

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta lesnická a dřevařská**

**Diplomová práce**

**2022**

**Bc. Richard Zawada**

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Účinek vybraných parametrů řezání laserem na hodnoty  
smykové pevnosti lepených spojů**

Diplomová práce

Autor: Bc. Richard Zawada

Vedoucí diplomové práce Ing. Adam Sikora, Ph.D

2022

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Richard Zawada

Dřevařské inženýrství

Název práce

Účinek vybraných parametrů řezání laserem na hodnoty smykové pevnosti lepených spojů

Název anglicky

The effect of selected laser cutting parameters on the tensile shear values of glued joints

### Cíle práce

Cílem práce je zjistit účinek vybraných parametrů řezání laserem a jejich interakce na hodnoty smykové pevnosti lepených spojů bukového dřeva. Práce je zaměřena na parametry:

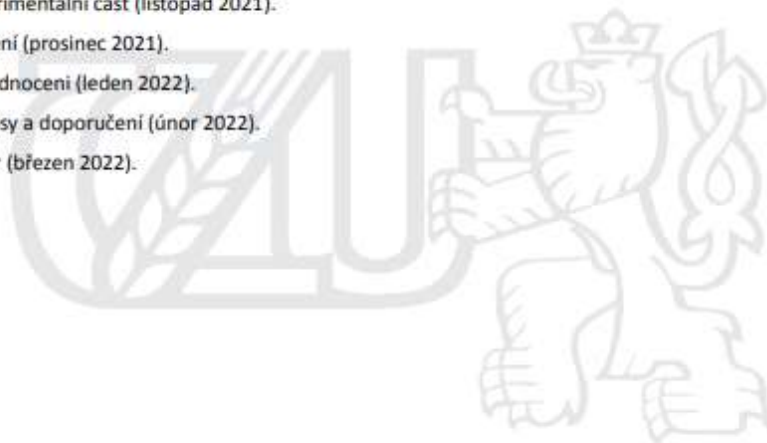
1. Vlhkost dřeva – výsledky naměřené na tělesech o vlhkosti „0 %“, budou porovnány s výsledky naměřenými na zkušebních tělesech o vlhkosti 8 %, 16 % a mokřých, teda o vlhkosti nad bodem nasycení buněčných stěn.
2. Rychlost řezání – v práci budou sledovány rozdílné rychlosti řezání (3,5 m/min-1, 3 m/min-1, 1 m/min-1 a další)
3. Použitá energie laseru při řezání – výsledky naměřené na tělesech řezaných s energií 3200 W, budou porovnány s výsledky naměřenými na zkušebních tělesech řezaných s energií 1250 W, 1000 W, případně jiných.
4. Tlak plynu použitý při řezání – v práci budou sledované rozdílné parametry tlaku plynu použitého při řezání (bar).
5. V závěru budou hodnoceny také interakce uvedených parametrů na hodnoty smykové pevnosti lepených spojů.

### Metodika

1. Literární rozbor problematiky řezání dřeva laserem a lepení dřeva.
2. Navržení metodiky tvorby zkušebních těles a jejich testování.
3. Experimentální zjištění vlivu interakce laserového paprsku a buku na hodnoty smykové pevnosti lepených spojů.
4. Statistické vyhodnocení.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuze, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. Úvod (říjen 2021).
2. Analýza problematiky (listopad 2021).
3. Experimentální část (listopad 2021).
4. Měření (prosinec 2021).
5. Vyhodnocení (leden 2022).
6. Přínosy a doporučení (únor 2022).
7. Závěr (březen 2022).



**Doporučený rozsah práce**

80 stran

**Klíčová slova**

řezání, laser, smyková pevnost, lepený spoj

---

**Doporučené zdroje informací**

- Barcikowski, S., Koch, G., and Odermatt, J. (2006). "Characterization and modification of the heat affected zone during laser material processing of wood and wood composites," *Holz als Roh – und Werkstoff* 2006;64(2), pp. 94–103. DOI: 10.1007/s00107-005-0028-1
- Barnekov, V.G., McMillin, C.V., and Huber, H.A. (1986). "Factors influencing laser cutting of wood," *Forest Products Journal* 36(1), pp. 55–58
- EEN 205 (2003). Adhesive for load-bearing timber structures – Test methods – Part 1: determination of longitudinal tensile shear strength
- ISO 13061-1 (2014). Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests.
- Martínez-Conde, A., Krenke, T., Frybort, S., and Muller, U. (2017). "Review: Comparative analysis of CO2 laser and conventional sawing for cutting of lumber and wood-based materials," *Wood Sci. Technol* 51(2), pp. 943–966. DOI: 10.1007/s00226-017-0914-9
- Pires, M.C., Araujo, J.L., Teixeira, M.R., and Rodrigues, F.C. (1989). "Plywood inlays through CO2 laser cutting," *CO2 laser and applications, SPIE Proceedings* 1042, pp. 97–102. DOI: 10.1117/12.951268
- Pocorni, J., Powell, J., Ilar, T., Schwarz, A., Kaplan, A.F.H. (2013). "Measuring the state-of-the-art in laser cut quality," 14th Nordic Laser Materials Processing (NOLAMP) Conference held at Gothenburg, Sweden.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 23. 9. 2021

**doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

**prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2022

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Účinek vybraných parametrů řezání laserem na hodnoty smykové pevnosti lepených spojů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adam Sikora, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

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

### **Poděkování:**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Adamu Sikorovi Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost při konzultacích, podnětné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za trpělivost a velikou podporu. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým přátelům za podporu, trpělivost a ochotu během korektury mé diplomové práce.

## **Abstrakt**

Hospodárné nakládání s dřevní surovinou je velice aktuální téma. Obrábění laserovým paprskem může velice kladně ovlivnit výtěž a může řezat dřevo i do složitějších tvarů, než umožňují konvenční metody jako je například řezání kotoučovou pilou. Jelikož je lepení jednou z nejčastějších operací v nábytkářském průmyslu, pojednává tato diplomová práce o analýze specifického nastavení laserového paprsku CO<sub>2</sub> laseru při řezání masivního dřeva, které je následně slepeno a podrobí se zkoušce pevnosti ve smyku podle normy ČSN EN 205. Vstupním materiálem bylo zvoleno bukové dřevo, jako jedno z nejpoužívanějších listnatých dřev v České republice. Z různých druhů lepidel bylo vybráno PVAc lepidlo, které je jedno z nejpoužívanějších lepidel v nábytkářském průmyslu, a to díky svojí jednoduché aplikovatelnosti a příznivé ceně. Jako výchozí parametry vzorků pro obrábění laserovým paprskem byly zvoleny vlhkosti dřeva od 0 % až po bod nasycení dřevních vláken, různé výkony laseru, řezná rychlost 3 a 3,5 m/s a tlak plynu při řezání. Tyto parametry byly vybrány pro zjištění optimálních parametrů pro řezání bukového dřeva. Výsledkem práce je stanovení optimálních parametrů pro obrábění bukového dřeva ve vztahu k smykové pevnosti takto obrobených ploch. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejlepší výsledků dosahují vzorky o vlhkosti 8 %, které byly obráběny laserovým paprskem rychlostí 3,5 m/s.

## **Klíčová slova**

Řezání, laser, smyková pevnost, lepený spoj



### **Abstrakt v cizím jazyce**

The economical use of wood raw material is a very topical issue. Laser beam machining can have a very positive effect on yield and can cut timber into more complex shapes than conventional methods such as circular sawing. As gluing is one of the most common procedures in the furniture industry, this thesis deals with the analysis of a specific CO<sub>2</sub> laser beam setting when cutting solid wood which is subsequently glued and subjected to a shear strength test according to ČSN EN 205. Beech wood was chosen as the input material, as it is one of the most commonly used hardwoods in the Czech Republic. PVAc glue was chosen as the adhesive, as it is one of the most used adhesives in the furniture industry due to its easy applicability and favourable price. Wood moisture content from 0% up to the saturation point of the wood fibres, different laser powers, cutting speeds of 3 and 3.5 m/s and gas pressure during cutting were chosen as the initial parameters of the samples for laser beam machining. These parameters were selected to find the optimal parameters for cutting beech wood. The result of the work is the establishment of optimal parameters for machining beech wood in relation to the shear strength of the surfaces so machined. The measured values show that the best results are obtained for samples with a moisture content of 8%, which were machined with a laser beam at a speed of 3.5 m/s.

### **Key words**

Cutting, laser, shear strength, glued joint

---

## Obsah

<b>Obsah .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>12</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>13</b>
<b>Cíle práce .....</b>	<b>14</b>
<b>1 Nekonvenční obrábění dřeva .....</b>	<b>15</b>
1.1 Laserový paprsek .....	15
1.2 Historie laserového paprsku .....	17
1.3 Rozdělení laserů .....	18
1.4 Části laseru a jeho princip .....	20
1.5 Řezání laserem .....	21
1.6 Způsoby řezání laserem .....	23
1.7 Vlastnosti řezné spáry .....	23
<b>2 Dřevo a jeho vlastnosti ovlivňující obrobiteľnosť .....</b>	<b>25</b>
2.1 Chemická strukturální hladina dřeva .....	25
2.2 Fáze působení tepla na dřevo .....	28
2.3 Mikroskopická strukturální hladina dřeva .....	29
2.4 Makroskopická strukturální hladina dřeva .....	33
2.5 Vlastnosti dřeva ovlivňující řezání dřeva laserem .....	34
<b>3 Lepidla .....</b>	<b>35</b>
3.1 Teorie lepení .....	36
3.2 Historie lepidel .....	39
3.3 Výhody a nevýhody spojování lepením .....	39
3.4 Rozdělení lepidel .....	40
3.5 Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje .....	42
3.6 Příprava lepené plochy .....	44
3.7 Typy lomu lepených spojů .....	45
<b>4 Metodika .....</b>	<b>46</b>
4.1 Příprava zkušebních vzorků .....	46
4.2 Řezání a lepení zkušebních vzorků .....	46
4.3 Zkouška pevnosti lepeného spoje .....	48
4.4 Vyhodnocení zkoušky .....	48

---

<b>5</b>	<b>Výsledky a diskuse .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>67</b>

---

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Vyobrazení prvního laseru ( <a href="http://www.lt.cz">www.lt.cz</a> ) .....	17
Obrázek 2 Schéma částí laseru (Kořán, 2021).....	21
Obrázek 3 Schéma zařízení pro řezání laserem ( <a href="http://www.mmspektrum.com">www.mmspektrum.com</a> ).....	22
Obrázek 4 Ovlivnitelné nastavení laserového paprsku ( <a href="http://lao.cz">lao.cz</a> ).....	24
Obrázek 5 Zastoupení hlavních složek v jehličnatých a listnatých dřevinách (Požgaj, 1993) .....	26
Obrázek 6 Chemický vzorec celulózy ( <a href="http://eluc.kr-olomoucky.cz">eluc.kr-olomoucky.cz</a> ).....	27
Obrázek 7 Schématické znázornění ligninu, celulózy a hemicelulózy ( <a href="http://eluc.kr-olomoucky.cz">eluc.kr-olomoucky.cz</a> ).....	28
Obrázek 8 Degradace dřevních složek podle velikosti tepla (Sandberg, 2011) .....	29
Obrázek 9 Stavba jehličnatého dřeva (Požgaj, 1993) .....	31
Obrázek 10 Stavba listnatého dřeva ( <a href="http://adoc.pub">adoc.pub</a> ) .....	32
Obrázek 11 Znázornění základních řezů kmene (Balabán, 1955) .....	33
Obrázek 12 Vznik pevného zámku mechanickou teorií ( <a href="http://users.fs.cvut.cz">users.fs.cvut.cz</a> ) .....	36
Obrázek 13 Vznik chemické vazby mezi lepenými povrchy ( <a href="http://users.fs.cvut.cz">users.fs.cvut.cz</a> ) .....	37
Obrázek 14 Rozložení vrstev lepeného spoje v řezu ( <a href="http://slidetodoc.com">slidetodoc.com</a> ) .....	37
Obrázek 15 Posouzení stavu lepidla k lepenému materiálu (Osten, 1986) .....	38
Obrázek 16 Smáčivost povrchu ( <a href="http://users.fs.cvut.cz">users.fs.cvut.cz</a> ) .....	38
Obrázek 17 PVAc lepidlo Hranicoll D4 ( <a href="http://www.miniprof-stroje.cz">www.miniprof-stroje.cz</a> ).....	41
Obrázek 18 Úhel smáčení povrchu ( <a href="http://nanoed.tul.cz">nanoed.tul.cz</a> ).....	44
Obrázek 19 Lomy lepeného spoje (Doubek, 2014) .....	45
Obrázek 20 Rozměry zkušebního vzorku pro měření smykové pevnosti. (Gaff, 2020) .....	47
Obrázek 21 Příklad válcové nanášedky ( <a href="http://www.simek.eu">www.simek.eu</a> ).....	47
Obrázek 22 Ilustrační fotka INSTRON 5882 ( <a href="http://is.cuni.cz">is.cuni.cz</a> ) .....	48
Obrázek 23 Vliv vlhkosti na modul pružnosti lepeného spoje .....	50
Obrázek 24 Vliv vlhkosti při řezání na smykovou pevnost lepeného spoje .....	52
Obrázek 25 Vliv vlhkosti obráběných vzorků na protažení lepeného spoje bez statistické významnosti .....	53
Obrázek 26 Zuhelnatělá vrstva bránící impregnaci lepidla (Gaff a kol. 2020) .....	54
Obrázek 27 Vliv rychlosti řezání na modul pružnosti lepeného spoje .....	54
Obrázek 28 Vliv rychlosti řezání na maximální protažení lepeného spoje .....	55
Obrázek 29 Vliv rychlosti řezání na velikost smykové pevnosti lepeného spoje.....	56
Obrázek 30 Vliv vlhkosti na sílu potřebnou k porušení lepeného spoje .....	57
Obrázek 31 Vliv vlhkosti a rychlosti řezání na modul pružnosti lepeného spoje.....	58

---

Obrázek 32 Porovnání síly k porušení lepeného spoje v závislosti na vlhkosti a rychlosti obrábění laserovým paprskem .....	60
Obrázek 33 Vliv rychlosti řezání a vlhkosti na maximální protažení lepeného spoje....	61
Obrázek 34 Vliv vlhkosti a rychlosti řezání na smykovou pevnost lepeného spoje.....	63

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Duncanův test vlhkosti vzorků k modulu pružnosti .....	49
Tabulka 2 Duncanův test vlivu vlhkosti na napětí.....	51
Tabulka 3 Porovnání potřebného napětí na porušení lepeného spoje (Gaff a kol, 2020) .....	52
Tabulka 4 Duncanův test vliv vlhkosti lepených vzorků na vzdálenost protažení .....	53
Tabulka 9 Duncanův test vlivu vlhkosti na sílu potřebnou k porušení lepeného spoje..	57
Tabulka 10 Duncanův test pro vliv rychlosti obrábění a vlhkosti na modul pružnosti ..	59
Tabulka 11 Duncanův test vliv vlhkosti a rychlosti řezání na sílu .....	61
Tabulka 12 Duncanův test vliv vlhkosti a rychlosti řezání na maximální protažení lepeného spoje.....	62
Tabulka 13 Duncanův test vliv vlhkosti a rychlosti řezání na smykovou pevnost lepeného spoje.....	63

---

## Úvod

Lidstvo se nachází na prahu čtvrté průmyslové revoluce a dřevo v ní má rozhodně své místo. Nejen masivní a různě modifikované materiály z masivního dřeva, ale i materiály na bázi dřeva. Pro své vlastnosti bude možné tyto materiály využívat v podstatě v jakémkoliv průmyslovém odvětví, záleží jen na správné úpravě. Se stupňujícím se apelem na životní prostředí jsou dřevěné materiály a materiály na bázi dřeva využívány čím dál tím více. Dřevo je taktéž známé svou dobrou obrobiteľností, což napomáhá jeho hojnému využívání.

Zde přichází na řadu zpracování dřeva laserovým paprskem a technologie skenování dřeva a následné získání co nejvyšší možné výtěžky při co nejnižší jednotce času. Technologie řezání laserovým paprskem je jedním z nekonvenčních způsobů obrábění dřeva. Vyniká zejména díky své rychlosti, malé řezné spáře, malému vznikajícímu odpadu a možnosti řezat ve všech směrech a úhlech. Výhodou je také fakt, že se jedná o beztržkové obrábění. V tom případě není potřeba vytvářet velké a drahé způsoby odvádění třísek a pilin což značně ušetří náklady na výrobu.

Technologie řezání a zpracování dřeva laserovým paprskem má ale i své nevýhody. Jako jednu z hlavních nevýhod můžeme brát vysokou energetickou náročnost, která je zejména v dnešní době klíčová. Mezi hlavní nevýhody patří také nekvalitní řezání větších tloušťek materiálů. Při řezání velkých tloušťek materiálu dochází k zahýbání paprsku a tedy znehodnocení řezu. Jednou z nevýhod může být také opalování plochy řezu. Tato skutečnost může zkomplikovat následné zpracování, jako je například lepení nebo nanášení povrchové úpravy. Proto je nutné po obrobení dřevěného materiálu laserovým paprskem odstranit tvarové nerovnosti, které způsobuje zahýbání laserového paprsku a s tím odstranit i již zmiňovanou zuhlenatěnou vrstvu.

Právě tyto výhody a komplikace byly důvodem, proč jsem se rozhodl, že bych se v této diplomové práci rád zaměřil na zpracování dřeva laserem. Prozkoumat vliv specifického nastavení laseru na smykovou pevnost lepeného spoje jsem vybral z důvodu oblíbenosti technologické operace lepení v dřevozpracujícím průmyslu. Domnívám se, že díky většímu využití obrábění laserovým paprskem by mohlo v budoucnu dojít k výraznému zefektivnění výroby nejen z hlediska potřebného času na výrobu, ale i z hlediska úspory materiálu. Snaha o úsporu co největšího množství materiálu je zrovna v dnešní době, kdy materiál zdražuje skokově, velice aktuální.

---

## Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je zanalyzovat vliv konkrétního nastavení CO<sub>2</sub> laseru na obrábění bukového dřeva. Optimalizace bylo dosaženo podle faktorů na základě zkoušky smykové pevnosti lepeného spoje. Hlavními sledovanými parametry je vlhkost při řezání vzorků 0 %, 8 %, 16 % a vlhkosti rovnající se bodu nasycení dřevních vláken. Dalším faktorem byla rychlostí řezání 3; 3,5; 1 m/s. Dalším parametrem je výkon laserového paprsku 3200 W, 1250 W a 1000 W. Dále také rozdílné parametry tlaku plynu při řezání. Výsledkem práce je optimalizace řezání dřeva laserem vzhledem k smykové pevnosti lepeného spoje takto obrobeného dřeva.

---

# 1 Nekonvenční obrábění dřeva

Jedná se o metody obrábění dřeva, kdy místo využití mechanické práce při odebrání materiálu využíváme fyzikálních, anebo chemicko-fyzikálních metod. Probíhají vesměs bezsilovým působením na obráběný materiál. Při využití těchto způsobů obrábění nedochází ke vzniku třísek a díky tomu můžeme tyto metody považovat za beztřískové a tedy za čistší a efektivnější proces obrábění materiálu. Nevýhodou je značná nerozšířenost, energetická a finanční náročnost, která vede k velmi omezenému použití těchto technologií v průmyslu (Mádl, 2007).

Nekonvenční metody obrábění používáme zejména v situacích, kdy klasické metody jsou buď nevhodné, příliš složité nebo nemožné. Nekonvenční metody můžeme rozdělovat podle úběru materiálu na tři základní způsoby podle toho jak ubírají materiál (Barčík a kol., 2013):

- A. Metody, které využívají elektro-tepelné principy:
  - Elektroerozivní obrábění,
  - Obrábění paprsky koncentrované energie: obrábění elektronovým, laserovým, plazmovým a iontovým paprskem.
- B. Metody, které využívají elektro-chemické principy:
  - Elektrochemické obrábění.
- C. Metody, které využívají chemické principy:
  - Chemické obrábění.
- D. Metody, které využívají mechanické principy obrábění:
  - Abrazivní obrábění: ultrazvukem, proudem brusiva, vysokotlakým kapalinovým paprskem.

## 1.1 Laserový paprsek

Přístroje na bázi laseru patří mezi nejvíce rozšířené nekonvenční technologie obrábění dřeva. Při použití této technologie obrábění dochází k odebrání materiálu účinkem úzkého silného paprsku monochromatického světla, které se soustředí na malou plošku (Janičková, 2012).

Původně mělo být laserové obrábění použito při obrábění oceli a k úspoře času. V průmyslových odvětvích jsou lasery používány již poměrně dlouho. Ve světě se tedy nachází poměrně mnoho různých variant laserů, které se liší svými vlastnostmi, použitými materiály a používající různých chemických složek. Lasery s aktivním



---

prostředím tvořeným CO<sub>2</sub> jsou hojně využívány k obrábění dřeva, zejména díky nízkým provozním nákladům (Kvietková, 2015).

### **Princip laserového paprsku**

Obor zabývající se výzkumem laserů a aspekty jejich využití se nazývá kvantová elektronika. Paprskem laseru je optické vlnění, které patří do skupiny elektromagnetického záření. Od jiných zdrojů záření se liší zejména svou frekvencí a vlnovou délkou. Z elektronů, atomů a iontů se skládá kvantová soustava, která může být v excitovaném nebo základním stavu. Snahou každého prostředí je být v základním stavu, tedy ve stavu, který má co nejméně energie. Toto způsobuje termodynamickou rovnováhu. Kvantová soustava se dostane do excitovaného stavu, jen pokud absorbuje energii, která přechází mezi energetickou hladinou  $E_0$  a energetickou hladinou  $E_1$ . Pakliže se foton při srážce s kvantovou soustavou nachází v energii totožné s excitační energií. Jedná se o pohlcení fotonu. Pro excitaci kvantové soustavy používáme energii fotonu. V excitovaném stavu je kvantová soustava nestabilní a snaží se tedy získat stav, kdy má co nejméně energie. Změnu stavu těchto energetických hladin provází uvolněná energie, velikost jejich rozdílu. Tuto změnu můžeme vyjadřovat v dávkách nebo kvantech (Svelto, 1998).

### **Spontánní Emise**

Samovolná neboli spontánní emise vzniká při přechodu z vyššího energetického stavu do stavu s nižší energií. To způsobí jev kdy atomy vyzáří fotony. Tyto atomy ovšem vyzáří nekoordinovaně a proto mají fotony různou orientaci a fázi. Takto vznikající elektromagnetické záření je tedy nekoherentní. Toto záření vyzáří například slunce a žárovka (Janíčková, 2012).

### **Stimulovaná emise**

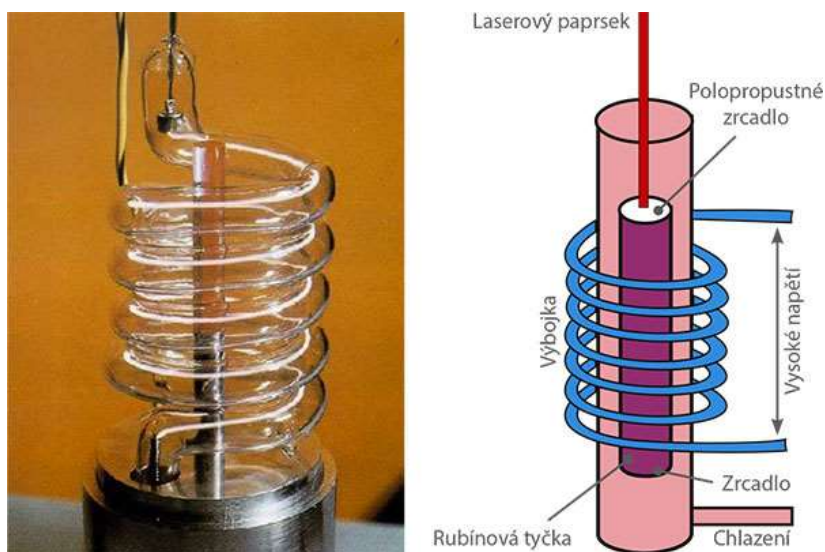
Poprvé stimulovanou emisí objevil Albert Einstein. Na atom, který je ve vyšším energetickém stavu dopadne foton, který donutí tento atom k přechodu do nižšího energetického stavu. Tento jev má za následek vyzáření dalšího fotonu. Tyto dva fotony se dále pohybují stejným směrem jako foton, který emisí vyvolal, jelikož při tomto jevu první foton nepohlí. Takto pohybující se fotony mají stejnou frekvenci i fázi a jsou synchronizované. Toto záření se postupně zesiluje, je koherentní a proces se neustále opakuje s dalšími atomy (Lapšanská, 2010).

---

## 1.2 Historie laserového paprsku

Již v roce 1917 Albert Einstein popsal princip laseru. Předchůdcem bylo zařízení nazývané Maser, které pracuje na stejném principu jako laser, ale oproti laseru generuje mikrovlnné záření. V roce 1960 Theodore H. Maiman v USA sestavil funkční laser. Využíval tři energetické hladiny, fungoval pouze v pulzním režimu a jako aktivní prostředí použil krystal rubínu (Sandílek, 2016).

V průmyslu se začaly lasery využívat od roku 1965, kdy firma Western Electric Company využila laserový systém pro obrábění diamantových raznic. Ve Velké Británii, o dva roky později, vyvinuli laserový systém pro řezání plošných ocelových výrobků s využitím kyslíku jako asistenčního plynu (Kvietková, 2015).



**Obrázek 1** Vyobrazení prvního laseru ([www.lt.cz](http://www.lt.cz))

V 70. letech bylo dosaženo významnějších pokroků a to vzhledem k rozmachu používání CO<sub>2</sub> laserů v průmyslu. Se zdroji byly souběžně vyvíjeny i pohony a lepší řídicí systémy. Uvedení tzv. neprůtočného difusně chlazeného žlab laseru bylo důležitým milníkem. Jelikož takovýto typ laseru ke svému fungování nepotřebuje externí zdroj asistenčních plynů, snižují se tedy významně náklady na jeho provoz a usnadňuje se obsluha (Kvietková, 2015).

Díky zvyšujícímu se výkonu laserů došlo k usnadnění řezacího procesu na konci minulého století. Lineární motory s možností naprogramování pohybů v osách x, y a z, se začaly prosazovat v konstrukcích laseru. Tyto technologie jsou dnes již neoddelitelnou součástí dřevobráběcího, ale i strojního průmyslu (Sandílek, 2016).

---

V současnosti se laserové obrábění používá pro gravírování, povrchové úpravy, povlakování, metody tvorby modelů, svařování, řezání, vrtání, tepelné zpracování, značení a jiné (Kvietková, 2015).

### **1.3 Rozdělení laserů**

Lasery sice pracují na stejném základě, ale významně se liší jak svou konstrukcí, tak vlastnostmi.

Můžeme je rozdělovat podle:

- skupenství aktivního prostředí,
- vlnové délky,
- excitace (buzení, „pumpování“),
- počtu energetický hladin,
- režimu práce (Kusala, 2004).

#### **Rozdělení laserů podle vlnové délky**

Lasery dělíme i podle toho, jakou vlnovou délku jsou schopné generovat. A to na:

- infračervené lasery,
- lasery viditelného pásma,
- rentgenové lasery,
- ultrafialové lasery,
- lasery, které využívají Y-záření (Sochor, 1990).

#### **Rozdělení podle skupenství aktivního prostředí**

Lasery podle skupenství aktivního prostředí dělíme na pevnolátkové, kapalinové, plynové a polovodičové lasery. Toto rozdělení považuji za důležité a proto tyto typy laserů více rozvedu (Kusala, 2004).

#### **Pevnolátkové lasery**

Nejznámějším pevnolátkovým laserem je první laser, který byl postaven H. Mainmanem, v roce 1960.

Aktivním prostředím jsou amorfní nebo krystalické izolanty s příměsí vhodných iontů. Excitace aktivního prostředí je nejčastější optická. Takovéto lasery mohou pracovat v různých režimech, za různých podmínek. Je pro ně typická nízká náročnost údržby a

---

jsou stabilní. Záření vlnové délky v oboru viditelného a infračerveného světla. Dnes nejrozšířenějším je neodymový, který má uplatnění zejména v medicíně (Kusala, 2004).

### **Kapalinové lasery**

Roztoky různých organických barviv tvoří aktivní prostředí těchto laserů. Mezi jejich hlavní nevýhody patří krátká životnost aktivního prostředí, který se světlem a teplem rozkládá. Tyto lasery mohou dosahovat v podstatě všech vlnových délek. Tedy od 300 nm po 1500 nm. V současnosti se používají hlavně ve spektometrii (Kusala, 2004).

### **Plynové lasery**

Aktivním prostředím tohoto laseru mohou být atomy, molekuly nebo ionty. Tyto lasery pracují ve velmi širokém rozpětí vlnových délek a to v pulzním nebo kontinuálním režimu. Excitace u těchto laserů probíhá většinou ve zředěném plynu pomocí elektrického výboje. Optická varianta excitace se používá jen zřídka. Jako nevýhoda těchto laserů se udává poměrně malý výkon (Kusala, 2004).

Nejčastější typy jsou červeně zářící helium – neonový laser, v medicíně a průmyslu se nejvíce používá CO<sub>2</sub> infračervený laser. Modře a zeleně zářící světelné efekty poskytuje laser argonový (Kusala, 2004).

### **Polovodičové lasery**

Dnes nejrozšířenější technologie, zdrojem záření je tzv. laserová dioda. Diody jsou velmi malé, což má za následky vyšší rozbíhavost paprsků než u jiných technologií. Na druhou stranu diody jsou velmi účinné a malé. Výkon těchto diod se dá jednoduše měnit úpravou síly elektrického proudu. Nejčastěji se využívají v telekomunikacích, spotřební elektronice a výpočetní technice (Kusala, 2004).

### **Rozdělení podle způsobu excitace**

Dalším důležitým rozdělením laserových paprsků je způsob jejich excitace, jinak také buzení, pumpování nebo čerpání aktivního prostředí. Dělíme je na optické buzení, buzení elektrickým proudem, chemická excitace a jiné (Kusala, 2004).

### **Optické buzení**

Ve formě světelného záblesku dodáváme energii potřebnou ke vzniku laserového paprsku. Tento způsob se používá u pevnolátkových a kapalinových laserů. V případě například rubínového laseru (Kusala, 2004).

---

## Buzení elektrickým polem

V plynové náplni laseru dojde k elektrickému výboji. Lasery na tomto principu fungují kontinuálně a jejich výkon se dá měnit změnou objemu plynu nebo jeho cirkulací (Kusala, 2004).

## Chemická excitace

Pro čerpání energie do aktivního prostředí se využívá exotermických a chemických reakcí. Roku 1965 byl zkonstruován první laser tohoto typu a využíval reakce vodíku s chlórem. Následně se používala reakce vodíku s fluorem. U jiných typů se energie získává štěpením molekul jódu pomocí ultrafialového záření (Kusala, 2004).

## 1.4 Části laseru a jeho princip

Laser, jako každé jiné zařízení, se skládá z několika součástí. Každé laserové zařízení musí obsahovat aktivní prostředí, zdroj energie buzení, chladicí systém, budicí zařízení a rezonátor (Mičietová, 2001).

Jako zdroj energie si můžeme představit zařízení, které dodá energii do aktivního prostředí. Tím dojde k vybuzení elektronů ze základní energetické hladiny do vyšší hladiny. Dojde k takzvané excitaci. Takto je do vyšších energetických hladin vypuzena většina elektronů. Tento jev se nazývá inverzní populace. Při přestupu na nižší energetickou hladinu dochází k vyzáření kvanta energie ve formě fotonů. Následně tyto fotony interagují s dalšími elektrony, tím se spustí simulovaná emise fotonů (Sandílek, 2016).

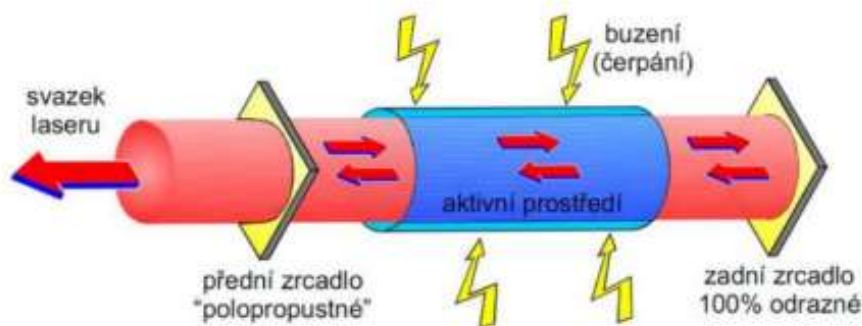
Rezonátor je další nedílnou součástí a tvoří jej dvě zrcadla. Jedno polopropustné a druhé nepropustné. V těchto zrcadlech dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu aktivním prostředím. V rezonátoru je umístěno aktivní prostředí, to podporuje stimulovanou emisi a dochází tak k zesilování toku fotonů. Paprsek poté opouští rezonátor skrz výstupní poloprůhledné zrcadlo (Sandílek, 2016).

Aktivním prostředí nazýváme látku, která obsahuje oddělené energetické hladiny elektronů. V těchto hladinách přeskakují elektrony z nižší na vyšší hladinu a poté naopak. Na nižší energetickou hladinu mohou elektrony přeskočit buď stimulovanou, a nebo spontánní emisí. Laserové zařízení pracují pouze na bázi stimulované emise (Kvietková, 2015).

Rezonátor je částí, která umožňuje zformovat a zesílit záření. Tím se zesílí elektromagnetická vlna, která z něj vychází. Konstrukce uspořádání rezonátoru určuje

jeho vlastnosti. Zejména koherenci, intenzitu záření a energetickou rozbíhavost laserového záření (Kvietková, 2015).

Chladicí zařízení chladí laser a slouží k ochraně procesu. Nevyužitá energie se promění v energii tepelnou. Častým médiem, určeným pro chlazení, je voda. Samotný chladicí okruh se skládá ze dvou částí. Ve vnější části se používá voda z vodovodní sítě nebo zásobníku a ve vnitřní části používáme deioniovanou vodu. Je samozřejmostí, že se mohou používat i jiné systémy (Kvietková, 2015).



**Obrázek 2 Schéma částí laseru (Kořán, 2021)**

## 1.5 Řezání laserem

Mezi hlavní výhody řezání laserem je malá šířka řezu, žádné opotřebení nástroje, čistý řez, možnost řezání i velice složitých tvarů, hospodárnost a malá velikost tepelně ovlivněné oblasti. Řezání laserem může být sublimační (materiál je odpařen z místa řezu), tavné (materiál je roztaven a plynem odfukován, například v případě dřeva) a pálením (laser ohřeje materiál až do bodu, kdy se zapálí a vzniklá struska je z místa řezu odstraněna pomocí asistenčního plynu) (mmspektrum, 2008).

U řezání laserem jsou nejvíce sledovanými veličinami rychlost řezání, kvalita řezu a šířka řezné spáry (mmspektrum, 2008).

### Rychlost řezání

Rychlost řezání laserem závisí na typu laseru a obráběného materiálu. Dále pak závisí na výstupním výkonu laserového paprsku, druhu řezaného materiálu a požadované kvalitě řezu (mmspektrum, 2008).

---

## Umístění ohniska vzhledem k obrobku

Pro zajištění co nejlepšího řezného výkonu je tento faktor velice důležitý. Hlavní vliv na umístění ohniska může mít tloušťka obráběného materiálu, rozdílnost tvaru laserového paprsku, změny čočky nebo změny teploty hladící kapaliny mohou mít vliv na umístění ohniska. Obvykle pás paprsku neboli ohniskový bod bývá umístěn buď na povrchu, a nebo ve vzdálenosti do 30% tloušťky obráběného materiálu. Toto nastavení laseru má velký vliv na tvar a vlastnosti řezné spáry (Sedílek, 2016).

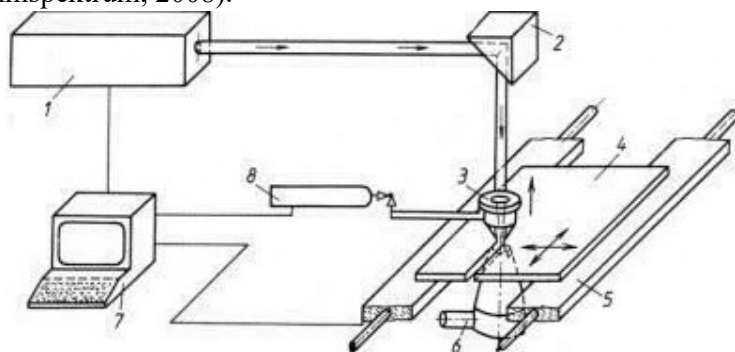
## Řezný plyn

Jedná se o další zásadní parametr pro zhotovení co nejlepší řezné spáry. S tlakem plynu souvisí i tvar trysky. Je zde veliké množství plynů používajících se na různé materiály. V případě obrábění dřeva se používá často například  $\text{CO}_2$ . Tlak plynu se při nízkotlakém řezání pohybuje do 0,1 MPa, při střednětlakém do 0,5 MPa a při vysokotlakém do 2 MPa. Konvenční trysky mají kuželovito rozšiřující otvor nebo kruhový. Průměr trysky se pohybuje od 0,25 až 2,5 mm. Spotřeba plynu závisí od použité trysky a použitého tlaku (Mičietová, 2001).

## Řezná spára

Kvalitu řezu hodnotíme podle jakosti řezané plochy. Drsnost povrchu je v rozpětí  $R_a$  3,6 až 12mm. Dále hodnotíme taky tloušťku oblasti, která byla ovlivněna laserem. Většinou se tloušťka ovlivněné oblasti pohybuje od 0,05 až 0,2 mm (mmspektrum, 2008).

Další podstatnou vlastností je šířka řezné spáry. Na tuto charakteristiku má vliv druh laseru, dále tloušťka a druh řezaného materiálu. Tloušťka řezné spáry bývá od 0,02 až 0,2mm (mmspektrum, 2008).



**Obrázek 3 Schéma zařízení pro řezání laserem (www.mmspektrum.com)**

- 1 – laser, 2 – zrcadlo, 3 – pracovní řezací hlava, 4 – obrobek, 5 – pracovní stůl stroje,  
6 – odsávání zplodin, 7 – CNC řídicí systémy

---

## 1.6 Způsoby řezání laserem

Řezání laserovým paprskem je možno realizovat různě podle potřeb a nároků zákazníka. V současnosti se využívá technologie tavného, oxidačního a sublimačního řezu. Důraz při správném výběru technologie řezání laserem se klade na typ řezaného materiálu, tloušťku materiálu a v případě dřeva například i na vlhkost materiálu (Mrna, 2013).

### Technologie tavného řezání

V případě této technologie odstraňujeme ze spáry natavený materiál proudem inertního plynu. Tato technologie se vyznačuje nižší řeznou rychlostí, kvalitním řezem, potřebou vysokého výkonu laseru, vytvořením neoxidovaného řezu a velkou spotřebou řezného plynu. Při tavném řezání se používá jako asistenční plyn dusík nebo argon. Tavné řezání se používá zejména na řezání vysoce legovaných ocelí, nerezavějících ocelí, slitin na bázi niklu, hliníku, mosazi a ostatních neželezných materiálů (Mičietová, 2001).

### Oxidační řezání

Oproti tavnému způsobu používáme při oxidačním řezání kyslík jako řezný plyn. Podle tloušťky materiálu se nastavuje tlak plynu. Pro materiály 1-3mm tlusté se používá tlak 5 barů, pro materiály do 10mm se používá plyn o tlaku 1 bar a pro tlustší materiály se používá tlak plynu pod 1 bar. Řez tímto způsobem je rychlejší, ale řezná spára je širší, drsnější a s tepelně ovlivněnou oblastí. Tento způsob se používá pro zhotovování ostrých geometrických tvarů nebo malých otvorů. Kvalitu řezného povrchu můžeme ovlivnit kalibrací výkonu laseru na daný materiál, a nebo použitím pulzního laseru (Šplíchal, 2021).

### Sublimační řezání

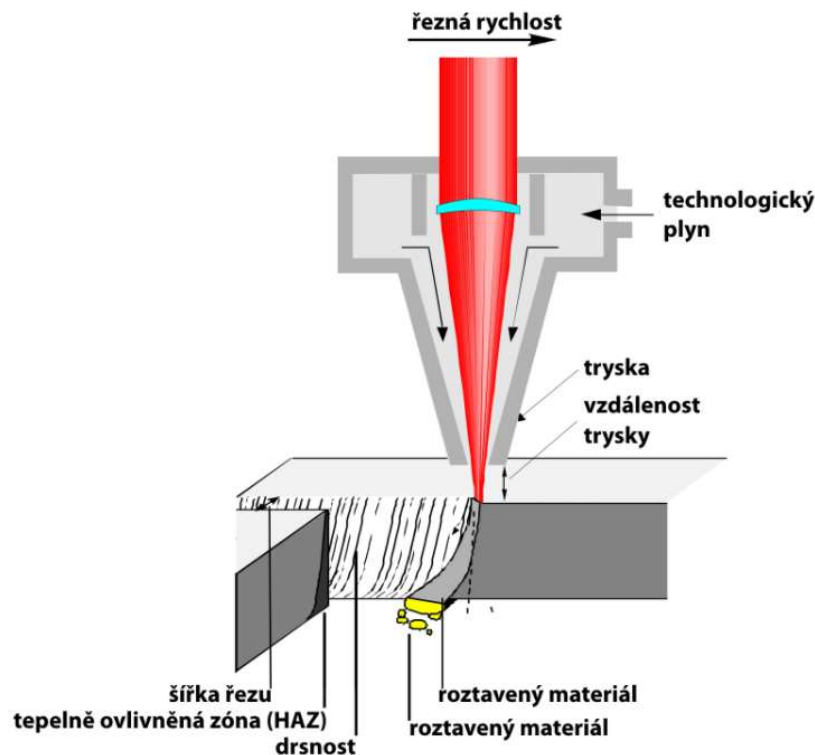
Tento způsob řezání se používá pro dělení nekovových materiálů jako například dřeva, plastu, plexiskla, papíru nebo kůží. Při řezání může docházet k tvorbě škodlivých plynů, které je třeba odsát z prostoru obrábění. Pro zamezení zabarvení okolí řezné hrany a pro minimalizaci vznícení je možné použít inertní plyny. Jedná se tedy o dusík nebo argon (Šplíchal, 2021).

## 1.7 Vlastnosti řezné spáry

Z hlediska následné práce s materiálem opracovaným laserovým paprskem je důležité sledovat několik důležitých vlastností řezné spáry. Tyto vlastnosti jde do jisté míry ovlivnit různým nastavením laseru. Zejména jde o nastavení síly laseru, velikosti



čočky, fokusační vzdálenosti a rychlosti řezu. Na obrázku 4 můžeme vidět, které nastavení jsme při obrábění laserovým paprskem schopni ovlivnit. Toto nastavení laserového paprsku musí být ovšem nastaveno náležitě k obráběnému materiálu. V případě obrábění dřeva sledujeme zejména drsnost řezné spáry, tepelně ovlivněnou oblast, kolmost řezné spáry, zabarvení a velikost řezné spáry. Tyto vlastnosti řezné spáry ovlivňují plánování výroby například kvůli výpočtu nářezových plánů, ale také jde zejména o následné opracování těchto dílců. Často je třeba odstranit zuhelnatěnou vrstvu nebo například zlepšit kolmost řezané spáry. (Mičietová, 2001).



**Obrázek 4 Ovlivnitelné nastavení laserového paprsku (lao.cz)**

### **Kolmost řezné spáry**

Tato vlastnost řezné spáry je dána zejména tloušťkou materiálu a fokusační vzdáleností. Obecně platí, že čím tlustší materiál je obráběn laserovým paprskem, tím je zabíhání laserového paprsku větší a díky tomu je kolmost menší. Zde se dá mluvit spíše o zaoblení. Při řezání tenkých materiálů tento problém skoro nepocítíme, ale při řezání tlustších materiálů musíme posléze danou řeznou plochu upravit (Sandílek, 2009).

---

## Zabarvení a lesk řezné spáry

Zabarvení řezné spáry můžeme měřit pomocí normy ČSN 01 1718. Tato norma popisuje, jak by se mělo správně postupovat při měření barev, jejich chromatičnosti a kolority a jejich číselné vyjádření v koliometrických soustavách. Lesk se měří podle normy ČSN EN ISO 2813. Toto měření lesku probíhá pod úhly 20°, 60° a 85°.

## 2 Dřevo a jeho vlastnosti ovlivňující obrobiteľnosť

Tento materiál se používal po celou dobu historie lidstva. V nedávné historii bylo dřevo nahrazováno jinými materiály, zejména umělými hmotami jako například plasty. V poslední době se ale trend obrací a dřevo je používáno čím dál víc. Je to hlavně kvůli velkému důrazu na životní prostředí. Dřevo je možné vnímat z hlediska různých strukturálních hladin a počínající od chemické, submikroskopické, mikroskopické a makromikroskopické hladiny dřeva.

### 2.1 Chemická strukturální hladina dřeva

Každé dřevo je specifické svou chemickou stavbou a strukturou jednotlivých buněčných stěn. Na rozdíl od anatomické stavby dřeva, kde je velký rozdíl mezi jehličnatým a listnatým dřevem je chemické složení dřevní hmoty téměř totožné, na obrázku 5 můžeme vidět zastoupení hlavních složek jak jehličnatého, tak listnatého dřeva.

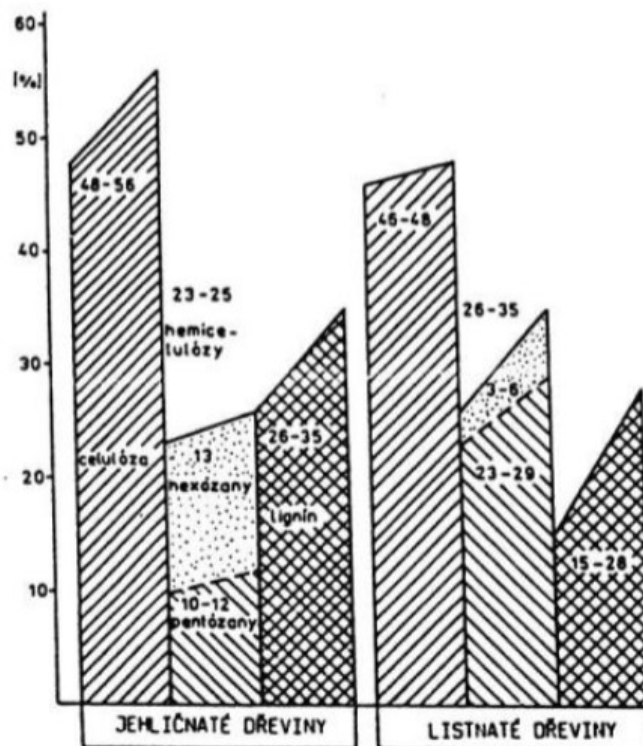
Hlavní složky dřevní hmoty jsou:

- celulóza 40-50 %,
- hemicelulóza 20-30 %,
- lignin 20-30 %,
- jiné organické látky 1-3%, zejména se jedná o terpeny, vosky, pektiny, tuky, třísloviny, pryskyřice,
- různé množství vody,
- anorganické látky (tyto látky po spálení tvoří popel) 0,1-0,5 % (Babiak a kol., 1997).

Zastoupení prvků v sušině tuzemského dřeva:

- uhlík 50 %,
- kyslík 43 %,
- popeloviny 0,2-0,6 %,
- vodík 6 %,

- dusík 0,04-0,2 % (Babiak a kol., 1997).



**Obrázek 5 Zastoupení hlavních složek v jehličnatých a listnatých dřevinách (Požgaj, 1993)**

V případě obrábění dřeva laserovým paprskem nás zajímají nejvíc vlastnosti a zejména tepelná odolnost jednotlivých složek dřeva. Zejména celulózy, hemicelulózy a ligninu.

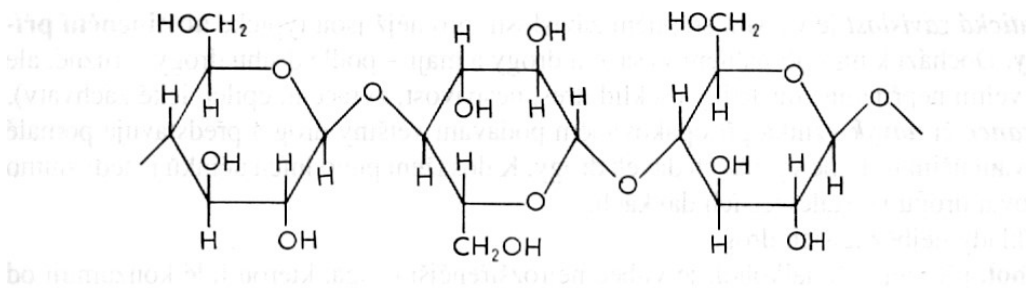
### **Celulóza**

Celulóza hraje velmi významnou roli ve stavbě buněčných stěn. Jelikož celulóza obsahuje velké množství volných -OH skupin, tak je hlavní příčinou, proč dřevo bobtná a sesychá. Je to polysacharid a jeden z nejčastěji se vyskytujících biopolymerů na zemi. V rostlinné biomase se pohybuje v rozmezí 35-50% sušiny (Lynd a kol. 2002). V případě dřeva se jedná o 40-50%. Tento lineární homopolymer se skládá s D-glukopyranosylových jednotek, které vzájemně propojuje glykosidová vazba. Jednotlivé řetězce propojují vodíkové můstky a Van der Waalsovy síly vytvářejí elementární fibrily Na obrázku 6 můžeme vidět chemickou strukturu celulózy (Babiak a kol., 1997).

Velmi dlouhé a nevětvené polymery celulózy vytváří v buněčných stěnách rostlin takzvané mikrofibrily. Jde o svazky molekul celulózy, které jsou velmi pevné v tahu a jejich spojení zajišťují vodíkové můstky. Tyto mikrofibrily jsou spojovány do větších

celků, které následně nazýváme fibrily, a však mají tloušťku několik desítek mikrometrů. Mikro fibrily jsou převážně rovnoměrně orientovány a jsou uspořádány tak, že tvoří pravidelnou síť, která je podobná krystalické mřížce. Takovéto uspořádání zaručuje poměrně velké pružné prodloužení a velkou podélnou pevnost v ohybu. Na obrázku 6 můžeme vidět chemický vzorec celulózy (Votrubová, 1996).

#### *Celuloza (polysacharid)*



**Obrázek 6 Chemický vzorec celulózy (eluc.kr-olomoucky.cz)**

#### **Hemicelulózy**

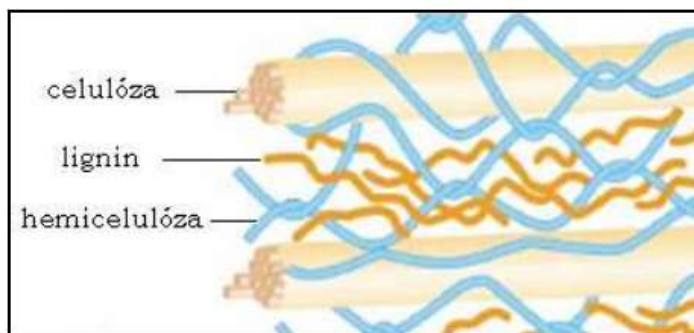
Jedná se o souhrnný název pro různorodé polysacharidy, které se vyskytují vedle celulózy v buněčné stěně. Hned po celulóze je to druhá nejdůležitější složka dřeva. Pro dřevo má význam zejména jako zásobní a stavební látka. Jelikož má hemicelulóza menší stupeň polymerizace než celulóza, je její pevnost nižší. V případě hemicelulózy se jedná o průměrný polymerizační stupeň 150 – 250 a v případě celulózy je průměrný polymerizační stupeň 6000 – 14000. Do těchto polysacharidů nezařazujeme škrob. Na rozdíl od celulózy není struktura hemicelulózy krystalická, ale větvená. Hemicelulózy obsahují několik druhů cukrů a to zejména hexózu, galaktózu a manózu, ale například i pentózy, xylózy a arabinózu. Cukry mohou být v hemicelulóze také acetylovány. Hemicelulózy mohou také obsahovat oxidované formy cukrů, například kyselinu galakturonovou a kyselinu glukuronovou (Babiak a kol., 1997)

#### **Lignin**

Lignin je vývojově mladší než celulóza. Je to dáno tím, že u vodních rostlin nebylo ligninu potřeba (Kürschner, 1952). Makromolekuly ligninu se mohou vázat kovalentně na polysacharidy. V případě dřevam, tedy na celulózu a hemicelulózu. Přítomnost ligninu ve dřevě má za následek zdřevnatění buněčných stěn. Lignin sám o sobě zastává funkci jakéhosi tmele, který spojuje vlákna hemicelulóz a celulózy. Spojuje tedy dřevní buňky a vytváří tak kompozitní materiál s vyjímečnými vlastnostmi. Dalším přínosem ligninu je

---

také zvyšování odolnosti vůči mikroorganismům, které k rozkládání dřeva využívají enzymy. Při zvyšování teploty a vlhkosti lignin měkne a díky tomu dřevo získává plastičnost a je možné jej tvarovat například ohýbáním. Po ochlazení a vysušení opět tuhne a zachová si nový tvar. Dále také zvyšuje mechanickou pevnost, dodává tuhost, snižuje propustnost a zlepšuje ochrannou funkci rostlinných pletiv. Jelikož se lignin rozkládá již při 140 °C má významný vliv na výhřevnost dřeva. Při nedokonalém spalování ligninu, který nazýváme pyrolýzou, dochází k uvolňování aromatických složek. Této vlastnosti využíváme například při udění (Jankovský a kol., 1999)



**Obrázek 7 Schématické znázornění ligninu, celulózy a hemicelulózy (eluc.kr-olomoucky.cz)**

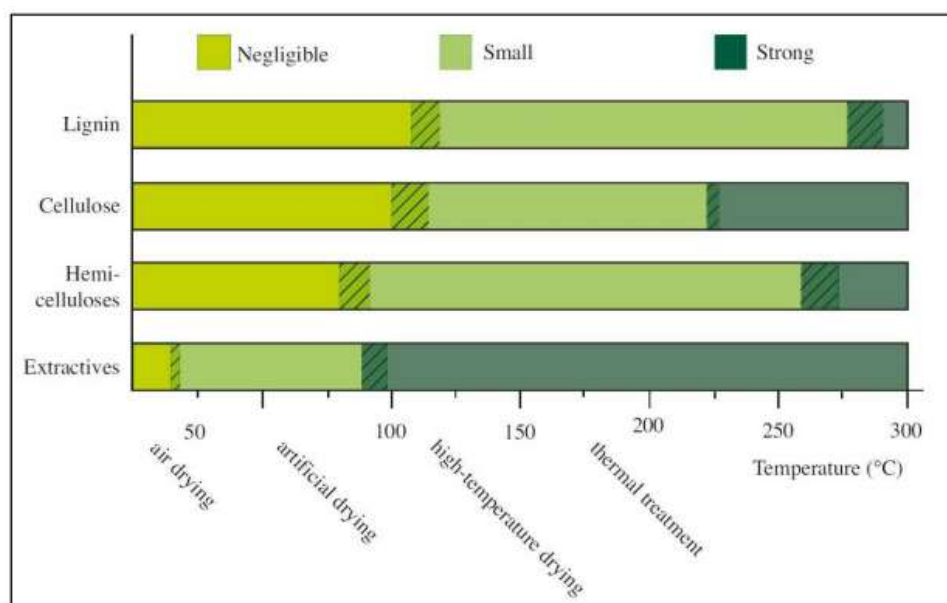
## 2.2 Fáze působení tepla na dřevo

Na začátku působení teplem na dřevo dochází k odpaření vody. Tento děj se odehrává při teplotách 80 až 120 °C. V tomto případě se teplo spotřebovává zejména na vysušení vody volné a vody vázané. Tento jev vede ke zvětšování vnitřního povrchu dřeva, který se tak dostává do kontaktu se vzduchem. Při této teplotě se na povrchu objevují trhliny, dřevo mírně hnědne a v případě některých jehličnatých dřevin dochází k vytékání pryskyřice na povrch. Úbytek hmotnosti materiálu je v této fázi velmi malý (VVUD, 2005).

Pakliže přesuneme dřevo do vyšších teplot (150–200 °C) dochází již k první degradaci složek dřeva. Jedná se zejména o rozkládání ligninu. Nastává také dehydratace celulózy a hemicelulóz. V této fázi dochází již k výraznému ztmavnutí povrchu a některé mechanické vlastnosti, zejména houževnatost, se zhoršují. Při těchto teplotách ještě ale nedochází k uvolňování hořlavých plynů, které by utvořily plamen (Ochrana dřeva, 2005).

Depolymerizace nastává při teplotách, které přesahují 220 °C. Jedná se tedy o pyrolýzu polysacharidů a ligninu. V této fázi se výrazně snižují mechanické vlastnosti dřeva, a to hlavně pevnost dřeva. Při těchto teplotách již dochází k hojnému uvolňování plynů, zejména: oxidu uhelnatého, vodíku, methanu, ketonů, aldehydů a dalších nízkomolekulárních produktů (Ochrana dřeva, 2005).

V případě obrábění laserovým paprskem je nutné dbát na tepelnou odolnost dřeva. Hlavní problematikou řezání laserovým paprskem je opalování řezné spáry a ovlivňování okolí řezné spáry. To má dále za následek nutnost odstranit zuhelnatělou vrstvu, která po obrábění může vzniknout díky degradaci dřeva při teplotách nad 350 °C. Další problematikou, ale může být tepelně ovlivněná oblast, a to například v souvislosti s pronikáním lepidla do dřeva (Ochrana dřeva, 2005).



**Obrázek 8 Degradace dřevních složek podle velikosti tepla (Sandberg, 2011)**

Nepodstatné (negligible), malé změny (small), velké změny (strong), přirozené sušení (air drying), umělé sušení (artificial drying), vysokoteplotní sušení (high-temperature drying), termická modifikace (thermal drying)

### 2.3 Mikroskopická strukturální hladina dřeva

Oproti makroskopické struktuře dřeva nelze mikroskopickou stavbu dřeva, až na výjimky, pozorovat pouhým okem. Na spatření některých mikroskopických znaků stačí lupa, na jiné je třeba mikroskop. V případě mikroskopické struktury dřeva je třeba rozlišovat dřevo jehličnaté a dřevo listnaté.

---

## Mikroskopická stavba jehličnanů

Dřevo jehličnatých stromů je vývojově starší, díky tomu je stavba jehličnatého dřeva jednodušší a pravidelnější než v případě dřeva listnatého. Stavbu jehličnatého dřeva vytvářejí dva anatomické prvky a to konkrétně cévice (tracheidy) a parenchymatické buňky (Požgaj, 1993).

Parenchymatické buňky mají ve dřevě vodivou a zásobní funkci. Buněčné stěny parenchymatických buněk jsou zdřevěnělé, až na epitelové buňky pryskyřičných kanálků. Jejich tvar je ve formě krátkých hranolků, větven a válců (Požgaj, 1993).

Přibližně 5 – 10 % objemu dřeva tvoří dřevné paprsky. Jsou tvořeny parenchymatickými buňkami, které tvoří pásy orientované kolmo na letokruhy. Jejich funkce je vodivá a zásobní. Ukládají škroby a tuky a vedou živiny a růstové látky (Gandelová a kol., 2009).

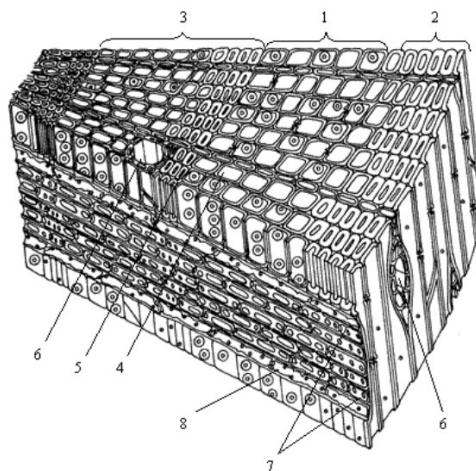
Cévice neboli také tracheidy tvoří 87 až 95 % objemu dřeva. Tvar buněk je protáhlý se čtyř až šestiúhelníkovým průřezem a s různým zakončením. Jejich délka je 2-6 mm a šířku mají kolem 0,04 mm. Jejich funkce je zejména vodivá a mechanická (Gandelová a kol., 2009).

Některé jehličnany obsahují také pryskyřičné kanálky. Vyskytují se například u smrku a borovice. Naopak u jedle, tisu a jalovce se pryskyřičné kanálky nevyskytují. Pryskyřičné kanálky rozdělujeme podle orientace ve kmeni. Dělíme je na příčné (horizontální) a podélné (vertikální). Tyto kanálky jsou navzájem propojené a vytváří systém kanálků, které v případě poranění kůry způsobí, že z dané rány rostoucích stromů vytéká pryskyřice (Gandelová a kol., 2009).

Vertikální pryskyřičné kanálky jsou tvořeny třemi vrstvami parenchymatických buněk, kde vnitřní vrstva je tvořena epitelovými buňkami, které mohou být tlustostěnné a nebo tenkostěnné. Vnější vrstvu tvoří živé parenchymatické buňky, takzvaný doprovodný parenchym. Kolmo na osu kmene prochází dřevem horizontální pryskyřičné kanálky. Tyto pryskyřičné kanálky jsou tvořeny dvěma vrstvami a uloženy jsou v dřevných paprcích. Nejlépe jsou pozorovatelné na tangenciálním řezu. Tvořeny jsou epitelovými vrstvami a mrtvými parenchymatickými buňkami (Gandelová a kol., 2009).

---

Podélný (axiální) dřevní parenchym je soubor parenchymatických buněk se zásobní funkcí. Tyto buňky jsou orientovány podélně s osou kmene. Tento soubor buněk se vyskytuje ve velmi malém množství a často úplně chybí. Výskyt podélného dřevního parenchymu může ukazovat například na jisté dřeviny. Například jalovec. Na obrázku 9 můžeme vidět stavbu dřeva jehličnatého dřeva (Gandelová a kol., 2009).



**Obrázek 9 Stavba jehličnatého dřeva (Požgaj, 1993)**

1. Jarní dřevo, 2. Letní dřevo, 3. Letokruhy, 4. Jarní tracheida, 5. Letní tracheida, 6. Pryskyřičný kanálek, 7. Dřeňový paprsek, 8. Příčná tracheida

### **Mikroskopická stavba listnatého dřeva**

Dřevo listnáčů je vývojově mladší než-li dřevo jehličnanů a vyznačuje se složitější stavbou a tedy i větším počtem buněk se speciální funkcí. Konkrétně jde o cévy (tracheje), cévice (tracheidy), libriformní vlákna, parenchymatické buňky a dřeňové paprsky (Požgaj, 1993).

Cévy jsou vodivé buňky listnatého dřeva. Jejich délka je různorodá a jsou uloženy podélně k ose kmene. Od několika milimetrů až po metry. V bělovém dřevě tvoří cévy dopravní síť, která má za úkol přepravit vodu a minerální látky od kořenů stromu po listy. Vzhledem k velikosti a uspořádání cév dělíme listnaté dřeviny z makroskopického hlediska na roztroušeně pórovité, kruhovitě pórovité a poloruhovitě pórovité (Požgaj, 1993).

Cévice (tracheidy) mají ve dřevě funkci mechanickou, vodivou a někdy zásobní. Vzhledem k funkční a tvarové odlišnosti rozlišujeme cévice na cévovité, vláknité a vazicentrické (Požgaj, 1993).

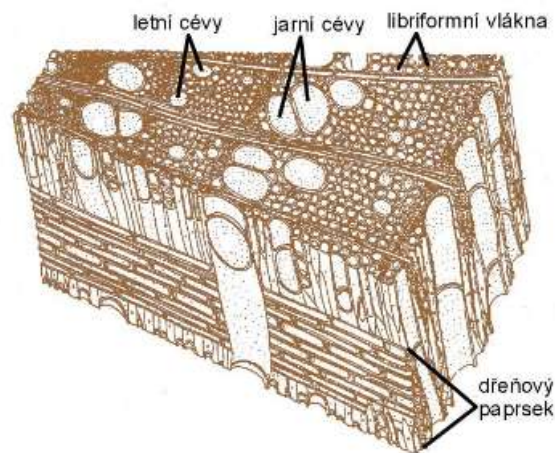


---

Podstatnou část základního pletiva většiny listnáčů tvoří libriformní vlákna. V závislosti na druhu listnáče mohou tvořit až 75 % celkového objemu dřeva. Obvykle se jedná o 50 – 60% objemu dřeva. Jejich hlavní funkcí je zpevnění elementů dřeva (Gerhards, 1982).

Parenchymatické buňky jsou u listnáčů tvarově rozmanitější a častěji zastoupeny než v případě jehličnatého dřeva. Jejich hlavní funkcí je ukládání tuků, bílkovin a škrobů. V případě podélného uložení v kmenu se jedná o axiální parenchyma a v případě kolmého uložení na osu kmene hovoříme o radiálním parenchymu, který tvoří dřeňové paprsky (Gerhards, 1982).

U listnatých stromů se také vyskytují častěji dřeňové paprsky. Jsou různě široké, různě vysoké a jedno nebo více-vrstvé. Průměrně tvoří 10-20 % z celkového objemu dřeva. Rozlišujeme je na homogenní a heterogenní. Toto rozdělení je podle tvaru parenchymatických buňek. Homogenní dřeňové paprsky jsou tvořeny tvarově stejnými buňkami orientovanými na ležato nebo na stojato. Heterogenní dřeňové paprsky jsou tvořeny různou kombinací ležatých, stojatých a v některých případech čtvercových parenchymatických buňek. U některých listnáčů se úzké dřeňové paprsky seskupují a tím vytvářejí nepravé dřeňové paprsky. Na obrázku 10 můžeme vidět stavbu dřeva listnatých dřevin (Gerhards, 1982).



**Obrázek 10 Stavba listnatého dřeva (adoc.pub)**

---

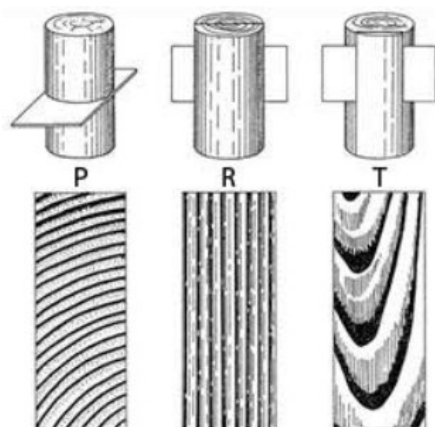
## 2.4 Makroskopická strukturální hladina dřeva

Makroskopickou stavbu, na rozdíl od mikroskopické stavby dřeva, můžeme vidět pouhým okem. Pro správné určení je třeba znát základní směry řezu dřeva, a to řez tangenciální, radiální a příčný. Základními makroskopickými znaky jsou:

- Lesk,
- Barva,
- Vůně,
- Textura,
- Tvrdost,
- Suky,
- Očka,
- Svalovina,
- Reakční dřevo,
- Dřeňové paprsky a další (NIS, 2021).

### Základní řezy dřeva

Znalost těchto řezů je velice důležitá, jak při poznávání dřeva, tak při různých výpočtech vlastností dřeva. Jedná se o řez příčný (čelní, transversální), řez tangenciální a řez radiální (poloměrový). Příčný řez je veden kolmou rovinou k podélné ose kmene. Řez tangenciální je řez vedený rovinou rovnoběžnou s podélnou osou kmene, nikoliv ale v ose kmene. Zatímco radiální řez je veden rovinou v podélné ose kmene. Na obrázku 11 jsou znázorněny základní řezy kmenem (NIS, 2021).



Obrázek 11 Znázornění základních řezů kmene (Balabán, 1955)

P – příčný řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez

---

## 2.5 Vlastnosti dřeva ovlivňující řezání dřeva laserem

Z mnohých vlastností dřeva nás při řezání laserem zajímá zejména hustota, tvrdost, tloušťka a vlhkost dřeva. Tyto hodnoty mají nejvýznamnější vliv na nastavení laseru a následné kvalitě řezné spáry.

### Vlhkost dřeva

Je to jedna z fyzikálních vlastností dřeva. Je to poměr hmotnosti vody k hmotnosti sušiny dřeva. Tuto veličinu vyjadřujeme pomocí hmotnostních procent. Ve dřevě se voda vyskytuje ve třech oblastech. První oblastí je voda chemicky vázaná. Nemá význam pro fyzikální, ani mechanické vlastnosti dřeva. Zjišťuje se pomocí chemické analýzy, tvoří 1-2% sušiny dřeva, vyskytuje se i při nulové vlhkosti dřeva a není významná pro fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Další výskyt vody ve dřevě je voda vázaná. Jinak také hygroskopická. Nachází se v buňčných stěnách a je vázaná vodíkovými můstky na hydroxilové skupiny OH amorfní části celulózy a hemicelulóz. Ve dřevě se vyskytuje při vlhkostech od 0% do bodu nasycení dřevních vláken, kterých je obecně kolem 30% vlhkosti dřeva. Nejvíce ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Poslední výskyt vody ve dřevě je voda volná. Jinak také kapilární. Tato voda se nachází v lumenech buňek a vyplňuje mezibuněčné prostory. Fyzikální a mechanické vlastnosti ovlivňuje méně než voda vázaná (Požgaj, 1993).

Pro výrobu nábytku do interiéru se používá vlhkost dřeva přibližně 8% a při výrobě nábytku do exteriéru používáme dřevo o vlhkosti přibližně 12%. Vlhkost dřeva hraje velkou roli například ve výrobě nábytku. Zde má vlhkost vliv zejména na životnost jednotlivých výrobků. Vlhkost dřeva má vliv i na následné lepení jednotlivých částí nábytku. Vysoká vlhkost může v některých případech proces lepení úplně zastavit (Kvietková, 2015).

Vlhkost dřeva způsobuje značné komplikace v případě zpracování dřeva laserovým paprskem. Jedná se zejména o problematické nastavení laserového paprsku. Obecně lze říci, že čím nižší vlhkost řezaného organického materiálu, tím vyšší řezná rychlost. Tento fakt je dán tím, že vlhkost pohlcuje záření CO<sub>2</sub> laseru, což následně vede k výrazné snížení rychlosti řezání. Nízká rychlost řezání samozřejmě zvyšuje zuhelnatění řezné spáry (Mičietová, 2001).

---

## **Tvrдост a hustota dřeva**

V případě tvrdosti dřeva se jedná o odpor, který klade povrch tělesa proti vnikání jiného předmětu. Na změření tvrdosti dřeva se používají zkoušky podle Brinella a Janky. Brinellova zkouška spočívá v tlačení ocelové kuličky o průměru 10 mm do dřeva a v následného výpočtu. V případě zkoušky podle Janky jde o razítko zakončené půlkulatou plochou, která se vtlačí do dřeva a vytvoří důlek o ploše 1 cm<sup>2</sup>. Síla, která je vynaložena na vtlačení takového razítka přímo udává tvrdost (HOMEL, 2021).

S nižší hustotou se zvedá obsah vzduchu ve dřevě, což v případě CO<sub>2</sub> paprsku působí pozitivně. Toto je dáno faktem, že na rozdíl od vlhkosti vzduch nepohlcuje záření CO<sub>2</sub> laserového paprsku. Tím pádem dřevo s nižší hustotou klade menší odpor než-li dřevo s hustotou vyšší (Mičietová, 2001).

## **Řezání dřeva laserem**

Dřevo je celulozový materiál. Díky silnému zesíťování v chemické struktuře dřeva není možné tento materiál řezat jednoduchým natavením. V případě dřevěných surovin musí být více narušené zesíťování, což znamená vyšší spotřebu elektrické energie na pohon laseru. Pro řezání dřevěného materiálu volíme co nejvyšší tlak plynu. Nejlépe kolem hodnoty cca 5.10<sup>5</sup> Pa. Šířka řezné spáry se pohybuje od 0,5 mm a v některých případech můžeme dosáhnout až hodnoty nižší než 0,2 mm. Možným problémem řezané spáry dřevěného materiálu je její zhulenaření a sklon řezné spáry. Pro co nejméně zuhelnatěnou řeznou spáru volíme co nejvyšší rychlost řezu. Sklon řezné spáry bývá 1 až 2 stupně (Spur, 1987).

## **3 Lepidla**

Lepidla jsou materiály v pastovité, kapalné, a nebo pevné formě. Vytváří nerozebiratelný spoj mezi dvěma nebo více dílci. Nejdůležitější vlastností lepidel je jejich voděodolnost. Tato vlastnost lepidel má zásadní vliv na jejich využití. Důležitou roli v případě lepidel hraje také jejich estetické působení jak vzhledem, tak i zápachem. Díky lepidlům je dnes možné vytvořit mnoho specifických spojů a materiálů. Liší se také způsob jejich nanášení. Ať už pomocí stroje, ručních nástrojů jako například štětce nebo pomocí různých přípravků. Jelikož jsou lepidla různých složení je nutné dbát také na pracovní podmínky a ochranu zdraví. (Kocourek, 2015).

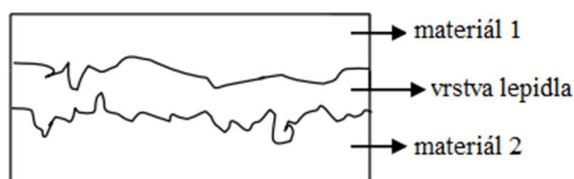
---

### 3.1 Teorie lepení

Proces trvalého spojení různých nebo stejných materiálů pomocí lepidla nazýváme lepením. Lepené jsou k sobě adherendy (materiály) pomocí adheziv (lepidel). Lepidlo můžeme charakterizovat jako látku schopnou vytvořit pevné, trvalé a nedemontovatelné spojení materiálů. Lepidlo je v okamžiku lepení v tekutém stavu, díky tomu je zajištěno dokonalé přilnutí k povrchu. Pevnost lepeného spoje ovlivňuje několik zásadních parametrů. Jedná se o přilnavost lepidla k lepenému povrchu (adhezi), soudržnost hmoty lepidla (kohezi), smáčivost lepeného povrchu a pevnost lepeného materiálu. V případě lepení dřeva využíváme zejména mechanickou teorii lepení a chemickou teorii lepení (Gregor, 2021).

#### Mechanická teorie

Hlavní myšlenkou této teorie je, že lepidlo pronikne do trhlin a nerovností lepeného povrchu, kde poté ztuhne a dojde k vytvoření jakéhosi pevného zámku v povrchu adherendu, jak můžeme vidět na obrázku 12. Tato teorie lepení se využívá hlavně v případě lepení dřeva, papíru a keramiky. V případě, kdy lepíme leštěné hladké plochy, je tato teorie zanedbatelná (Boublík, 1966).

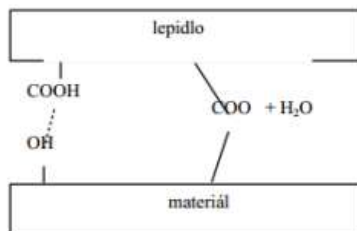


Obrázek 12 Vznik pevného zámku mechanickou teorií (users.fs.cvut.cz)

#### Chemická teorie

V případě této teorie lepení využíváme slabých van der Waalových elektrických přitažlivých sil mezi molekulami lepeného materiálu a lepidla jak znázorňuje obrázek 13. Tuto teorii lepení uplatňujeme jak u porézních, tak u zcela hladkých materiálů. Velice dobře se na základě této teorie lepí povrchy, které mají reaktivní povrch, a to díky chemické reakci lepidla přímo s lepeným povrchem. Na základě této teorie ideálně lepí reaktivní povrchy jako například přírodní polymery (papír, dřevo, celulóza) s volnými

chemickými skupinami a oxidované povrchy jako například kovy nebo oxidované plasty (Boubík, 1996).



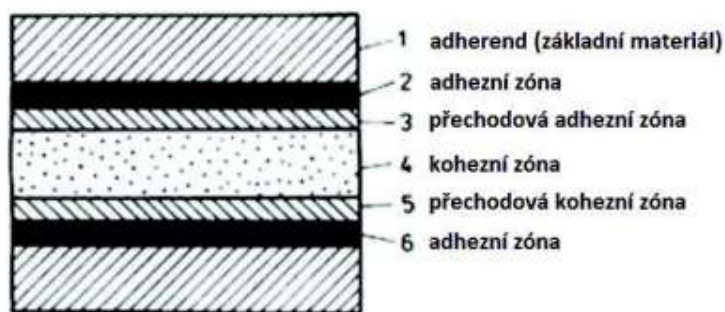
**Obrázek 13 Vznik chemické vazby mezi lepenými povrchy (users.fs.cvut.cz)**

### Difúzní teorie

Základem této teorie je tvrzení, že některé látky (kupříkladu polymery) mohou společně mezi sebou difundovat napříč rozhráním. Pevnost takového spoje závisí na průběhu difuze. Průběh dané difuze závisí zejména na čase, teplotě, relativní molekulové hmotnosti polymerů, kompatibilitě adherendu a adheziva. Tato teorie samozřejmě nevysvětluje spojení materiálu jako třeba kov a sklo, které navzájem nedifundují (Boubík, 1996).

### Koheze

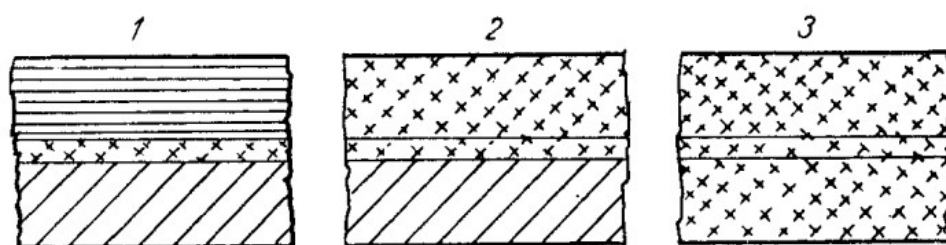
Jedná se o vnitřní soudržnost molekul lepidla. Tedy o schopnost lepidla držet pohromadě. Kohezi nazýváme síly mezi molekulami, které drží částice ve vazbě. Jde o složení molekulárních přitažlivých sil a vzájemného propojení polymerovaných molekul. Pro nejlepší pevnost lepeného spoje musí tedy lepidlo dokonale přilnout k lepené ploše a samotné lepidlo musí mít vynikající soudržnost molekul. Na obrázku 14 můžeme vidět rozložení vazeb v řezu lepeným spojem (Drápela a kol., 1980).



**Obrázek 14 Rozložení vrstev lepeného spoje v řezu (slidetodoc.com)**

## Adheze

Jinak také přilnavost. Pakliže lepidlo nedokáže dostatečně přilnout k materiálu, nemůže dojít ke kvalitnímu spojení a tedy k rozlepení spoje. Jsou dvě možnosti adhezního spojení. Jedná se buď o mechanickou vazbu, tedy o zatečení do jednotlivých pórů a prohlubní. Následné zatuhnutí vytvoří jakési zámky mezi lepidlem a lepeným materiálem. Toto spojení je nejvíc využíváno u porézních materiálů jako je například dřevo. Druhou využívanou vazbou je chemická vazba, která využívá van der Waalových elektrických přitažlivých sil mezi molekulami lepeného materiálu a lepidla, ale zejména jde o přímé chemické působení lepidla na lepený povrch. Na obrázku 15 můžeme vidět posouzení stavu lepidla k lepenému materiálu (Ebnesajjad, 2014).



**Obrázek 15** Posouzení stavu lepidla k lepenému materiálu (Osten, 1986)

1. Běžný adhezní stav, kdy je složení lepidla rozdílné od složení lepených dílců.
2. Částečná (jednostranná) autoadheze, kdy lepidlo má stejné složení jako jeden z lepených materiálů.
3. Úplná autoadheze nastává, když lepidlo a lepený materiál mají stejné chemické složení.

## Smáčivost

Tato vlastnost je velice důležitá. Charakterizuje schopnost lepidla rovnoměrně rozprostřít na lepeném povrchu jak ukazuje obrázek 16. Souvisí zejména s polaritou povrchového napětí a povrchovým napětím lepidla. Pakliže se lepidlo nerozteče, nemůže dojít k vytvoření kvalitního lepeného spojení (Ebnesajjad, 2014).



**Obrázek 16** Smáčivost povrchu (users.fs.cvut.cz)

---

## 3.2 Historie lepidel

Nejstarší lepidlo bylo nalezeno v jeskyni Nahal Hemar v Izraeli. Nalezli jej v roce 1983 Ofer Bar-Yosef a David Alon. Toto lepidlo bylo používáno jako ochranná vrstva na pletených košících, nádobách a oděvech. Bylo také používáno jako způsob výroby mozaik na lebkách (Walker, 1998).

Lepidla na bázi kolagenu se používaly již Egypťany před čtyřmi tisíci let. Používaly se jako tmel a pravděpodobně i pro vytvoření nábytkových spojů. Egypťané své lepidlo vytvářeli z kůží pomocí zahřívání (Walker, 1998).

## 3.3 Výhody a nevýhody spojování lepením

Jako každá metoda spojování materiálů má i lepení své výhody a nevýhody. Některé vlastnosti, jako například voděodolnost, lze ovlivnit správným výběrem lepidla, ale některé nevýhody odstranit nejde.

### Výhody lepidel

Lepidla vynikají svými vlastnostmi v mnoha ohledech. Jejich velká výhoda při spojování materiálů je možnost spojení různých tloušťek materiálů a velice malých částic materiálů jako například v případě výroby velkoplošných materiálů. Spojovat lepeným spojem lze také materiály, které nelze svařit a s tím souvisí možnost lepení materiálů, které mají úplně jiné vlastnosti a složení. Oproti jiným způsobům je možné v případě lepeného spoje docílit jednoduše plynotěsného a voděodolného spoje, což je například u mechanického spojení materiálu složité. Dalšími přednostmi lepeného spoje je tlumení hluku a vibrací. Spojení lepidlem také nevyžaduje změnu struktury povrchu lepeného materiálu a jednotlivé spojované části nepodléhají deformacím. Při lepení povrchu také nedochází k tepelnému namáhání povrchu. Díky tomu může být zachována a neporušená struktura. V případě spojování tenkých materiálů může dojít díky lepenému spoji k prostorové úspoře v porovnání s mechanickým spojením. Lepené spoje také vynikají ve vysoké pevnosti ve smyku. Lepidla jsou také lehce aplikovatelné jak v případě ruční aplikace, tak v případě aplikace pomocí strojního zařízení (Peterka, 1980).

### Nevýhody lepení

Jakožto každé spojování materiálů má i lepený spoj své velké nevýhody. Jednou z hlavních nevýhod je obtížná nebo skoro nemožná recyklace lepených materiálů z důvodu obtížného odstranění lepidla ze spojovaných materiálů. Tato nevýhoda souvisí



---

s obtížnou demontáží lepených materiálů bez poškození. V případě některých lepidel může být také jako nevýhoda považována omezená životnost lepicích směsí. S tímto je spojené například i nemožnost spojovat materiály při jistých teplotách, anebo bez využití tlaku. Musí být kladen důraz na přípravu lepeného povrchu. Zde se jedná hlavně o odstranění prachu a nečistot, které by ovlivnily pevnost lepeného spoje. Lepidla také vykazují malou tepelnou odolnost, stárnutí lepeného spoje a nízkou pevnost v případě zkoušky odlupu. Mezi nevýhody je také možné zařadit fakt, že plné pevnosti dosahuje spoj až po jisté době (Peterka, 1980).

### **3.4 Rozdělení lepidel**

Rozdělit lepidla můžeme podle různých vlastností. Může to být rozdělení podle skupenství, způsobu vytvrzování, způsobu nanášení, rychlosti vytvrzování, teplotní odolnosti, voděodolnosti a podle doby potřebné na uzavření lepeného spoje. Volba správného lepidla a způsobu nanášení je klíčová pro efektivní a kvalitní výrobní proces. O kvalitě lepeného spoje ale nerozhoduje jen typ lepidla, ale i kvalita a připravenost povrchu. Může se jednat o savost povrchu, pH povrchu nebo například o povrchové napětí (Křupalová, 2004).

#### **Rozdělení podle vytvrzování**

Lepidla mohou vytvrzovat pomocí fyzikálního nebo chemického způsobu. Fyzikální způsob vytvrzování je charakteristický odpařením vody nebo ochlazením taveniny. Zatímco chemický způsob vytvrzování je charakterizován chemickou reakcí, kdy se tvoří z molekul makromolekuly a jejich následným spojením. Může jít o polymeraci, polyadici, a nebo polykondenzaci. Polymerace je reakce, kdy dojde ke zřetězení molekul jedné látky. V případě polyadice dochází ke utvoření prostorových makromolekul a uvolňování vody a polyadice je postupná adice molekul jedné látky a následné vznikání prostorové makromolekuly (ELUC, 2021).

#### **Rozdělení lepidel podle způsobu nanášení**

Způsob nanášení lepidel přímo ovlivňuje výrobu. Nanášet lepidla můžeme pomocí:

- Ručně pomocí štětce,
- Pomocí navalovačky,
- Stříkáním,
- Kartuší,

- 
- Dávkovačem (Mrňa, 2021).

### **PVAc lepidla**

Tato lepidla se zařazují do skupiny termoplastických lepidel. Jedná se o vodné disperze PVAc pryskyřice. Vynikají výtečnou adhezí k řadě materiálů. Používají se zejména na lepení dřeva, papíru, spárovek, textilu apod. Dodávány jsou v hotovém stavu a připraveny na okamžité nanesení jako například obrázek 17 kde vidíme lepidlo které bylo použito v této diplomové práci. Tepelná odolnost lepidel není vysoká. Pohybuje se okolo 50 °C. Vytvrzení lepidla probíhá za normální teplot fyzikálním pochodem. U těchto lepidel je velký rozdíl mezi montážní pevností, tedy po 5-10 minutách od nanesení a konečné pevnosti, která nastává až přibližně po dni vytvrzení. Nános lepidla je obvykle v množství 120 – 200 g/m<sup>3</sup>. Lisovací tlak v případě tvrdých dřevin 0,5 MPa, v případě měkkých dřevin 0,3 MPa. Výhodou lepidla je jeho zdravotní nezávadnost. Mezi hlavní nevýhody řadíme nízkou odolnost proti vodě a fakt, že lepidlo neodolá trvalému zatížení. Mezi nevýhody PVAc lepidel můžeme také uvést to, že tato lepidla v případě lepení dřeva nabobtnávají dřevní vlákna. Mezi nejznámější můžeme uvést Rakoll, Duvilax, Dispercoll, Umacol P a Duplit (Křupalová, 2004).



**Obrázek 17 PVAc lepidlo Hranicoll D4 ([www.miniprof-stroje.cz](http://www.miniprof-stroje.cz))**

### **PUR**

Jinak také polyuretanová lepidla. Mohou být jedno nebo dvousložková. Dvousložková lepidla jsou reaktoplastická, zatímco v případě jednosložkových lepidel se jedná o lepidla termoplastická. Mezi nejsilnější stránky těchto lepidel patří jejich výtečná pružnost, pevnost, odolnost proti vlhkosti a povětrnostním vlivům. Jsou to jedny z nejlepších lepidel na dřevo vůbec. Jejich využití v praxi je velice různorodé. Od lepení dřeva na konstrukční materiály, lepení překližek, výrobu lyží, a nebo lepení kombinace materiálů (Křupalová, 2004).

---

## **Epoxidová lepidla**

Univerzální a výborné lepicí schopnosti dělají z těchto lepidel jedny z nejpoužívanějších lepidel dnešní doby. Těmito lepidly lze lepit skoro všechny materiály. Zejména kovy, reaktoplasty, dřevo a například keramiku. Naopak pro lepení měkkých plastů jako například polystyrenu, polypropylenu, polyethylenu a podobných měkkých termoplastů tento druh lepidla není vhodný. Mimo dřevozpracující průmysl jsou epoxidová lepidla hojně používána i v automobilovém průmyslu například pro lepení karosérií. V případě epoxidových lepidel rozlišujeme epoxidové pryskyřice jednosložkové a dvousložkové. Jednosložková epoxidová lepidla vytvrzují většinou za vysokých teplot a jsou připravené k aplikaci již přímo z balení (Weisz, 2013).

Oproti tomu se dvojsložkové epoxidové pryskyřice vytvrzují až po smíchání složek. Pro správné dávkování se používají dvoukomorové kartuše. Tyto přípravky zabezpečí ideální dávkování lepicí směsi. Obecně platí, že s vyšší okolní teplotou roste i rychlost vytvrzení epoxidových lepidel. Podle složení dělíme epoxidy na tvrdé epoxidy, pružné epoxidy a vyztužené epoxidy (Weisz, 2013).

### **3.5 Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje**

Aby byl dosažen kvalitní a co nejlepší lepený spoj musíme dodržet základní požadavky. Základem je příprava lepeného povrchu. Zde se jedná hlavně o úpravu drsnosti povrchu, povrchového napětí, odstranění nežádoucích látek a nečistot. Dále je důležité vybrat správné lepidlo. Zde je nutno brát ohled zejména na vlastnosti lepených materiálů a prostředí, kterému bude lepený spoj vystaven. Dále je nutnost vybrat správný postup pro nanášení lepidla. Zde jde zejména o rychlost a kvalitu nanášení, případně hospodárnost nanášení lepidla. Dalším důležitým kritériem, které ovlivňuje kvalitu lepeného spoje je tlak. Pakliže na lepený spoj nevyvineme dostatečný tlak může dojít k nerovnoměrnému nanesení lepidla, ale naopak působením velkého tlaku může dojít k vytečení lepidla z lepené spáry. Důležitým faktorem je také teplota, která ovlivňuje vytvrzení lepidla (Osten, 1972).

#### **Vlhkost lepeného materiálu**

Vytvrzování lepidla probíhá nejčastěji pomocí fyzikálních nebo chemických reakcí. Vlhkost lepeného materiálu má největší vliv na fyzikální vytvrzování lepidel, a to díky uvolňování vlhkosti lepidla do lepeného materiálu, což zapříčiní vytvrzení lepidla. Při vysoké vlhkosti může dojít ke zpomalení vytvrzení, a nebo dokonce k zastavení

---

vytvrzovací reakce. Ideální vlhkost dřevěných materiálů pro lepení je  $8 \pm 2$  %. Materiály, které mají vlhkost nižší, přijímají rychlost rychleji a tedy urychlují vytvrzení. Při vysoké vlhkosti dřeva dochází ke snižování viskozity a může vést k vnikání lepidla do dřeva, což má za následek chudý lepený spoj (Trávník, 2008).

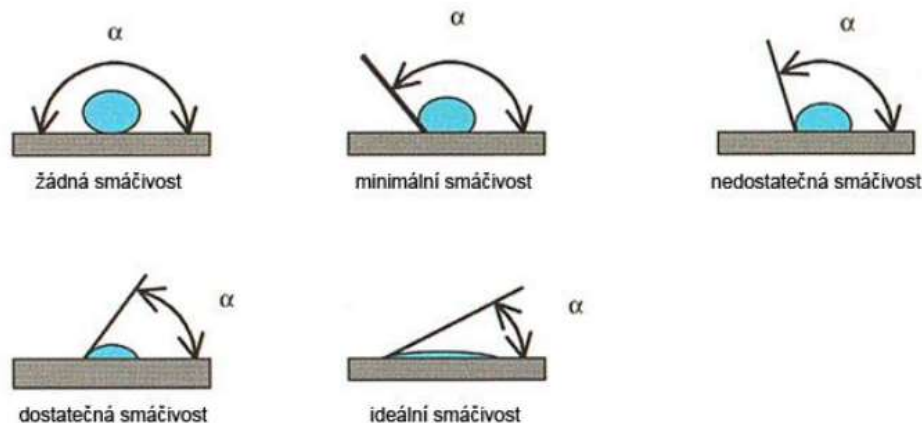
### **Drsnost povrchu**

Nerovnost povrchu, která vzniká při výrobě součástí nazýváme drsnost povrchu. Ovlivnit drsnost povrchu můžeme technologií a technologickými podmínkami při obrábění. Nejčastějším parametrem drsnosti povrchu je  $R_a$ , tedy střední aritmetická odchylka profilu. V případě lepení je drsnost povrchu klíčová. V některých případech se snažíme povrch co nejvíce uhladit a v jiných zdrsňit. Například v případě lepení fólie na velkoplošný materiál je potřeba povrch mít co nejhladší (SPSZENGROVA, 2021). Měření drsnosti se provádí přístrojem tzv. profilometrem

V případě obrábění dřeva laserovým paprskem dosahujeme hodnoty  $R_a$  3,6 až 12mm. Tento rozptyl je dán tloušťkou řezaného materiálu, jeho hustotou a vlhkostí (mmspektrum, 2008).

### **Povrchové napětí a smáčivost**

Na povrchu každého pevného tělesa existují povrchové síly, které na daném povrchu váží vzduch. Tyto síly vztažené na povrch tělesa nazýváme povrchové napětí. Povrchové napětí kapalin způsobuje zmenšení povrchu dané kapaliny a díky tomu brání kapalině v roztečení po povrchu. Podle úhlu smáčení povrchu můžeme hovořit o minimální smáčivosti, nevyskytující se smáčivosti, nedostatečné smáčivosti, dostatečné smáčivosti a ideální smáčivosti jak ukazuje obrázek 18. Brání tedy v kvalitním smáčení povrchu kapalinou. Smáčivost povrchu můžeme charakterizovat jako schopnost kapaliny roztéct a přilnout k povrchu. Schopnost smáčet povrch kapalinou je jednou z nejdůležitějších vlastností lepidel. Je nutností, aby povrchové napětí lepeného povrchu bylo vyšší než-li povrchové napětí lepidla. Pakliže je povrch mastný, a nebo zaprášený zmenšuje se povrchové napětí a tedy se snižuje schopnost lepidla smáčet povrch. Proto je velmi důležitá příprava povrchu lepené plochy (Ebnesajjad, 2014).



Obrázek 18 Úhel smáčení povrchu (nanoed.tul.cz)

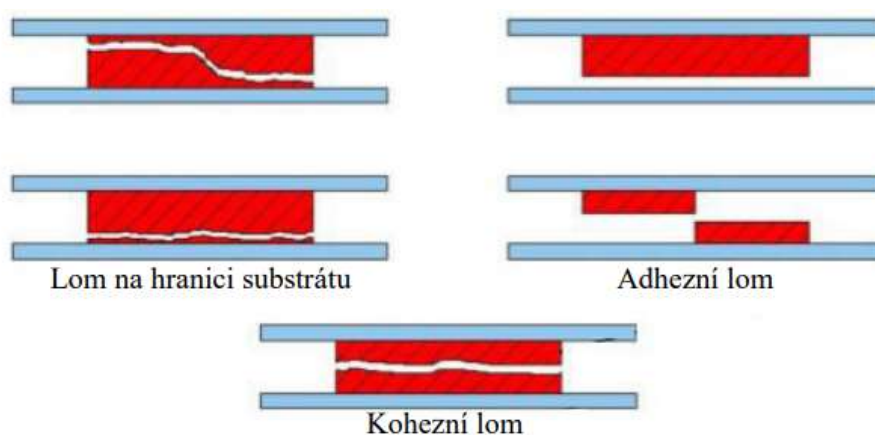
### 3.6 Příprava lepené plochy

Aby byl zajištěn kvalitní lepený spoj, je třeba lepenou plochu kvalitně upravit. Tato fáze zpracování materiálu je klíčová, pakliže se neudělá dobře může dojít k okamžitému rozlepení spoje, nebo k postupnému rozlepení spoje, které může být nebezpečné. Jedná se hlavně o mechanickou úpravu, chemickou úpravu, ionizační úpravu nebo odmaštění. V dřevozpracujícím průmyslu se nejčastěji jedná o úpravu mechanickou a chemickou. Po dělení materiálu například pilovými kotouči není plocha dostatečně připravena k lepení. Tuto plochu je následně nutno dále upravit a to většinou pomocí broušení. Cílem je docílit co nejrovnějšího spoje, aby se docílilo co nejbližšího spojení lepených dílců (Selbo, 1975).

Při obrábění dřeva pomocí laserového paprsku může vzniknout několik nedostatků, které je před lepením potřeba odstranit. Zejména se jedná o opravení kolmosti řezné spáry, která vzniká zejména při velké tloušťce řezaného materiálu. Může dojít také k zuhelnatění řezané spáry. Zuhelnatělá část je třeba odstranit. V případě lepení zuhelnatělé části by došlo k velmi slabému lepenému spoji. V tomto případě by lepidlo přilnulo k zuhelnatělé části a nikoliv k obrobku (Sendílek, 2009).

### 3.7 Typy lomu lepených spojů

Při porušení lepeného spoje vzniká lom. Tyto vzniklé lomy můžeme zařadit do tří základních skupin. V případě adhezivního lomu dochází k odlepení lepidla od adherendu. To znamená, že síly kohezní jsou větší než-li síly adhezní. Pro kohezní lom platí, že síly kohezní jsou menší než-li síly adhezní. To zapříčiní vznik poruchy v oblasti lepidla. K lomu na hranici substrátu dochází v případě, že kohezní síly jsou zde nižší než síly adhezní, ale jejich rozdíl není tak velký, U zkoumání lomu většinou není zapotřebí používat optická zařízení a tedy je typ lomu možný určit pouhým okem jak ukazuje obrázek 19 (Osten, 1982).



**Obrázek 19 Lomy lepeného spoje (Doubek, 2014)**

V případě nejasností lze využít mikroskopu, a nebo jiných zvětšovacích zařízení. Ideální lom ovšem v případě lepení nastane mimo lepenou spáru a tedy v oblasti lepených materiálů. To znamená, že adhezní i kohezní síly vyznačují vyšší pevnost než-li námi spojovaný materiál (Osten, 1982).

---

## 4 Metodika

Experimentální část této diplomové práce se skládala z těchto kroků:

1. příprava zkušebních vzorků,
2. řezání a lepení zkušebních vzorků,
3. zkouška smykové pevnosti lepeného spoje,
4. vyhodnocení zkoušky.

### 4.1 Příprava zkušebních vzorků

Při výběru materiálu, který bych mohl použít pro tuto diplomovou práci, padla volba na bukové dřevo. Zejména proto, že bukové dřevo je velmi často využíváno v nábytkářském a dřevozpracujícím průmyslu a vyznačuje se vynikajícími vlastnostmi. Jedná se o dřevo poměrně tvrdé a těžké. I přes tyto vlastnosti se tato dřevina dobře a čistě obrábí. V nábytkářském průmyslu se tato dřevina využívá hojně například i při ohýbání nábytku. V truhlářině je zase využívána zejména na výrobu parket, železničních pražců či kuchyňského náčiní.

Pro slepení vzorků bylo vybráno PVAc lepidlo Ag-Coll 8761/L D3. Toto lepidlo bylo vybráno díky svým vlastnostem a širokému využití v nábytkářské a truhlářské výrobě.

Dřevní materiál byl obstarán ve firmě WoodStore company. Zjištění vlhkosti dřeva probíhalo v truhlárně FLD podle normy ISO 13061-1. Tento materiál měl vlhkost 16% a bylo tedy potřeba upravit vlhkost materiálu na 0%, 8%, 16% a bod nasycení dřevních vláken.

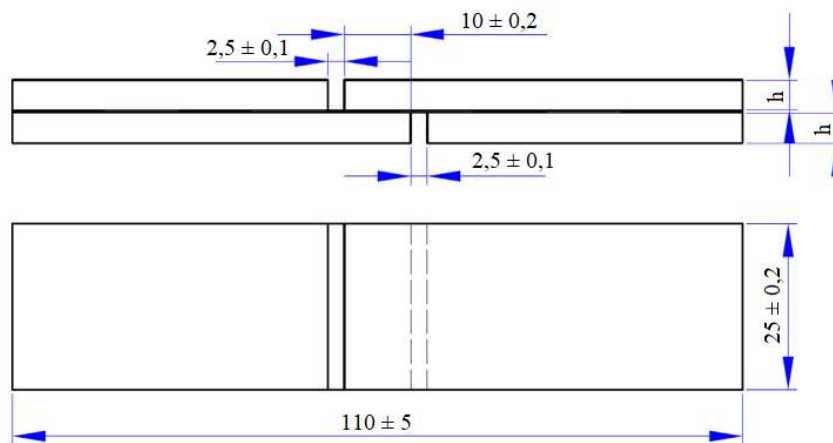
### 4.2 Řezání a lepení zkušebních vzorků

Řezání zkušebních vzorků bylo provedeno na CO<sub>2</sub> laseru značky TRUMPF. Parametry řezání byly upravovány podle potřeb testu. Řezná spára 0,3 mm a fokusační vzdálenost umístěná do 1/3 řezané tloušťky od vrchního povrchu vzhledem ke směru obrábění se dále neměnila. Řezání laserovým paprskem bylo provedeno mimo fakultu Lesnickou a Dřevařskou. Některé faktory, které jsou uvedeny v zadání nedokázaly rozřezat materiál tak, aby došlo ke kompletnímu přerezáni materiálu.

Před samotným lepením zkušebních těles bylo zapotřebí odstranit zuhelnatěnou vrchní vrstvu a to pomocí brusného papíru. Odebereme pouze jemnou vrchní vrstvu. Pro

tento odběr byl vybrán brusný papír drsnosti P-280. Důležité je nesahat na tyto obroušené části z důvodu zanesení mastnoty nebo nečistot.

Poté bylo nanášeno PVAc lepidlo (Ag-Coll 8761/L D3) na obě strany lepených vzorků. Lepidlo nanášíme pomocí válcové nanášečky, viz obrázek 21. Nános lepidla je udáván výrobcem a to  $150 - 180 \text{ g/m}^2$ . Dále postupujeme podle technického listu výrobce lepidla, kdy otevřený čas je maximálně 15 minut. Vzorky vložíme do listu na 16 minut. Výrobce udává lisovací čas 15 až 20 minut. Lisovací tlak volíme také podle technického listu výrobce lepidla a podle normy ČSN EN 205. Pro toto lepení jsem zvolil lisovací tlak  $0,7 \text{ N/mm}^2$ . Následně necháme vzorky podle normy a technického listu 7 dní klimatizovat, abychom dosáhli maximální pevnosti lepeného spoje. Důležité je dát si pozor na to, že tyto vzorky nemohou být obráběny dřív, než 5 dní po lepení. Poté naformátujeme zkušební vzorek na rozměry podle obrázku č 20.



**Obrázek 20** Rozměry zkušebního vzorku pro měření smykové pevnosti. (Gaff, 2020)

$h$  = tloušťka jedné vrstvy  $2 \pm 0,1 \text{ mm}$ .



**Obrázek 21** Příklad válcové nanášečky (www.simek.eu)



---

### 4.3 Zkouška pevnosti lepeného spoje

Smyková zkouška byla provedena na stroji INSTRON 5882 na Karlově Univerzitě. Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN 205. Vzorky byly standardizovaně vyrobeny podle udávaných rozměrů v normě. Pevnost lepeného spoje byla stanovena smykovým namáháním lepeného spoje. Vzorky umístíme do čelistí stroje a poté je podrobíme zkoušce. Tento stroj je vybaven speciálními čelistmi, které zaručí přesné namáhání a redukuje možnost ovlivnění testu z důvodu rozdílné tloušťky jednotlivých vrstev vzorků. Naměřené hodnoty byly zaznamenány pro následující vyhodnocení.



Obrázek 22 Ilustrační fotka INSTRON 5882 (is.cuni.cz)

### 4.4 Vyhodnocení zkoušky

Pro zaznamenání dat byl vybrán program Microsoft Excel a program na zpracování statistiky STATISTICA 13. Data, která byla během zkoušky získána pomocí programu STATISTICA. Zde byla použita metoda testu ANOVA. Před samotným testem ANOVA byl proveden test normálového ověření dat a Grubbsův test pro vyloučení odlehlých hodnot. Pro tuto práci byla vybrána analýza rozptylu, která připouští 5% statistickou chybu.

---

## 5 Výsledky a diskuse

Naměřené hodnoty byly zpracovány a vyhodnoceny v programu STATISTICA 13. V programu STATISTICA byly naměřené hodnoty zpracovány použitím metody ANOVA s využitím Duncanova testu, která je založena na 95% intervalu spolehlivosti. To znamená, že ze 100% připouští maximálně 5% statistickou chybu. Těchto 5% je v absolutních hodnotách 0,05, což označuje hladinu významnosti. Pakliže jsou hodnoty hladiny významnosti v tabulce nižší než 0,05 jsou statisticky významné a pakliže je hodnota hladiny významnosti více než 0,05, pak je tento faktor statisticky nevýznamný.

Statisticky významné hodnoty jsou označeny pro lepší orientaci červenou barvou a statisticky nevýznamné hodnoty jsou v tabulkách označeny černou barvou.

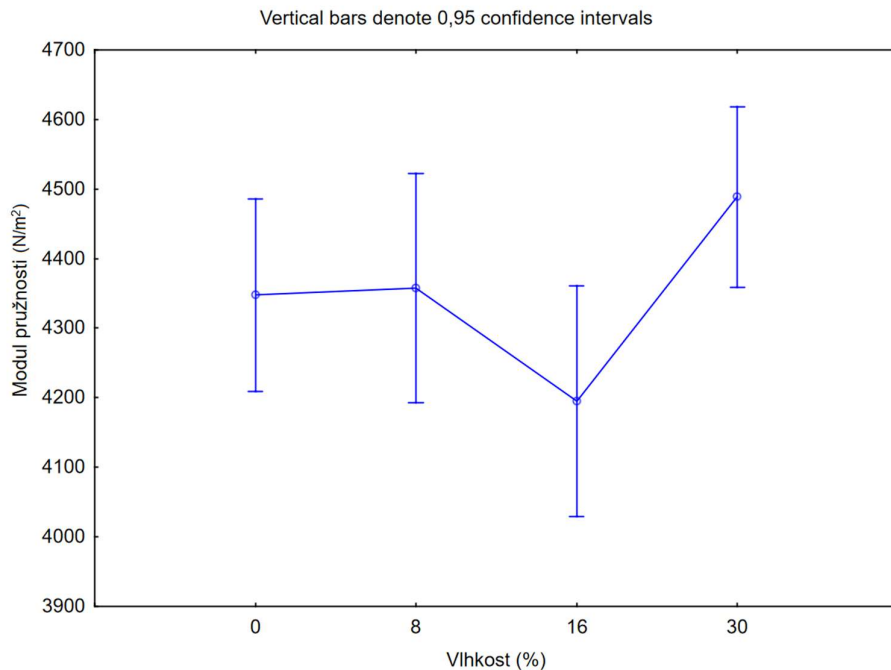
### Výsledek měření modulu pružnosti lepeného spoje

V případě měření modulu pružnosti byly zpracovány data v programu STATISTICA 13. Měření bylo prováděno na vzorcích řezaných při vlhkosti 0%, 8%, 16% a při bodu vlhkosti nasycení dřevních vláken (dále 30%). Na obrázku 23 můžeme vidět rostoucí modul pružnosti v závislosti na vlhkosti obráběných těles. Ovšem v případě vzorků s 16% vlhkostí došlo ke snížení modulu pružnosti. K tomuto snížení modulu pružnosti mohlo dojít z různých důvodů, které by bylo vhodné dále prozkoumat.. Vzorky o vlhkosti 30% dále následovaly trend zvyšování modulu pružnosti.

V tabulce 1 vidíme duncanův test pro modul pružnosti vztažený k vlhkosti při řezání vzorků. Jediné statisticky významné hodnoty byly zaznamenány v případě porovnání vzorků řezaných při vlhkosti 16% a 30 %. V případě těchto vzorků byl nárůst modulu pružnosti sedmiprocentní. V tomto případě se jedná o zlepšení, a to díky vlhkosti, která mírně napomohla k menšímu ovlivnění rezné spáry a tím pádem k lepšímu proniknutí lepidla do lepeného materiálu stejně jako bylo popsáno v článku Gaff a kol. (2020).

**Tabulka 1 Duncanův test vlhkosti vzorků k modulu pružnosti**

	Vlhkost	{1}	{2}	{3}	{4}
		4347,7	4357,6	4195,4	4488,7
1	0		0,923594	0,141573	0,200965
2	8	0,923594		0,140068	0,205832
3	16	0,141573	0,140068		<b>0,008069</b>
4	30	0,200965	0,205832	<b>0,008069</b>	



**Obrázek 23 Vliv vlhkosti na modul pružnosti lepeného spoje**

### **Výsledky smykové pevnosti lepeného spoje**

Na obrázku 24 můžeme vidět smykovou pevnost lepeného spoje těles řezaných při různých vlhkostech. Od nulové vlhkosti řezaných těles se potřebné napětí zvyšuje, ale při 16% vlhkosti nastává prudký pokles potřebného napětí pro porušení spoje. Při vlhkosti řezaného vzorku o 30% vlhkosti se hodnoty vrátili na úroveň vzorku řezaného s vlhkostí 8%. Podle Duncanova testu znázorněného v tabulce 2 jsou statisticky nejvýznamnější hodnoty pro porovnání v případě vzorků obráběných při vlhkosti 8% a 16%. V případě těchto vzorků došlo s přibývajícím vlhkostí k poklesu smykové pevnosti lepeného spoje o 24%. S narůstající vlhkostí při řezání dále smyková pevnost narůstala. Porovnáme-li vzorky obráběné s vlhkostí 16 % a 30 % dojde k nárůstu tlaku s přibývajícím vlhkostí o 29,6%. Podle článku Gaff a kol. (2020) by mělo napětí s přibývajícím vlhkostí při řezání růst. Na základě našich analýz jsme zjistili velký propad hodnot, což může mít za následek chybu v měření způsobenou například nedostatečným odstraněním zuhelnatělé vrstvy. V případě vzorků o vlhkosti 0% a 8% jsou data také statisticky významná a dochází k nárůstu hodnot napětí o 14,1% s rostoucí vlhkostí, což podporuje výsledky článku Gaff a kol. (2020), kdy část energie laseru spotřebuje voda ve dřevě a tím pádem dojde k menšímu ovlivnění řezné spáry a díky tomu PVAc lepidlo lépe pronikne do lepeného materiálu.

**Tabulka 2 Duncanův test vlivu vlhkosti na napětí**

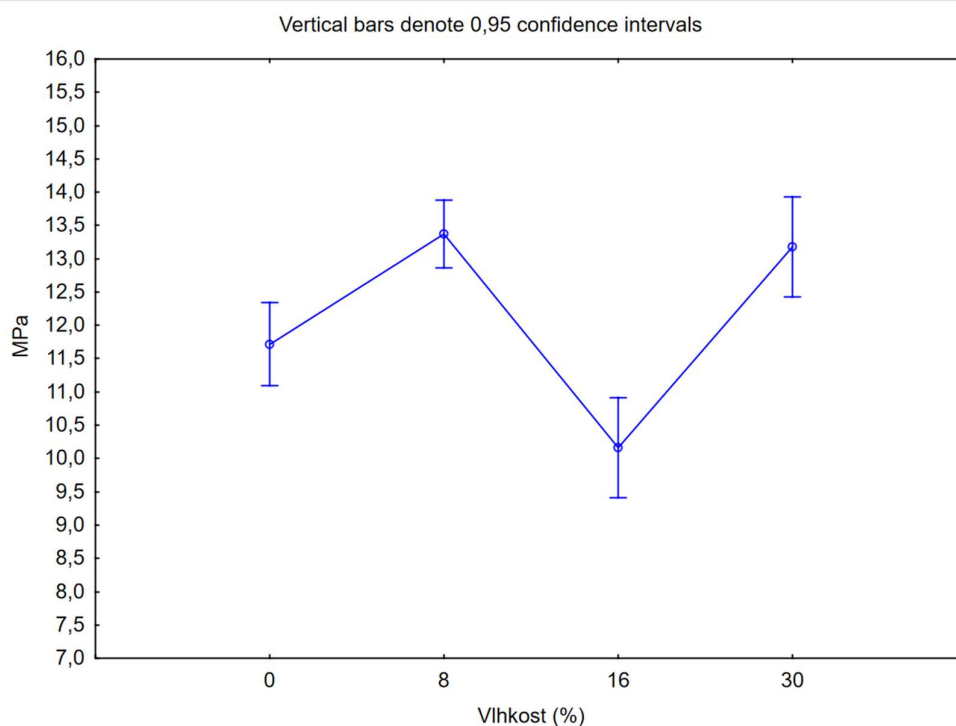
	Vlhkost	{1}	{2}	{3}	{4}
		11,716	13,373	10,165	13,177
1	0		0,000359	0,000592	0,001214
2	8	0,000359		0,000003	0,663857
3	16	0,000592	0,000003		0,000011
4	30	0,001214	0,663857	0,000011	

Pakliže porovnáme mnou naměřené výsledky s článkem, který vypracovali Gaff a kol. (2020), kde byly bukové vzorky řezány laserem o výkonu 5 kW a průměrné rychlosti 3 m/s. Zjistíme, že mnou obráběné vzorky o vlhkosti 8% s průměrnou hodnotou 13,4 MPa napětí potřebného k porušení lepené spáry vykazují vyšší odolnost ve smyku, než udávané hodnoty v článku Gaff a kol. (2020). V případě osmi procentní vlhkosti obráběného vzorku byly mnou naměřené hodnoty přibližně dvakrát vyšší než-li hodnoty uváděné v daném článku. Tím pádem je zřejmé, že obrábění laserovým paprskem s vyšším výkonem je méně vhodný jelikož ve článku Gaff a kol. (2020) bukové vzorky vykazovaly nižší pevnost v případě řezání rychlostí 5 m/s. V případě zkoušených vzorků obráběných při vlhkosti nad bodem nasycení dřevních vláken jsou mnou naměřené hodnoty s průměrnou hodnotou 13,2 MPa vyšší než-li hodnoty, které udává článek Gaff a kol. (2020), což znova podporuje myšlenku, že řezání laserovým paprskem menšího výkonu než 5 kW je lepší, ale v případě článku Iždinský a kol. 2021 byly hodnoty obrábění pilovým kotoučem ještě vyšší. Pohybovaly se v případě suchého bukového dřeva až v hodnotách 15,65 MPa.

Z mnou naměřených hodnot je zřejmé, že nejlepší pevnosti lepeného spoje dosáhneme při řezání dřeva o vlhkosti 8 %. V případě řezání dřeva při této vlhkosti nemusíme posléze již toto řezivo dále sušit a tím pádem není potřeba mít nadměry na sesychání, což by se mohlo projevit kladně v případném zlepšení výtěže materiálu. Bohužel i přes tento kladný fakt je neustále nutné dbát na nadměry, co se týče řezných spár stejně jako udává článek Kubovský a kol. (2020). Je evidentní, že i po jemném odstranění zuhelnatělé vrstvy je nezbytné lepené plochy dále opracovat jak udává článek Rabiej a kol. 1993. Ovlivněná oblast, která vznikla při obrábění laserovým paprskem, má velký vliv na pevnost lepeného spoje.

**Tabulka 3 Porovnání potřebného napětí na porušení lepeného spoje (Gaff a kol, 2020)**

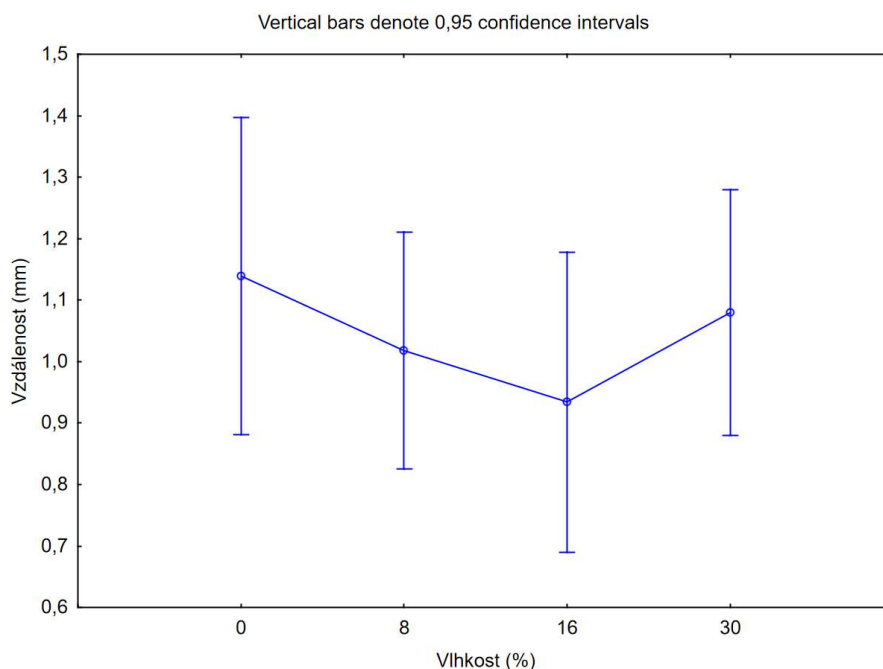
	Vlhkost (%)	Smyková pevnost lepeného spoje (MPa)
Obrábění pilovým kotoučem	8	11,9
Obrábění laserovým paprskem	8	4,2
Obrábění laserovým paprskem	30	6,2



**Obrázek 24 Vliv vlhkosti při řezání na smykovou pevnost lepeného spoje  
Porovnání protažení lepeného spoje**

Z obrázku 25 je patrné, že s rostoucí vlhkostí, při které byly řezány vzorky, dochází ke snižování maximálního protažení lepeného spoje. Od 0 % vlhkosti řezaného vzorku tento trend klesá až po obráběné vzorky o vlhkosti 16 %. Následně dojde k zvětšení potřebné vzdálenosti k porušení spoje. Zde lze předpokládat vliv vlastností lepidla na vlastnosti lepeného spoje, zejména odevzdání vlhkosti PVAc lepidla do lepeného materiálu jak udává článek Iždinský (2021). V případě vzorků řezaných při vlhkosti 16 % je vzdálenost protažení menší o 18 % oproti řezaných vzorků o vlhkosti 0 %. U vzorků řezaných o vlhkosti 30 % se protažení spoje zvětší o 15,6 % oproti řezaným vzorkům s vlhkostí, které mají vlhkost 16%. Při 0% vlhkosti může dojít k nedostatečnému

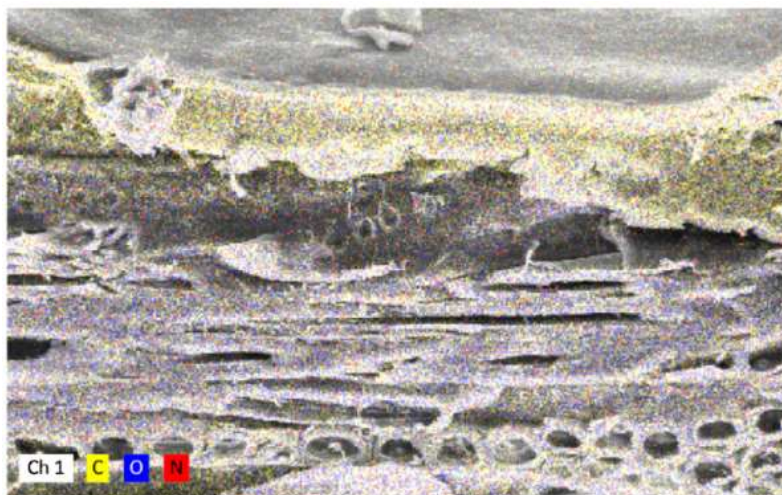
proniknutí lepidla do lepeného povrchu z důvodu zuhelnatělé vrstvy, což vychází z článku Gaff a kol. (2020). Na obrázku 26 můžeme vidět nedostatečné proniknutí lepidla přes zuhelnatělou vrstvu. Následně se stoupající vlhkostí obráběných vzorků může docházet k lepšímu vniknutí lepidla do povrchu a tím pádem je spoj kvalitnější a méně pružný z důvodu menšího zuhelnatění řezné spáry. V případě řezání při vlhkosti blízko bodu nasycení dřevních vláken a následnému lepení nemusí dojít k dostatečnému přesunu vlhkosti a zůstane tedy lepený spoj více pružný a tím pádem se zvětší vzdálenost, než dojde k porušení lepeného spoje Idžinský (2021). Tyto hodnoty podle Duncanova testu nejsou statisticky významné jak dokazuje tabulka 4.



**Obrázek 25** Vliv vlhkosti obráběných vzorků na protažení lepeného spoje bez statistické významnosti

**Tabulka 4** Duncanův test vliv vlhkosti lepených vzorků na vzdálenost protažení

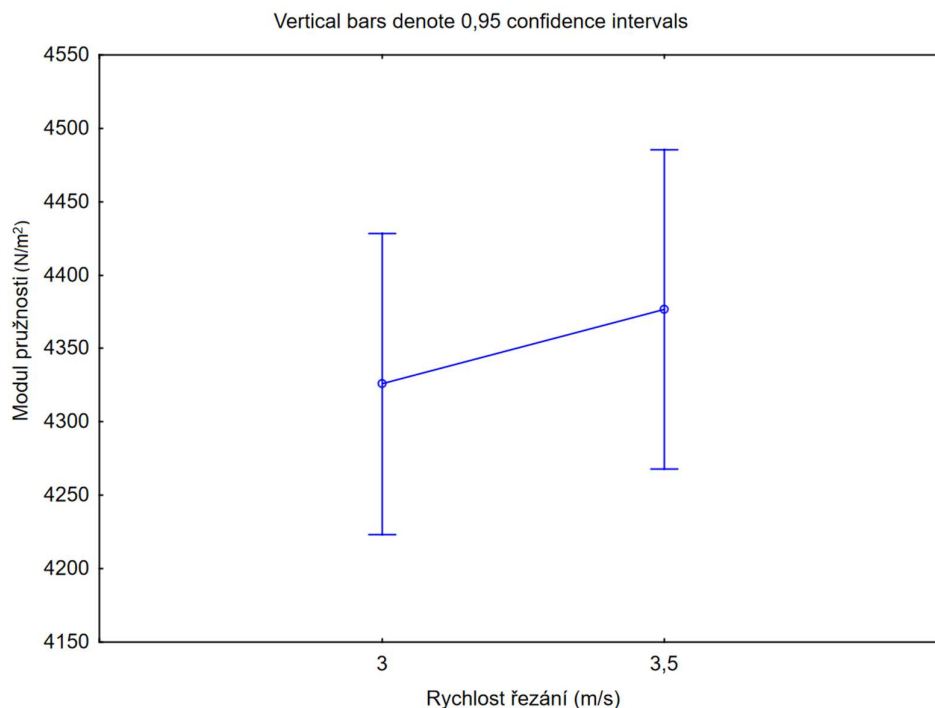
	Vlhkost	{1}	{2}	{3}	{4}
		1,1389	1,0183	0,93417	1,08
1	0		0,490435	0,258347	0,718280
2	8	0,490435		0,606136	0,705369
3	16	0,258347	0,606136		0,403588
4	30	0,71828	0,705369	0,403588	



**Obrázek 26** Zuhelnatělá vrstva bránící impregnaci lepidla (Gaff a kol. 2020)

### Vliv rychlosti řezání na modul pružnosti

Z obrázku 27 níže můžeme vypožorovat, že s vyšší rychlostí řezání dochází k zvyšování modulu pružnosti lepeného spoje. Mezi rychlostmi řezání 3 m/s a 3,5 m/s dochází ke zlepšení o 1,2 %. Tyto hodnoty jsou ale statisticky nevýznamné. Mírné zlepšení může být zapříčiněné menší ovlivněnou oblastí, a to díky kratšímu kontaktu laserového paprsku na místo řezu, což má dopad na tvorbu zuhelnatělé vrstvy.

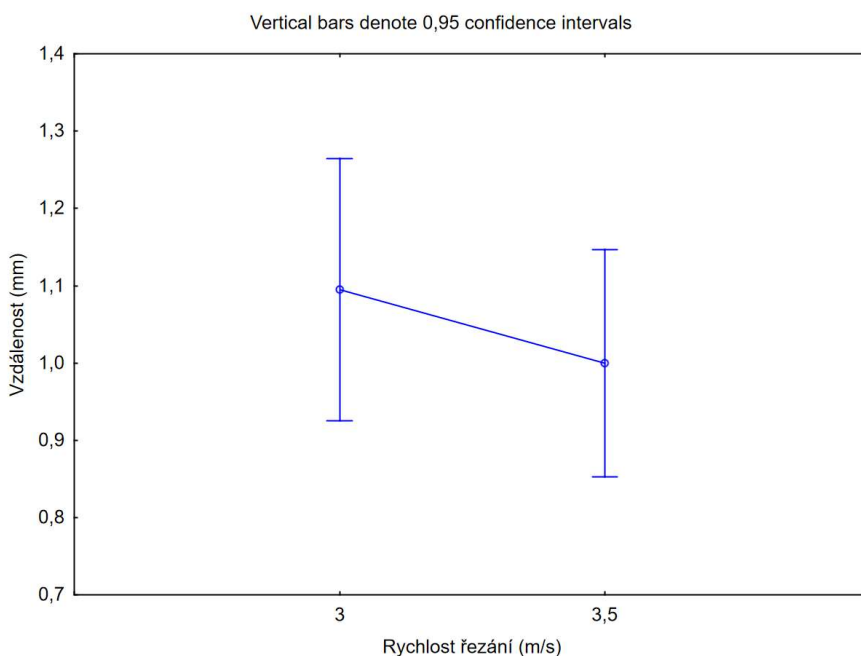


**Obrázek 27** Vliv rychlosti řezání na modul pružnosti lepeného spoje

---

### Vliv rychlosti řezání laserem na maximální protažení lepeného spoje

Vliv rychlosti řezání na celkové protažení lepeného spoje vidíme na obrázku 28. Je jednoznačná a to, že s vyšší rychlostí řezání je spoj méně pružný a je tedy potřeba menší vzdálenosti pro porušení lepeného spoje. V případě rychlosti řezání laserovým paprskem o rychlosti 3 m/s je vzdálenost nutná pro porušení lepeného spoje větší o 9,5% než u vzorků řezaných rychlostí 3,5 m/s. Menší vzdálenost protažení lepeného spoje může být důsledkem kratšího setrvání laserového paprsku v jednom bodě a tedy menším tepelným ovlivněním oblasti obrábění. Díky tomu mohlo lepidlo lépe proniknout do lepené plochy a tím pádem vykazovat menší pružnost. Dle duncanova testu byly hodnoty nicméně statisticky nevýznamné.



**Obrázek 28 Vliv rychlosti řezání na maximální protažení lepeného spoje**

### Vliv rychlosti řezání na sílu potřebnou k porušení lepeného spoje

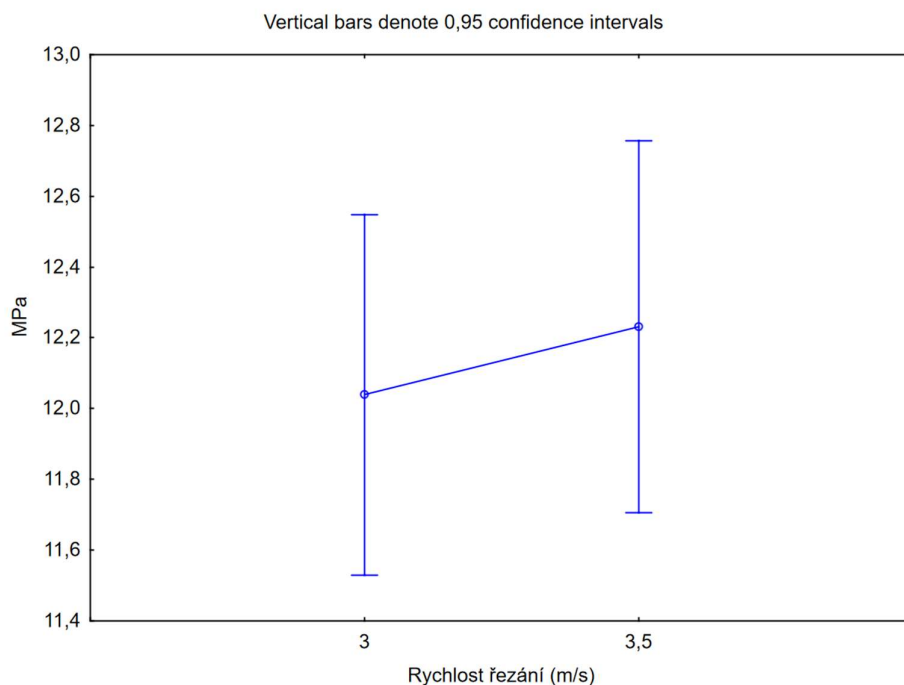
Rychlost řezání ovlivňuje sílu potřebnou k porušení lepeného spoje jen mírně. Průměrné hodnoty při rychlosti obrábění 3 m/s je průměr měření 2,4071 kN a v případě rychlosti řezání 3,5 m/s je průměr naměřených hodnot 2,4460 kN. Z těchto dat vyplývá, že vyšší rychlost řezání jen velice málo ovlivní odolnost lepeného spoje. V případě mnou naměřených hodnot se naměřené hodnoty zlepšily o 1,6%. Tyto naměřené hodnoty jsou ale statisticky podle Duncanova testu nevýznamné



---

## Vliv rychlosti řezání na velikost smykové pevnosti

Z obrázku 29 je patrné, že s vyšší rychlostí řezání laserovým paprskem dochází k nevýznamné zvýšení smykové pevnosti. Podle Duncanova testu jsou tyto hodnoty statisticky nevýznamné.



**Obrázek 29** Vliv rychlosti řezání na velikost smykové pevnosti lepeného spoje

## Vliv vlhkosti obráběného vzorku na sílu potřebnou k porušení lepeného spoje

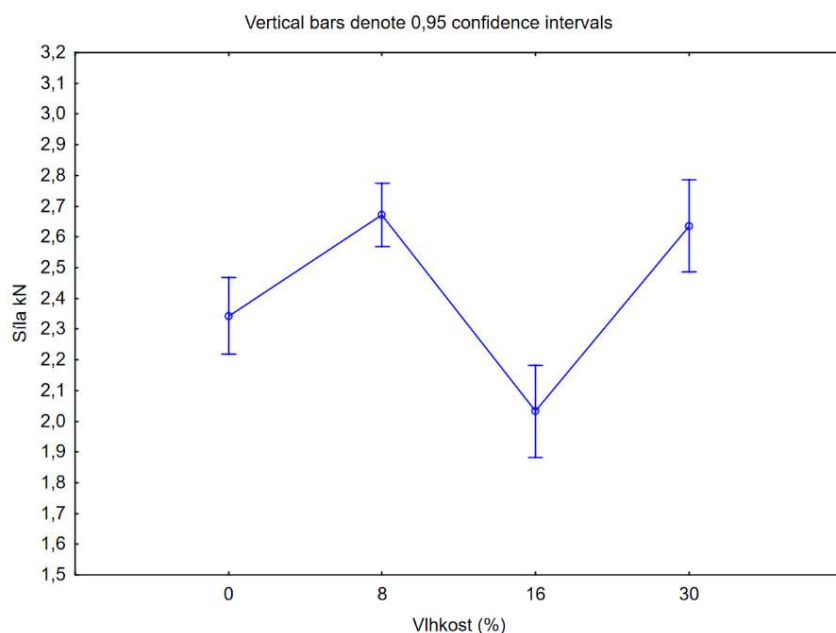
Na základě měření můžeme v případě obráběných vzorků o 16% vlhkosti konstatovat nejmenší množství potřebné síly k porušení lepeného spoje. V tomto případě jsou naměřené hodnoty dle Duncanova testu statisticky významné.

Pro 8% vlhkost vzorků při řezání je potřebná síla k porušení lepeného spoje nejvyšší. V případě vzorků řezaných s vlhkostí 0% je potřebná síla menší o 12,3%. V případě vzorků obráběných při vlhkosti 16% potřebujeme o 23,9% menší sílu, než v případě vzorků řezaných s vlhkostí 8%. Je pravděpodobné, že při obrábění vzorků o vlhkosti 8% došlo ke spotřebování části energie laseru na odpaření vody a tím pádem řezná spára nebyla natolik ovlivněna a proces lepení byl tím pádem nejkvalitnější stejně jako udává článek Gaff a kol. (2020). Důvod poklesu pevnosti v případě vzorků obráběných s vlhkostí 16% není znám. Může se jednat o vadu lepidla nebo případně nedostatečné odstranění zuhelnatělé vrstvy na lepeném povrchu, anebo také pozměněním povrchu tepelně olviněné oblasti lepené spáry. Při statistickém porovnání vzorků

řezaných při 8% a 30% vlhkosti nebyl prokázáný statisticky významný rozdíl podle Duncanova testu znázorněného v tabulce 9. Zde může jistou roli hrát nějaká volná voda ve dřevě, díky které nedošlo k tak velkému tepelnému ovlivnění lepené spáry. Grafické znázornění se nachází na obrázku 30.

**Tabulka 5 Duncanův test vlivu vlhkosti na sílu potřebnou k porušení lepeného spoje**

	Vlhkost	{1}	{2}	{3}	{4}
		2,3432	2,6725	2,0327	2,6354
1	0		0,000391	0,000584	0,001209
2	8	0,000391		0,000003	0,681212
3	16	0,000584	0,000003		0,000011
4	30	0,001209	0,681212	0,000011	



**Obrázek 30 Vliv vlhkosti na sílu potřebnou k porušení lepeného spoje**

### **Porovnání vlivu vlhkosti obráběných vzorků a rychlosti řezání na modul pružnosti lepeného spoje**

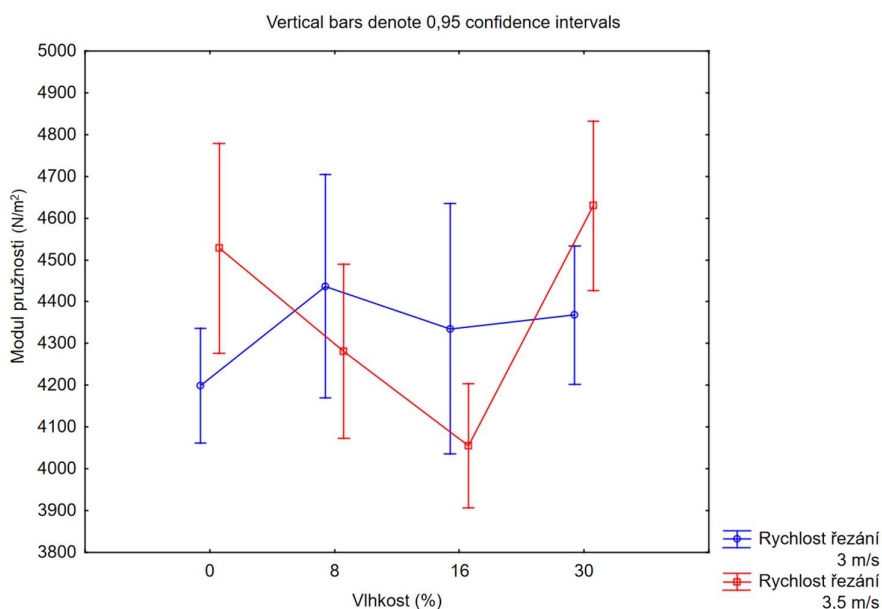
Na následujícím obrázku 31 je analyzován souběžně působící vliv rychlosti řezání a vlhkosti řezaných vzorků na modul pružnosti. V případě rychlosti řezání 3,5 m/s můžeme vidět klesající trend od vzorků řezaných při 0% vlhkosti až ke vzorkům obráběným s vlhkostí 16 % a následně prudké zlepšení v případě vzorků obráběných s vlhkostí 30 %, kde byly také naměřeny nejvyšší hodnoty. V případě obrábění rychlostí 3 m/s můžeme vidět mnohem menší výkyvy naměřených hodnot. Nejlepších výsledků

dosáhly vzorky řezané s vlhkostí 8 % a nejmenší hodnoty jsme zaznamenali při obrábění s vlhkostí 0 %.

Podle Duncanova testu znázorněného v tabulce 10 můžeme porovnat statisticky významná data velikosti modulu pružnosti v případě obou skupin obráběných vzorků s 0 % vlhkostí. Při obrábění rychlostí 3 m/s jsme dosáhli mírného zlepšení o 7,3 % než v případě vzorků obráběných rychlostí 3,5 m/s. Toto zlepšení může mít za následek například vytvoření drsnějšího povrchu, a tedy lepšího využití mechanické teorie lepení, jak udává Kúdela (2018).

Dále můžeme porovnat statisticky významná data v případě vzorků s 0 % vlhkostí obráběných rychlostí 3 m/s a vzorků obráběných rychlostí 3,5 m/s s vlhkostí 30 %. Vzorky s vlhkostí 30% obráběné rychlostí 3,5 m/s vykazují o 10,2 % lepší hodnoty. Může to být díky spotřebování části energie laserovým paprskem a k menšímu ovlivnění okolí řezné spáry. Díky tomu mohlo pravděpodobně lepidlo lépe vniknout do materiálu a díky tomu vytvořit kvalitnější lepený spoj, jak bylo zmiňováno výše.

V případě statisticky nejvíce významných hodnot pro porovnání vzorků s 16 % vlhkostí obráběných rychlostí 3,5 m/s dojdeme ke snížení modulu pružnosti o 12,4 % v porovnání se vzorky obráběnými rychlostí 3,5 m/s a vlhkostí 30 %. Toto zlepšení kvality lepeného spoje má nejspíš za následek menší ovlivnění lepené spáry díky velkému obsahu vázané vody a možné existenci vody volné v lumenech buněk. Tato voda pohltila část energie a tím pádem se vytvořila menší zuhelnatělá vrstva a lepidlo mohlo lépe proniknout do materiálu jako v případě Gaff a kol. (2020).



**Obrázek 31 Vliv Vlhkosti a rychlosti řezání na modul pružnosti lepeného spoje**

**Tabulka 6 Duncanův test pro vliv rychlosti obrábění a vlhkosti na modul pružnosti**

	Vlhkost	Rychlost řezání	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
			4199,3	4527,8	4437,0	4281,2	4335,4	4055,4	4367,9	4629,5
1	0	3		0,04840	0,152704	0,577069	0,385921	0,326826	0,301438	0,008944
2	0	3,5	0,048400		0,536002	0,137171	0,236957	0,003681	0,307500	0,488407
3	8	3	0,152704	0,536002		0,340107	0,518314	0,020223	0,637755	0,218068
4	8	3,5	0,577069	0,137171	0,340107		0,711571	0,147379	0,581457	0,035522
5	16	3	0,385921	0,236957	0,518314	0,711571		0,081294	0,824730	0,073744
6	16	3,5	0,326826	0,003681	0,020223	0,147379	0,081294		0,056479	0,000334
7	30	3	0,301438	0,307500	0,637755	0,581457	0,824730	0,056479		0,104421
8	30	3,5	0,008944	0,488407	0,218068	0,035522	0,073744	0,000334	0,104421	

### Porovnání síly potřebné k porušení lepeného spoje v závislosti na vlhkosti a rychlosti obrábění

Na obrázku 32 níže vidíme jaký vliv má souběžné působení rychlosti obrábění a vlhkost obráběných vzorků na sílu potřebnou k porušení lepeného spoje. Je zřejmé, že trend je v případě obou rychlostí obrábění podobný. V případě rychlosti 3,5 m/s dochází k větším rozdílům hodnot oproti rychlosti obrábění 3 m/s. Nejnižší naměřená hodnota je v tomto případě znovu u vzorků lepených při 16% vlhkosti a obráběných rychlostí 3,5 m/s. Nejvyšších hodnot, ale blízko na hraně statistické významnosti, dosahují vzorky řezané rychlostí 3,5 m/s při 30% vlhkosti.

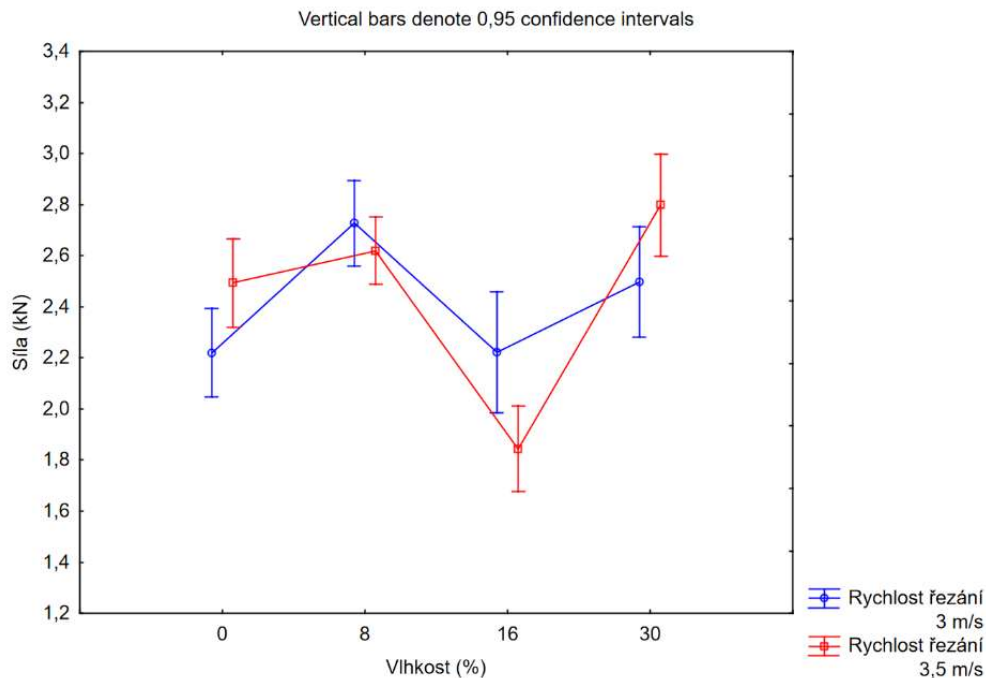
Podle Duncanových testů jsou statisticky nejvíce významná data v případě vzorků s vlhkostí 16% obráběných rychlostí 3,5 m/s. Pakliže tyto vzorky porovnáme se vzorky o stejné vlhkosti (16 %) a nižší řezné rychlosti (3 m/s) dojdeme k závěru, že tyto vzorky vykazují nižší hodnoty potřebné síly nutné k porušení lepeného spoje o 17%. Díky pomalejší rychlosti obrábění mohlo dojít ke zvětšení drsnosti lepeného povrchu a tím pádem k lepšímu využití mechanické teorie lepení.

Největší statisticky významný rozdíl je v případě porovnání vzorků s 16% vlhkostí a rychlostí obrábění 3,5 m/s. Pakliže porovnáme tyto vzorky se vzorky o vlhkosti 8% a stejné řezné rychlosti (3,5 m/s) dojde k nárůstu potřebné síly k porušení spoje o 42%. Tento nárůst je pravděpodobně způsoben vlivem anizotropie a dopadem této vlastnosti na nanos lepidla.

špatnému nanesení lepidla, nebo díky nedokonalému odstranění zuhelnatělé vrstvy v řezné spáře. Usuzuji tak, kvůli faktu, že s rostoucí vlhkostí při řezání od 0 % do 8 % došlo ke zvýšení potřebné síly a v případě vzorků obráběných rychlostí 3,5 m/s o 18%. V případě vzorků, které byly řezány rychlostí 3 m/s došlo ke zvýšení síly o 22,8%. V případě vzorků

obráběných rychlostí 3 m/s došlo také k poklesu naměřených hodnot od vzorků s vlhkostí 8% ke vzorkům s vlhkostí 16%, ale nikoliv v tak velkém množství. Konkrétně o 18%. Tato data ale nejsou statisticky významná. Dále síla, která je potřebná k porušení lepeného spoje stoupla o 12,3%. Je také možné, že v případě vzorků s vlhkostí 16% došlo k nespecifikované změně v oblasti stavby dřeva v důsledku řezání laserovým paprskem.

Pakliže porovnáme soubory u kterých vyšly rozdíly na hranici statistické významnosti, například v případě vzorků obráběných o vlhkosti 0%, můžeme konstatovat, že s rostoucí rychlostí obrábění roste potřebná síla k porušení lepeného spoje. V případě vzorků o vlhkosti 0% jde o nárůst síly o 12,3%. V případě vzorků o vlhkosti 30% došlo s rychlejší variantou obrábění k růstu síly o 12,1%. Díky tomuto faktu můžeme usoudit, že vyšší rychlost řezání působí příznivě na odolnost lepeného spoje. Je to způsobeno menším ovlivněním řezné spáry, a to díky vlhkosti, která absorbovala jistou část energie záření laserového paprsku. Hodnoty pro vzorky o vlhkosti 8% jsou bohužel podle Duncanova testu statisticky nevýznamné.



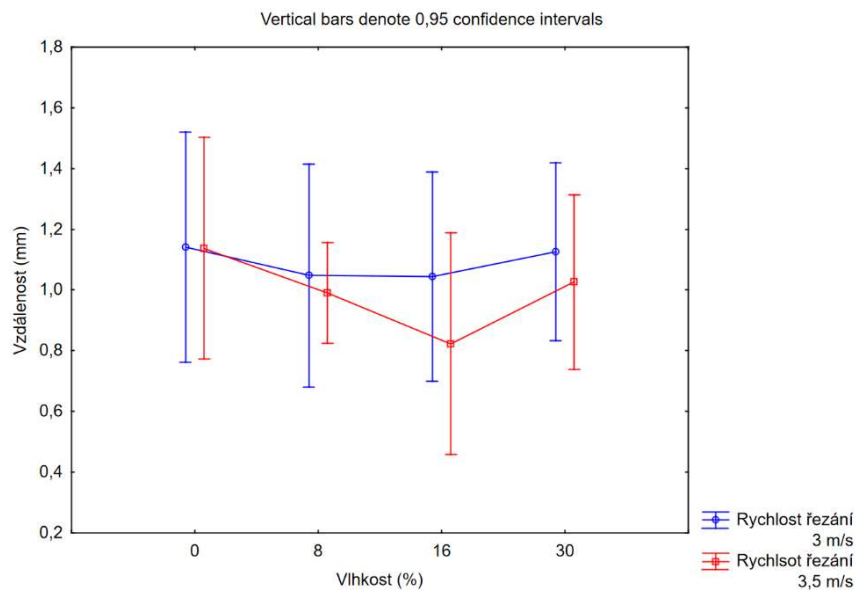
**Obrázek 32 Porovnání síly k porušení lepeného spoje v závislosti na vlhkosti a rychlosti obrábění laserovým paprskem**

**Tabulka 7 Duncanův test vliv vlhkosti a rychlosti řezání na sílu**

	Vlhkost	Rychlost řezání	{1} 2,2200	{2} 2,4929	{3} 2,7269	{4} 2,6200	{5} 2,2221	{6} 1,8433	{7} 2,4957	{8} 2,7983
1	0	3		0,042403	0,000209	0,003802	0,987008	0,003216	0,047382	0,000024
2	0	3,5	0,042403		0,094968	0,352163	0,034173	0,000003	0,982183	0,030928
3	8	3	0,000209	0,094968		0,402945	0,000189	0,000004	0,087160	0,576441
4	8	3,5	0,003802	0,352163	0,402945		0,003520	0,000004	0,330950	0,189757
5	16	3	0,987008	0,034173	0,000189	0,003520		0,004295	0,041800	0,000022
6	16	3,5	0,003216	0,000003	0,000004	0,000004	0,004295		0,000050	0,000005
7	30	3	0,047382	0,982183	0,087160	0,330950	0,041800	0,000005		0,028640
8	30	3,5	0,000024	0,030928	0,576441	0,189757	0,000022	0,000005	0,028640	

### Vliv rychlosti obrábění a vlhkosti při řezání lepených vzorků na protažení lepeného spoje

Z obrázku 33 níže je patrné, že vzdálenost protažení lepeného spoje se v případě obrábění laserovým paprskem rychlostí 3 m/s nijak extrémně neliší. Podle duncanova testu, jak znázorňuje tabulka 12, jsou rozdíly mezi všemi soubory statisticky nevýznamné. Nejvyšší hodnotu, průměrné vzdálenosti potřebné k porušení lepeného spoje, jsme zaznamenali v případě obrábění při vlhkosti 0%. To samé platí i pro rychlost obrábění laserovým paprskem rychlostí 3,5 m/s. V případě rychlosti obrábění 3 m/s jsme nejmenší průměrné vzdálenosti zaznamenali při řezání s vlhkostí 8% a 16%. Tyto hodnoty jsou velmi podobné. V případě rychlosti obrábění 3,5 m/s je ovšem trend klesající se zvyšující se vlhkostí až do případu vzorků obráběných s vlhkostí 16%. V případě vzorků řezaných o vlhkosti 30% se vzdálenost potřebná k porušení spoje zvedá až nad úroveň vzorků řezaných s vlhkostí 8%.



**Obrázek 33 Vliv rychlosti řezání a vlhkosti na maximální protažení lepeného spoje**

**Tabulka 8 Duncanův test vliv vlhkosti a rychlosti řezání na maximální protažení lepeného spoje**

	Vlhkost	Rychlost řezání	{1} 1,1403	{2} 1,1371	{3} 1,0477	{4} 0,99000	{5} 1,0450	{6} 0,82333	{7} 1,257	{8} 1,0267
1	0	3		0,989134	0,720918	0,587496	0,721187	0,253309	0,953215	0,677018
2	0	3,5	0,989134		0,718584	0,589107	0,722247	0,251687	0,960578	0,678928
3	8	3	0,720918	0,718584		0,824010	0,990716	0,397861	0,735767	0,932569
4	8	3,5	0,587496	0,589107	0,824010		0,824771	0,470973	0,610775	0,873997
5	16	3	0,721187	0,722247	0,990716	0,824771		0,389845	0,745099	0,936801
6	16	3,5	0,253309	0,251687	0,397861	0,470973	0,389845		0,261823	0,411159
7	30	3	0,953215	0,960578	0,735767	0,610775	0,745099	0,261823		0,702339
8	30	3,5	0,677018	0,678928	0,932569	0,873997	0,936801	0,411159	0,702339	

### Vliv rychlosti obrábění a vlhkosti vzorků na velikost napětí

Při porovnání vlivu vlhkosti obráběných vzorků a rychlosti obrábění můžeme vidět střídavý trend, kdy při 0% vlhkosti obráběných vzorků je hodnota nižší než v případě vzorků o vlhkosti 8 %. V případě vzorků obráběných s vlhkostí 16 % je potřebná síla k porušení lepeného spoje nejnižší, což je stejné v případě všech mých měření. Následně síla znova roste v případě vzorků s vlhkostí 30 %. Grafické znázornění změny hodnot můžeme pro lepší představu vidět na obrázku 34.

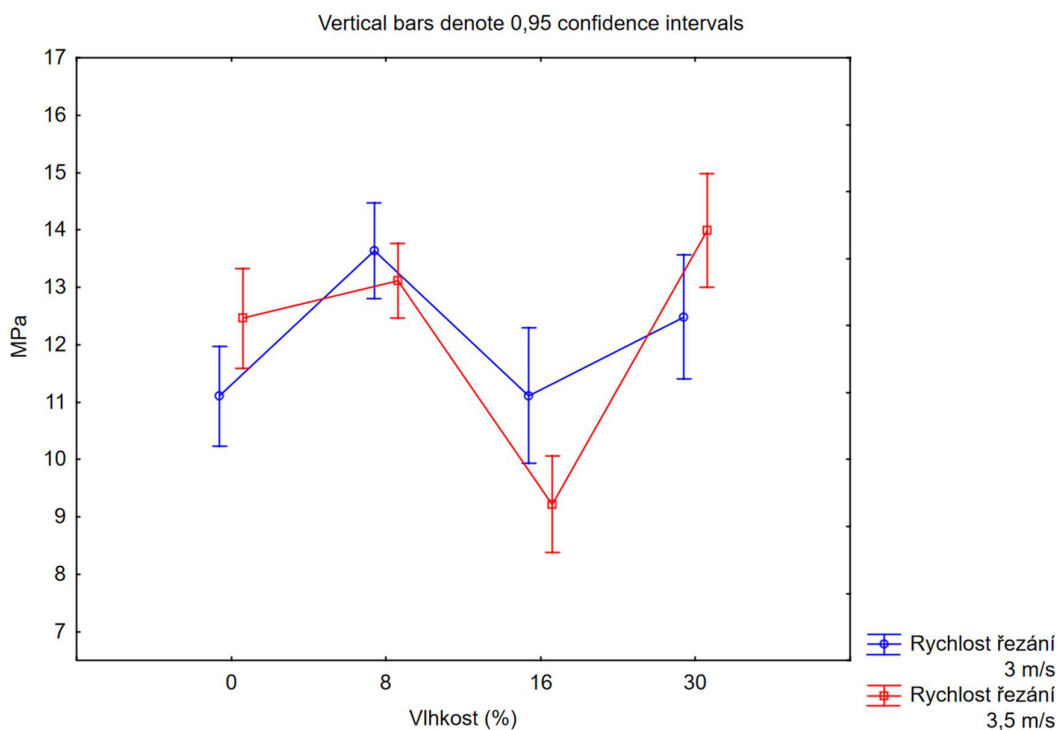
Dle statistické významnosti jsou nejvýznamnější hodnoty pro porovnání mezi vzorky obráběnými rychlostí 3,5 m/s a vlhkostí 0 % a 16 %. Zde můžeme vidět, v případě vzorků s 0 % vlhkostí, lepší hodnoty pevnosti o 20,5 % než v případě obráběných vzorků s 16 % vlhkostí. Při obrábění laserovým paprskem zřejmě došlo v případě vzorků o vlhkosti 16 % a rychlosti obrábění 3,5 m/s k výraznému ovlivnění řezné spáry. Je zde také možnost, že na tento pokles síly měla vliv rychlost obrábění. V případě vzorků obráběných s vlhkostí 16 % a rychlosti obrábění 3 m/s jsou data podle Duncanova testu méně významná, ale došlo zde ke zlepšení o 20,6 % oproti vzorkům s vlhkostí 16 % obráběných rychlostí 3,5 m/s.

Vysokou statistickou významnost vykazuje porovnání řezání vzorků s 0 % vlhkostí a rychlostí řezání 3 m/s oproti vzorkům řezaných s vlhkostí 30 % a rychlostí řezání 3,5 m/s. Zde můžeme vidět nárůst hodnot napětí o 26 % s rostoucí vlhkostí. Tento nárůst potřebného napětí je dán zejména vlivem vlhkosti na obrábění laserovým paprskem. Došlo zde k pohlcení části záření a díky tomu nedošlo k vysokému ovlivnění lepené spáry a lepší funkci lepidla.

V případě porovnání statisticky významných vzorků řezaných při vlhkosti 0 % a 8 % vyrobených při rychlosti obrábění 3 m/s. dojdeme k závěru, že s rostoucí vlhkostí dochází ke zlepšení hodnot napětí. Konkrétně o 22,8 %. Toto zlepšení lze znova přisoudit pozitivnímu vlivu vlhkosti dřeva na kvalitu řezné spáry.

**Tabulka 9 Duncanův test vliv vlhkosti a rychlosti řezání na smykovou pevnost lepeného spoje**

	Vlhkost	Rychlost řezání	{1} 11,105	{2} 12,459	{3} 13,639	{4} 13,117	{5} 11,114	{6} 9,2167	{7} 12,481	{8} 13,988
1	0	3		0,044186	0,000210	0,003594	0,989455	0,003137	0,047826	0,000025
2	0	3,5	0,044186		0,092003	0,335345	0,035412	0,000003	0,971481	0,030670
3	8	3	0,000210	0,092003		0,413689	0,000188	0,000004	0,086707	0,585006
4	8	3,5	0,003594	0,335345	0,413689		0,003135	0,000004	0,320377	0,200128
5	16	3	0,989455	0,035412	0,000188	0,003135		0,004230	0,041900	0,000024
6	16	3,5	0,003137	0,000003	0,000004	0,000004	0,004230		0,000005	0,000005
7	30	3	0,047826	0,971481	0,086707	0,320377	0,041900	0,000005		0,029361
8	30	3,5	0,000025	0,030670	0,585006	0,200128	0,000024	0,000005	0,029361	



**Obrázek 34 Vliv vlhkosti a rychlosti řezání na smykovou pevnost lepeného spoje**

Z naměřených hodnot je zřejmé, že nejhorší vlastnosti vykazují vzorky o vlhkosti 16% a to ve všech zkouškách. Konkrétně při rychlosti obrábění laserovým paprskem 3,5 m/s jsou tyto hodnoty ještě o to horší. Doplněním obrazové analýzy obrobenech ploch by



---

byly vidět přesné změny struktury plochy ke kterým došlo při obrábění dřeva laserem. Na základě naměřených hodnot můžeme konstatovat, že nejlepší kvality lepeného spoje bylo dosaženo při obrábění s vlhkosti vzorků 8% a 30%. Co se týče rychlosti obrábění, zde nelze jednoznačně určit jestli je lepší rychlost obrábění 3 m/s nebo 3,5 m/s, což závisí od ostatních parametrů obrábění. V případě nižších rychlostí řezání by nedocházelo ke splnění podmínek pro úspěšnou zkoušku smykové pevnosti, proto tyto výsledky nejsou v této sekci práce blíže řešeny. Největším nedostatkem bylo neprořezání celého zkušebního vzorku a výrazné zuhelnatění rezné spáry. Proto jsem od těchto parametrů nastavení laserového paprsku ustoupil. U výkonu laseru 1,25 kW a 1 kW byl největším nedostatkem neprořezání celého zkušebního vzorku, což bylo způsobeno tloušťkou řezaného materiálu a nedostatečným výkonem. Jelikož bylo pro řezání využito zařízení soukromého subjektu od těchto zmíněných parametrů bylo ustoupeno.

---

## 6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zanalyzovat vliv různého nastavení parametrů obrábění laserovým paprskem na pevnost lepeného spoje a navrhnout nejlepší možnou variantu obrábění laserovým paprskem. Sledovanými parametry byla rychlost řezání, změna tlaku plynu, výkon laseru a vlhkost při které byly vzorky řezány. Vzorky byly zhotoveny z masivního dřeva (buku) a pro lepení bylo vybráno PVAc lepidlo. Zkouška pevnosti lepeného spoje byla provedena podle normy ČSN EN 205 na stroji INSTRON 5882.

Výsledky zkoušek byly analyzovány za účelem zjištění optimálního nastavení parametrů laserového paprsku při obrábění bukového dřeva. Provedenými zkouškami bylo zjištěno, že při nízkém výkonu laseru a malé řezné rychlosti došlo ke značnému zuhelnatění povrchu. Z hlediska lepení toto nastavení nelze doporučit, jelikož by došlo k lepení zuhelnatělé vrstvy a nikoliv dřeva, čímž by byla pevnost lepeného spoje skoro nulová. Jelikož jsme chtěli provést co nejmenší zásah do lepené plochy, tak jsme z těchto parametrů obrábění upustili. Z výsledku měření je patrný velký vliv vlhkostí, při kterých byly vzorky řezány na pevnost lepeného spoje. Nejlepších výsledků dosahovaly vzorky řezané při vlhkosti 8 % a vzorky řezané při vlhkosti 30 %. V případě rychlosti obrábění 3 a 3,5 m/s nelze hovořit o nějakém výrazném zlepšení, jelikož rozdíl mezi těmito hodnotami není nikterak zásadní. Z daných měření vyplývá, že při rychlosti obrábění 3,5 m/s dochází k mírnému zlepšení vlastností lepeného spoje. Z těchto měření vyplývá, že pro nejlepší výsledky při obrábění laserovým paprskem dosáhneme při řezání bukového dřeva o vlhkosti 8 % a rychlost řezání nastavíme na 3,5 m/s. Tyto hodnoty jsou vyšší než v případě konvenčního obrábění pilovým kotoučem, jak udává článek Gaff a kol. (2020), ale nižší, než udává článek Iždinský a kol. 2021.

V porovnání spoje lepeného PVAc lepidly následně po obráběného laserovým paprskem a kotoučovou pilou dojdeme k závěru, že obrábění laserovým paprskem bez další úpravy lepené plochy je mírně nevyhovující. Lepidlo nepronikne přes zuhelnatělou vrstvu, jak udává Gaff a kol. (2020) a tím pádem není využitý plný potenciál lepeného spoje. V kombinaci náročnosti technologie obrábění laserovým paprskem na strojní zařízení, energetickou náročností provozu laserového paprsku a nutnosti úpravy lepeného povrchu lze konstatovat, že za těchto podmínek je možné využít nekonvenčního obrábění dřeva. Pro praktické využití tohoto obrábění dřeva je následná úprava řezaného povrchu nutná a používaná pro dosažení kvalitnějšího lepeného spoje. V dřevozpracujícím

---

průmyslu je následná úprava řezaného povrchu naprosto standardní záležitostí. Na základě těchto faktů jsem přesvědčen, že v případě velkého důrazu na výtěž v kombinaci s pokročilými skenovacími technologiemi dřeva by tento způsob obrábění mohl mít v nábytkářském průmyslu nebo truhlářské výrobě své místo, a to i přes vysoké pořizovací náklady a energetickou náročnost.

---

## 7 Seznam použité literatury

### Literatura

BALABÁN, Karel. Anatomie dřeva. *Nauka o dřevě*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. Lesnická knihovna (Státní zemědělské nakladatelství).

BARCÍK, Štefan; KVIETKOV, Monika; BOMBA, Jan. *Dřevoobráběcí nástroje - údržba a provozování*. 1. vyd. Praha: Powerprint, 2013. ISBN 978-80-87415-80-1.

BOUBLÍK, Vladimír. *Lepidla a jejich příprava*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1966. 192 s.

DRÁPELA, Jindřich et al. *Výroba nábytku: technologie*. Praha: SNTL, 1980. 484 s.

DOUBEK, Pavel; KOLNEROVÁ, Michaela. *Základy technologie lepení karosářských výlisků*. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-170-2.

EBNESAJJAD, Sina; EBNESAJJAD, Cyrus. *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. 2. vyd. [s.l.]: [s.n.], 2014. ISBN 978-0-323-26435-8.

GAFF, Milan; REZAEI, Fatemeh; SIKORA, Adam; HÝSEK, Štěpán; SEDLECKÝ, Miroslav; DITOMASSO, Gianluca; CORLETO, Romano; KAMBOJ, Gourav; SETHY, Anil; VALIŠ, Michal; ŘIPA, Kamil. *Interactions of monitored factors upon tensile glues hear strength on laser cutwood* [online]. Prague: Czech University of Life Sciences, 2019 [cit. 2021-10-12]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111679>

GANDELOVÁ, Libuše; HORÁČEK, Petr; ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila. *Nauka o dřevě*. 3. nezměn. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.

GERHARDS, C. Charles., 1982. Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate effect. *Wood and Fibre*.

IŽDINSKÝ, Ján; REINPRECHT, Ladislav; SEDLIAČIK, J; KÚDELA, Jozef; KUČEROVÁ, Viera. *Bonding of Selected Hardwoods with PVAc Adhesive* [online]. 2021 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11010067>

JANKOVSKÝ, Miroslav; LACHMAN, Jaromír; STASZKOVÁ, Ludmila. *Chemie dřeva*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, 1999. ISBN 80-213-0559-2.

KŘUPALOVÁ, Zdeňka. *Nauka o materiálech pro 1. a 2. ročník SOU učebního oboru truhlář*. 2. uprav. vyd. Praha: Sobotáles, 2004. ISBN 80-86817-02-04.

KÜRSCHNER, Karel. *Chemie dřeva*. Bratislava: [s.n.], 1952. s. 509.

- 
- KUBOVSKÝ, IVAN; KRIŠŤÁK, LUBOŠ; SUJA, JURAJ; GATJANSKA, MILADA; IGAZ, RASTISLAV; RUŽIAK, IVAN; RÉH, ROMAN *Optimization of Parameters for the Cutting of Wood-Based Materials by a CO2 Laser* Zvolen 2020
- KÚDELA, JOZEF; MRENICA, LEOŠ; JAVOREK, ĽUBOMÍR, JAVOREK *The influence of milling and sanding on wood surface morphology*. Acta Fac. Xylogiae Zvolen
- LYND, Lee R; WEIMER, J. Paul; ZYL, H. van Zyll, PRETORIUS, Isak S. *Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology*. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 66(3): 506-577
- MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2007. s. 28-29. ISBN 978-80-01-03752-2.
- MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2001. 376 s. ISBN 80-7100-853-2.
- OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. Praha: SNTL, 1986. 152 s.
- PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980.
- POŽGAJ, Alexander; CHOVANEC, Dušan; KURJATKO, Stanislav; BABIAK, Marián. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1.
- SANDBERG, Dick; NAVI, Parviz. *Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood*. 1. vyd. Lausanne: EPFL Press, 2012. ISBN 978-2-940222-41-1.
- SANDÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II : obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016. 120 s. ISBN 978-80-248-3944-8.
- SVELTO, Orazio. *Principles of lasers*. 4. vyd. New York: Plenum Press, 1998. ISBN 978-1-4757-6266-2
- SARVAŠOVÁ KVIETKOVÁ, Monika. *Obrábění dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, 2015. ISBN 978-80-213-2604-0.
- SELBO, Magnus Leonard. *Adhesive bonding of wood*. New York: Drake, 1978.
- SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky*. 1. vyd. Praha: Academia, 1990. 195 s. ISBN 80-200-354-1.
- SPUR, Günter; STÓFERLE T. *Handbuch der Fertigungstechnik*. Band 4/I, Abtragen, Beschichten, Carl Hanser Verlag. München Wien 1987
-

---

TRÁVNÍK, Arnošt. *Technologické operace výroby nábytku*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2005. ISBN 978-80-7157-865-9.

VOTRUBOVÁ, Olga. *Anatomie rostlin*. Praha: [s.n.], 1996. s. 192. ISBN 80-246-0367-5

### **Elektronické zdroje:**

GREGOR, Miroslav. Technologie a technika lepení – základní informace. [online] *Lepidla.cz*. 2021 [cit. 2021-06-07] Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>

JANÍČKOVÁ, Petra. *Sbližování teorie s praxí*. [online]. 2012 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/laser-projekt-sablona.pdf>

KOCOUREK, Rudolf. *Lepidla. Zpracování dřeva* [online]. 2015 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1946>

Koheze. [online] *Lepidla online*. 2022 [cit. 2021-06-07] Dostupné z: <https://www.lepidla-online.cz/slovnicek-pojmu/koheze-7/>

KUSALA, Jaroslav. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>

LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. [online]. 2010 [cit. 2021-10-01]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>

LEAR, a.s. *Základy teorie lepení* [online]. 2021 [cit. 2021-06-07] Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie\\_lepeni%20\\_%20LEAR.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf)

Makroskopická stavba dřeva. [online] *Nábytkářský informační systém*. 2013 [cit. 2021-10-16] Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/makroskopicka-stavba-dreva/page/318/>

MRŇA, Libor. *Lepení materiálů*. [online] 2021 [cit. 2021-06-07] Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_lepeni\\_materialu\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf)

NOVÁK, Miroslav. *Seriál na téma lasery – základní princip laseru a jeho dělení* [online]. Lao.cz. 2011 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>

RABIEJ, RJ; RAMRATTAM, SN; DROLL, WJ. *Glueline shear-strenght of laser-cut wood* [cit. 2022-03-03] Forest product journal ISSN 0015-7473

ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění - 5. díl. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2022-04-07]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-5-dil>

---

SPSZENGROVA. Drsnost povrchu 2021 [online] [cit. 2021-10-16] Dostupné online:  
[https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Drsnost\\_povrchu.pdf](https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Drsnost_povrchu.pdf)

HOMEL.

VVUD, *Ochrana dřeva: Sborník přednášek*, Výzkumný a vývojový ústav Březnice [online]. 2005 [cit. 2021-05-09]. Dostupné z:  
[http://drevari.humlak.cz/data\\_web/Data\\_skola/HUdrevva/12.pdf](http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdrevva/12.pdf)

WALKER, Amélie. Oldest glue discovered [online]. *ARCHEOLOGY*. 1998 [cit. 2021-07-07] Dostupné z: <https://archive.archaeology.org/online/news/glue.html>

WEISZ, Miroslav. *Lepidla – rozdělení lepidel, teorie lepení* [online]. 2013 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/lainey/lepidla-rozd-len-lepidel-teorie-lepen>

Zkoušení stavebních materiálů 2021 [online] [cit. 2021-10-16] Dostupné online:  
[https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo\\_zk](https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zk)

(N/m<sup>2</sup>)

# Přílohy

## Příloha 1

Technický list použitého PVAc lepidla

Technický list  
AG-COLL 8761/L D3

### AG-COLL 8761/L D3

<b>Popis produktu:</b>	Jednosložkové disperzní lepidlo s výbornou odolností vůči vodě, které splňuje požadavky normy DIN - EN 204 pro lepidla kategorie D3. Speciálně určené pro lepení dřeva interiérových prvků umístěných ve vlhkých místnostech.	
<b>Báze:</b>	PVAc	
<b>Technické údaje:</b>	Viskozita [mPas]:	5000-7000 při 23°C
	Obsah sušiny [%]:	49-51
	Hustota [kg/l]:	0,9-1,1
	pH:	3,8-4,5
	Barva:	bíla, mléčná
<b>Doporučený způsob zpracování:</b>	Optimální podmínky použití lepidla AG-COLL 8761 D3: Teplota materiálu, prostředí a lepidla [°C]: 18-22 Vlhkost dřeva [%]: 8-12 Relativní vlhkost vzduchu [%]: 65 – 75 Nános lepidla: jedno nebo dvoustranný Množství [g/m <sup>2</sup> ]: 150 – 180 Otevřený čas [min]: 15 Lisovací tlak [N/mm <sup>2</sup> ]: 0,2 až 0,8 Lisovací čas [min]: 15 až 20	
	Vhodné k lepení měkkého a tvrdého dřeva, k lepení laminátových a melaminových papírů na dřevotřísku, MDF a také při výrobě nábytku do kuchyně nebo koupelny, kde se požaduje odolnost vůči vlhkosti.	
	Při lepení tvrdého dřeva je třeba použít materiál s konstantní vlhkostí a kvalitním zpracováním, aby se předešlo snížení kvality spoje a výsledné odolnosti vůči vlhkosti. K dosažení maximální odolnosti vůči vlhkosti naneste lepidlo na oba lepené povrchy. Maximální voděodolnosti je dosaženo po 7 dnech. Velmi nízké teploty mají negativní vliv na lisovací čas. Vysoká vlhkost dřeva (>12%) zpomaluje vytvrzování lepidla a prodlužuje lisovací čas. Lisovací čas závisí také od prostředí a použitých materiálů. Zabraňte kontaktu lepidla s barevnými kovy (Zn, Sn, Cu, Al, mosaz), aby se předešlo zabarvení lepeného spoje. Lepidlo je připravené k okamžitému použití. Neřeďte ho.	
<b>Balení:</b>	1080 IBC kg kontejner; 10, 30 kg kbelík; 0,25, 0,5 l kg láhve	
<b>Skladování:</b>	Minimální doba uskladnění v originálních a dobře uzavřených obalech v suchém a chladném prostředí (5 - 20 ° C) je 12 měsíců od vyskladnění. Teplota skladování by neměla překročit 25°C během skladování. Držte dál od zdrojů tepla.	