěn při řezání vzorků kotoučovou pilou (Follrich *et al* 2010).

Meethaworn provedl pokus s lepením zhušťovaného dřeva tropického kaučukovníku a s různými úrovněmi jeho broušení. Při něm dospěl k tomu, že u zhušťovaných vzorků dosáhl broušením zrnitostí 80 až trojnásobného zvýšení pevnosti lepené spáry oproti nebroušenému povrchu, zatímco u nezhušťovaných vzorků se vliv broušení neprojevil. V kombinaci vysoce zhuštěného dřeva (60 % CR) a broušení plochy před lepením dokonce dosáhl 40 % nárůstu pevnosti ve smyku oproti lepenému spoji neupraveného dřeva. Pozitivní efekt přičítá zvýšení smáčivosti povrchu a už dříve zmiňovanému většímu množství lepidla, které může ve spáře po opětovném zdrsňení zůstat i po stlačení v průběhu lepení. Upozorňuje však také na nárůst počtu mikroskopických poruch dřeva (Meethaworn *et al* 2022).

Výsledky v tomto experimentu, stejně jako odpovídající výsledky z obdobných pokusů ve světě tedy ukazují, že lepená spára je u zhušťovaného dřeva významně oslabena a podílí se na tom celá řada vlivů, které mají negativní dopad na elementární principy fungování lepidel, která jsou v dřevařském průmyslu běžně využívána. Všechny ale vyplývají z faktu, že důsledkem lisování dřeva v průběhu procesu zhušťování se mění morfologie povrchu, jak jsme zde dokázali měřením, a že dochází k jeho egalizaci. Je tedy možné do výrobního procesu zařadit kroky, které například broušením po zhuštění do určité míry opět zvýší drsnost povrchu, a zajistit tak obnovu plné účinnosti lepidel.

Je ovšem třeba nepomíjet fakt, že zařazením dalšího kroku do výrobního procesu se zvyšují výrobní náklady a vznikající surovina je tak na trh uváděna se zvýšenou cenou. Podobný postup je tak možné doporučit pouze v případě, kdy úprava dává ekonomický smysl, nebo kdy je takový produkt nezbytný. Přesto je důležité zjištění, že lze využívat výhod, které takto modifikované dřevo nabízí a potlačit negativa, která proces přináší. Toto je ostatně ta samá motivace, která za celým procesem vytváření modifikovaného dřeva stojí od počátku.

9. Závěr

Experimentálně byly potvrzeny výsledky předchozích výzkumů, a to že s rostoucím stupněm zhuštění pevnost lepeného spoje klesá. Jde o důsledek proměny povrchových kvalit vlivem lisování, které byly v rámci experimentu změřeny a popsány pomocí stanovených ukazatelů. Z výsledků můžeme vyvodit, že změna povrchové morfologie má na pevnost lepené spáry negativní vliv, neprokázal se však tento vliv být v přímé spojitosti s vybranými ukazateli kvality povrchu Ra, Rz a Rsm.

Pro navazující výzkum samotného oslabení spoje lze doporučit rozšíření rozsahu směrem k vyšším stupňům zhušťování. Je možné také rozšířit množinu ukazatelů kvality o další, u kterých by se případný vliv mohl projevit a najít korelující, pomocí kterých by bylo možné oslabování alespoň do určité míry predikovat. Pro správné vyhodnocení kvality testovaného lepeného spoje by bylo vhodné podrobit spáru zkoumání pod mikroskopem, které by přesně určilo míru pronikání lepidla do dřeva. V případě větších vzorků by bylo možné i váhově hodnotit množství lepidla, které je u zhuštěného dřeva ze spáry vytlačeno navíc. Touto metodou by se pravděpodobně dalo oslabení spoje kvantifikovat nedestruktivní metodou.

Navazující výzkum potlačení řečeného oslabení by bylo vhodné namířit směrem k tomu, která z běžně rozšířených lepidel mají vůči oslabení vyšší odolnost, což by umožnilo stanovit doporučení pro to, jaké typy lepidel v práci se zhuštěným dřevem upřednostňovat. Také má smysl dále zkoumat, jaký vliv by vnesly do problematiky různé metody zdrsňování povrchu před lepením, či zda nemohou napomoci například chemické úpravy povrchu za účelem zvýšení jeho smáčivosti.

Rozhodně platí, a opět bylo experimentálně potvrzeno, že lepení zhuštěného dřeva běžně užívanými lepidly obnáší pro kvalitu spoje komplikace, které nelze v průmyslu přehlížet a je třeba je brát v potaz při každém návrhu konstrukce nebo technologického postupu, který s denzifikovaným dřevem pracuje. Pokud aplikace vyžaduje plnohodnotný lepený spoj, jako například v případě glulam nosníků nebo pevnostních stavebních překližek, je nutné zařadit do výroby kroky, které zajistí obnovení účinků lepidla. Takovými kroky by mohlo být například opětovné zdrsnění povrchu broušením.

10. Příloha I: Katalog vzorků

Tabulka 6: Katalog vzorků

| % | # | L [mm] | W1 [mm] | W2 [mm] | W3 [mm] | T1 [mm] | T2 [mm] | T3 [mm] | W [mm] | ρ [g/cm ³] |
|-----|----|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|--------------------------------|
| REF | 8 | 110.24 | 20.12 | 20.16 | 19.94 | 5.24 | 5.23 | 5.25 | 8.18 | 0.705 |
| REF | 13 | 110.23 | 19.94 | 19.22 | 19.18 | 5.31 | 5.25 | 5.21 | 8.26 | 0.733 |
| REF | 17 | 110.21 | 19.34 | 19.53 | 19.41 | 5.28 | 5.31 | 5.29 | 8.32 | 0.734 |
| REF | 19 | 110.18 | 19.05 | 19.11 | 19.08 | 5.29 | 5.3 | 5.3 | 8.37 | 0.752 |
| REF | 24 | 110.01 | 20.09 | 19.95 | 19.99 | 5.27 | 5.32 | 5.34 | 8.13 | 0.696 |
| REF | 29 | 110.11 | 18.9 | 18.91 | 18.86 | 5.27 | 5.28 | 5.29 | 8.34 | 0.759 |
| REF | 35 | 110.16 | 19.22 | 19.81 | 19.93 | 5.25 | 5.27 | 5.3 | 8.68 | 0.760 |
| REF | 36 | 110.06 | 20.21 | 20.3 | 20.36 | 5.36 | 5.38 | 5.39 | 9.2 | 0.766 |
| REF | 39 | 110.23 | 20.06 | 20.28 | 20.27 | 5.33 | 5.38 | 5.34 | 8.9 | 0.747 |
| REF | 44 | 110.16 | 19.39 | 19.35 | 19.25 | 5.4 | 5.38 | 5.38 | 8.45 | 0.737 |
| REF | 49 | 110.01 | 20.32 | 20.44 | 20.37 | 5.43 | 5.43 | 5.33 | 8.94 | 0.739 |
| REF | 50 | 110.17 | 20.11 | 20.07 | 20.14 | 5.37 | 5.36 | 5.35 | 8.9 | 0.750 |
| REF | 54 | 110.1 | 20.31 | 20.4 | 20.36 | 5.41 | 5.44 | 5.41 | 8.52 | 0.701 |
| REF | 55 | 110.19 | 20 | 20.11 | 20.2 | 5.28 | 5.37 | 5.29 | 8.69 | 0.738 |
| REF | 63 | 110.3 | 20.12 | 20.1 | 19.99 | 5.38 | 5.45 | 5.44 | 9.04 | 0.753 |
| REF | 64 | 110.25 | 20.24 | 20.21 | 20.24 | 5.35 | 5.37 | 5.4 | 9.05 | 0.755 |
| REF | 75 | 109.94 | 20.12 | 20.22 | 20.25 | 5.37 | 5.4 | 5.4 | 9.09 | 0.760 |
| REF | 76 | 110.35 | 19.76 | 19.97 | 19.8 | 5.33 | 5.31 | 5.23 | 8.62 | 0.744 |
| REF | 79 | 110.2 | 20.29 | 20.28 | 20.2 | 5.21 | 5.31 | 5.35 | 8.85 | 0.749 |
| REF | 80 | 110.3 | 20.25 | 20.26 | 20.27 | 5.37 | 5.4 | 5.42 | 9.1 | 0.755 |
| 5 | 1 | 110.38 | 20.12 | 20.09 | 20.07 | 5.64 | 5.63 | 5.62 | 9.41 | 0.754 |
| 5 | 2 | 110.11 | 20.24 | 20.28 | 20.17 | 5.69 | 5.69 | 5.7 | 9.42 | 0.743 |
| 5 | 4 | 110.13 | 20.08 | 20.01 | 20.17 | 5.6 | 5.65 | 5.63 | 8.56 | 0.688 |
| 5 | 9 | 110.16 | 20.15 | 20.18 | 20.21 | 5.62 | 5.66 | 5.66 | 9.39 | 0.748 |
| 5 | 10 | 110.1 | 20.14 | 20.28 | 20.21 | 5.69 | 5.68 | 5.67 | 9.3 | 0.736 |
| 5 | 11 | 110.22 | 20.18 | 20.09 | 20.01 | 5.68 | 5.66 | 5.66 | 9.2 | 0.733 |
| 5 | 15 | 110.3 | 20.35 | 20.23 | 20.2 | 5.65 | 5.66 | 5.64 | 9 | 0.713 |
| 5 | 17 | 110.27 | 19.87 | 19.74 | 19.81 | 5.64 | 5.68 | 5.67 | 8.81 | 0.712 |
| 5 | 18 | 110.17 | 20.12 | 20.17 | 20.2 | 5.59 | 5.63 | 5.65 | 8.7 | 0.696 |
| 5 | 19 | 110.23 | 20.34 | 20.33 | 20.15 | 5.64 | 5.64 | 5.59 | 9.08 | 0.723 |
| 5 | 21 | 110.27 | 20.18 | 20.1 | 20.08 | 5.33 | 5.35 | 5.34 | 8.35 | 0.705 |
| 5 | 22 | 110.19 | 20.06 | 20.05 | 19.99 | 5.66 | 5.67 | 5.65 | 9.07 | 0.726 |
| 5 | 25 | 110.16 | 20.08 | 19.94 | 20.04 | 5.61 | 5.65 | 5.64 | 9.56 | 0.769 |
| 5 | 26 | 110.11 | 20.19 | 20.2 | 20.2 | 5.58 | 5.59 | 5.62 | 8.55 | 0.687 |
| 5 | 33 | 110.1 | 20.16 | 20.17 | 20.36 | 5.64 | 5.65 | 5.64 | 8.49 | 0.675 |
| 5 | 41 | 110.13 | 20.04 | 20.04 | 20.1 | 5.55 | 5.57 | 5.56 | 9.31 | 0.758 |
| 5 | 43 | 110.15 | 20.22 | 20.19 | 20.16 | 5.63 | 5.66 | 5.67 | 9.24 | 0.735 |
| 5 | 44 | 110.16 | 19.71 | 19.43 | 19.46 | 5.62 | 5.61 | 5.62 | 9.33 | 0.772 |
| 5 | 48 | 110.25 | 20.11 | 20.12 | 20.05 | 5.58 | 5.61 | 5.6 | 9.67 | 0.780 |
| 5 | 49 | 110.11 | 20.06 | 20.15 | 20.12 | 5.58 | 5.59 | 5.59 | 9.9 | 0.800 |
| 10 | 1 | 109.96 | 19.93 | 20.06 | 20.04 | 5.92 | 5.9 | 5.94 | 9.89 | 0.759 |
| 10 | 3 | 110.26 | 20.23 | 20.23 | 20.21 | 5.94 | 5.97 | 5.97 | 9.85 | 0.741 |

| | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 10 | 5 | 110.2 | 20.2 | 20.18 | 20.16 | 5.96 | 5.96 | 5.96 | 9.85 | 0.743 |
| 10 | 7 | 110.53 | 20.14 | 20.14 | 20.18 | 5.92 | 5.94 | 5.94 | 9.93 | 0.751 |
| 10 | 9 | 110.18 | 19.88 | 19.5 | 19.48 | 5.92 | 5.93 | 5.93 | 9.18 | 0.717 |
| 10 | 10 | 110.09 | 19.07 | 19.2 | 19.3 | 5.86 | 5.93 | 5.93 | 8.99 | 0.720 |
| 10 | 11 | 110.55 | 20.19 | 20.19 | 20.2 | 5.83 | 5.88 | 5.88 | 9.82 | 0.750 |
| 10 | 16 | 110.22 | 20.18 | 20.19 | 20.18 | 5.92 | 5.94 | 5.95 | 9.72 | 0.736 |
| 10 | 17 | 110.33 | 20 | 20.11 | 20.21 | 5.91 | 5.93 | 5.95 | 9.83 | 0.747 |
| 10 | 19 | 110.1 | 20.29 | 20.28 | 20.24 | 5.88 | 5.93 | 5.93 | 9.91 | 0.751 |
| 10 | 21 | 110.12 | 20.14 | 20.18 | 20.12 | 5.95 | 5.97 | 5.97 | 9.88 | 0.747 |
| 10 | 22 | 110.16 | 20.3 | 20.26 | 20.23 | 5.91 | 5.92 | 5.94 | 9.9 | 0.749 |
| 10 | 25 | 110.17 | 20.08 | 20.14 | 20.13 | 5.85 | 5.89 | 5.91 | 9.77 | 0.749 |
| 10 | 27 | 109.99 | 20.24 | 20.09 | 20.13 | 5.94 | 5.94 | 5.94 | 9.72 | 0.738 |
| 10 | 30 | 110.11 | 19.69 | 19.77 | 19.88 | 5.9 | 5.93 | 5.93 | 9.39 | 0.728 |
| 10 | 32 | 110.1 | 20.22 | 20.21 | 20.24 | 5.95 | 5.98 | 5.97 | 9.91 | 0.746 |
| 10 | 33 | 110.13 | 20.22 | 20.14 | 20.24 | 5.88 | 5.86 | 5.87 | 9.81 | 0.751 |
| 10 | 38 | 110.22 | 20.05 | 20.15 | 20.13 | 5.87 | 5.93 | 5.95 | 9.6 | 0.732 |
| 10 | 39 | 110.14 | 20.24 | 20.24 | 20.22 | 5.88 | 5.92 | 5.92 | 9.53 | 0.724 |
| 10 | 42 | 110.13 | 20.18 | 20.29 | 20.09 | 5.84 | 5.91 | 5.89 | 9.89 | 0.757 |
| 15 | 1 | 110.14 | 19.4 | 19.64 | 18.93 | 6.18 | 6.17 | 6.15 | 9.97 | 0.760 |
| 15 | 2 | 110.19 | 20.26 | 20.26 | 20.24 | 6.16 | 6.2 | 6.19 | 11.03 | 0.799 |
| 15 | 6 | 110.16 | 20.03 | 19.95 | 19.84 | 6.18 | 6.17 | 6.17 | 10.41 | 0.768 |
| 15 | 7 | 109.96 | 20.23 | 20.23 | 20.19 | 6.15 | 6.15 | 6.17 | 10.59 | 0.774 |
| 15 | 8 | 110.21 | 20.45 | 20.43 | 20.26 | 6.13 | 6.19 | 6.19 | 11.09 | 0.800 |
| 15 | 9 | 110.23 | 20.24 | 20.38 | 20.23 | 6.08 | 6.16 | 6.15 | 10.64 | 0.776 |
| 15 | 10 | 110.11 | 19.66 | 19.65 | 19.56 | 6.15 | 6.16 | 6.19 | 10.62 | 0.797 |
| 15 | 12 | 110.1 | 20.11 | 20.18 | 20.26 | 6.16 | 6.19 | 6.17 | 10.44 | 0.761 |
| 15 | 14 | 110.28 | 20.22 | 20.16 | 20.1 | 6.15 | 6.18 | 6.15 | 10.51 | 0.767 |
| 15 | 17 | 110.09 | 20.1 | 19.7 | 19.8 | 6.11 | 6.13 | 6.1 | 10.88 | 0.814 |
| 15 | 18 | 110.12 | 19.42 | 19.61 | 19.8 | 6.07 | 6.16 | 6.15 | 10.72 | 0.810 |
| 15 | 22 | 110.33 | 20.27 | 20.3 | 20.27 | 6.11 | 6.17 | 6.17 | 11.12 | 0.808 |
| 15 | 23 | 110.18 | 20.17 | 20.21 | 20.2 | 6.16 | 6.18 | 6.15 | 10.76 | 0.785 |
| 15 | 24 | 110.71 | 20.08 | 20.01 | 19.75 | 6.09 | 6.12 | 6.12 | 10.71 | 0.794 |
| 15 | 26 | 110.16 | 19.6 | 19.64 | 19.53 | 6.17 | 6.19 | 6.19 | 10.83 | 0.812 |
| 15 | 27 | 109.9 | 18.49 | 18.63 | 19.04 | 6.03 | 5.96 | 6.12 | 10.04 | 0.808 |
| 15 | 30 | 110.15 | 19.87 | 20.02 | 20.02 | 6.15 | 6.16 | 6.17 | 10.75 | 0.793 |
| 15 | 31 | 110.22 | 20.18 | 20.27 | 20.24 | 6.11 | 6.16 | 6.1 | 11.06 | 0.810 |
| 15 | 32 | 110.3 | 20.17 | 20.11 | 20.15 | 6.1 | 6.16 | 6.15 | 10.67 | 0.783 |
| 15 | 33 | 110.11 | 20.29 | 20.23 | 20.26 | 6.01 | 6.13 | 6.15 | 10.89 | 0.801 |
| 20 | 3 | 110.09 | 20.21 | 20.28 | 20.18 | 6.35 | 6.43 | 6.43 | 10.02 | 0.703 |
| 20 | 8 | 110.13 | 20.21 | 20.16 | 20.22 | 6.41 | 6.43 | 6.42 | 10.03 | 0.702 |
| 20 | 17 | 110.13 | 20.17 | 20.23 | 20.13 | 6.32 | 6.39 | 6.41 | 10.13 | 0.715 |
| 20 | 21 | 110.16 | 20.08 | 20.11 | 20.14 | 6.37 | 6.39 | 6.38 | 9.9 | 0.700 |
| 20 | 22 | 110.21 | 20.27 | 20.3 | 20.31 | 6.36 | 6.44 | 6.44 | 11.22 | 0.782 |
| 20 | 27 | 110.17 | 20.24 | 20.28 | 20.16 | 6.37 | 6.33 | 6.39 | 10.77 | 0.760 |
| 20 | 28 | 110.13 | 20.12 | 20.25 | 20.3 | 6.39 | 6.4 | 6.23 | 10.58 | 0.749 |
| 20 | 31 | 110.31 | 20.15 | 20.14 | 20.17 | 6.33 | 6.43 | 6.4 | 10.87 | 0.766 |
| 20 | 32 | 110.11 | 20.16 | 20.14 | 20.17 | 6.39 | 6.4 | 6.38 | 10.87 | 0.766 |

| | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 20 | 33 | 110.22 | 20.16 | 20.22 | 20.17 | 6.39 | 6.4 | 6.43 | 11.26 | 0.790 |
| 20 | 36 | 110.21 | 20.23 | 20.23 | 20.26 | 6.4 | 6.41 | 6.41 | 11.32 | 0.792 |
| 20 | 37 | 110.17 | 20.21 | 20.18 | 20.19 | 6.44 | 6.44 | 6.44 | 11.04 | 0.771 |
| 20 | 38 | 110.29 | 20.14 | 20.18 | 20.13 | 6.38 | 6.46 | 6.44 | 11.02 | 0.772 |
| 20 | 39 | 110.12 | 20.19 | 20.16 | 20.12 | 6.37 | 6.41 | 6.4 | 10.15 | 0.715 |
| 20 | 43 | 110.22 | 20.11 | 20.12 | 20.22 | 6.46 | 6.46 | 6.46 | 11.09 | 0.773 |
| 20 | 44 | 110.2 | 20.3 | 20.27 | 20.24 | 6.43 | 6.43 | 6.43 | 11.02 | 0.767 |
| 20 | 46 | 110.1 | 20.29 | 20.28 | 20.28 | 6.41 | 6.39 | 6.38 | 10.22 | 0.716 |
| 20 | 47 | 110.54 | 20.36 | 20.28 | 20.32 | 6.41 | 6.36 | 6.41 | 11.01 | 0.767 |
| 20 | 48 | 110.2 | 20.08 | 20 | 20.08 | 6.4 | 6.45 | 6.46 | 11.04 | 0.776 |
| 20 | 14 | 110.2 | 20.21 | 20.26 | 20.25 | 6.38 | 6.38 | 6.35 | 9.81 | 0.690 |

11. Seznam použitých zdrojů

1. Požgaj A., Chovanec D., Kurjatko S., Babiak M.: Štruktúra a vlastnosti dreva. Príroda, Bratislava 1997.
2. Šlezingerová J., Gandelová L.: Stavba dřeva. Vysoká škola zemědělská v Brně, 1994.
3. Kutnar A., Šernek M.: Zbornik gozdarstva in lesarstva 82, 2007.
4. Krebs J. : Teorie zpracování nekovových materiálů, VŠST Liberec, 1991.
5. Gašparík M., Gaff M., Ruman M., Záborský V., Kašičková V., Sikora A., Štícha V. (2017). Shear Bond Strength of HW, *BioResources* 12(1), 495-513
6. Kılıç, M. (2016). "Effect on shear strength of machining methods in *Pinus nigra* Arnold bonded with polyurethane and polyvinyl acetate adhesives," *BioRes.*11(3), 6663-6676
7. Bekhta, P., Proszkyk, S., Krystofiak, T., Sedliacik, J., Novak, I., a Mamonova, M. (2017). Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers, *Wood Material Science and Engineering*, 12 (1), 40-54. DOI: 10.1080/17480272.2015.1009488
8. Kariz, M., Kuzman, M. K., Sernek, M., Hughes, M., Rautkarim L., Kamke, F. A. a Kutnar, A. (2017). Influence of temperature of thermal treatment on surface densification of spruce, *European Journal of Wood and Wood Products*, 75 (1), 113-123. DOI: 10.1007/s00107-016-1052-z
9. Laine, K., Serholm, K., Wålinder, M., Rautkari, L., a Hughes, M. (2016). Wood densification and thermal modification: Hardness, set-recovery and micromorphology, *Wood Science and Technology*, 50 (5), 883-894. DOI: 10.1007/s00226-016-0835-z
10. Ülker, O., Imirzi, O., a Burdurlu, E. (2012). The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of Scot pine (*Pinus Sylvestris* L.), *Bioresources*, 7 (4), 5581-5592.
11. ČSN EN 205 Lepidla na dřevo pro nekonstrukční aplikace — Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných spojů, třídicí znak 668508, katalogové číslo 501151, datum vydání 01.02.2017
12. Vnučec, D., Žigon, J., Mikuljan, M. (2017). Bonding of densified beech wood using adhesives based on thermally modified soy proteins. *Eur. J. Wood Prod.* 75, 767–776. DOI: 10.1007/s00107-017-1164-0
13. Ülker O. (2016), *Wood Adhesives and Bonding Theory*, DOI: 10.5772/65759

14. Sadatnezhad, S. H., Khazaeian, A., Sandberg, D., & Tabarsa, T. (2017). Continuous surface densification of wood: A new concept for large-scale industrial processing. *BioResources*, 12(2),3122–3132. DOI: 10.15376/biores.12.2.3122-3132
15. Yu, Y., Li, A., Yan, K. et al. High-pressure densification and hydrophobic coating for enhancing the mechanical properties and dimensional stability of soft poplar wood boards. *J Wood Sci* 66, 45 (2020). DOI: 10.1186/s10086-020-01892-1
16. Král P., Klímek P., Děcký D. (2015). Comparison of the bond strength of oak (*Quercus L.*) and beech (*Fagus sylvatica L.*) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures, *JOURNAL OF FOREST SCIENCE*, 61, 2015 (5): 189–192. DOI: 10.17221/95/2014-JFS
17. Sandberg D., Kitek Kuzman M., Gaff M. (2018), *Engineered Wood Products | Wood as an engineering and architectural material*, Czech University of Life Sciences Prague, ISBN 978-80-213-2869-3
18. Follrich J., Vay O., Veigel S., Müller U. (2010), Bond strength of end-grain joints and its dependence on surface roughness and adhesive spread, DOI: 10.1007/s10086-010-1118-1
19. Reinprecht L., Pánek M., (2016), *Trvanlivost a ochrana dřeva*, Česká zemědělská univerzita v Praze, ISBN 978-80-213-2660-6
20. Navi, P. and Girardet, F. (2000) Effects of thermo-hydromechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*, 54(3), 287–293.
21. Skyba, O., Schwarze, F.W., & Niemz, P. (2009). Physical and mechanical properties of thermo-hygro-mechanically (THM) - densified wood. *Wood Research*, 54, 1-18.
22. Meethaworn B., Srivaro S., Khongtong S. High-Performance Adhesive Joint Made from Densified Wood. *Polymers* 2022, 14, 515, DOI: 10.3390/polym14030515
23. *Manufactured Wood Materials Global Market Report 2022 — Market Size, Trends, And Global Forecast 2022-2026*, dostupné 1.4.2022 online z: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/manufactured-wood-materials-global-market-report>
24. *Densified Hardwood Plywood Manufacturer — RHINO DensiPLY* dostupné 7.4.2022 online z: <http://densiply.com/>
25. *Electromechanical Industry — RANCAN SRL* dostupné 7.4.2022 online z: http://www.rancan.com/rancan/eng/industria_elettromeccanica.html