



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## ZLEPŠOVÁNÍ VLASTNOSTÍ DŘEVA V LETECTVÍ

IMPROVEMENT OF WOOD PROPERTIES IN AVIATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Matěj Novosád**

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. František Löffelmann, Ph.D.**

**BRNO 2024**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Matěj Novosád**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. František Löffelmann, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Zlepšování vlastností dřeva v letectví

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dřevo bylo hojně využíváno v počátcích letectví díky relativně vysoké měrné tuhosti a pevnosti a díky zkušenostem s jeho zpracováním z dalších oborů. Postupně však bylo nahrazeno kovovými a kompozitními materiály, takže dnes se s dřevěnými konstrukcemi můžeme setkat jen u některých (ultra)lehkých letadel. Nabízí se tedy vysvětlení, že v letectví se tradiční materiály na bázi dřeva většinou nevyplácí používat. To ovšem neznamená že by dřevo nešlo využít novým způsobem, za použití nových technologií, které zlepšují jeho vlastnosti, nebo jako složka jiných kompozitů.

### Cíle bakalářské práce:

- 1) Stručně charakterizujte mechanické a strukturní vlastnosti dřeva, které budou použity v dalších částech BP.
- 2) Proveďte rešerši leteckých konstrukcí využívajících dřevo.
- 3) Proveďte rešerši metod pro zlepšování užitečných vlastností dřeva pro letecké konstrukce, včetně dostupných dodavatelů materiálu.
- 4) Vyhledejte a popište nové a perspektivní technologie zlepšování vlastností dřeva a jeho využití.

### Seznam doporučené literatury:

JUNGSTEDT, Erik, Céline MONTANARI, Sören ÖSTLUND a Lars BERGLUND. Mechanical properties of transparent high strength biocomposites from delignified wood veneer. Composites Part

A: Applied Science and Manufacturing [online]. 2020, 133, 105853. ISSN 1359-835X.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105853>

ROSS, Robert. Wood handbook: Wood as an engineering material. General Technical Report FPLGTR-282. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2021 Dostupné z: <https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/62200> .

SONG, Jianwei, Chaoji CHEN, Shuze ZHU, Mingwei ZHU, Jiaqi DAI, Upamanyu RAY, Yiju LI, Yudi KUANG, Yongfeng LI, Nelson QUISPE, Yonggang YAO, Amy GONG, Ulrich H. LEISTE, Hugh A. BRUCK, J. Y. ZHU, Azhar VELLORE, Heng LI, Marilyn L. MINUS, Zheng JIA, Ashlie MARTINI, Teng LI a Liangbing HU. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. Nature [online]. 2018, 554(7691), 224–228. ISSN 1476-4687. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nature25476>.

SUN, Xiaofeng, Minjuan HE a Zheng LI. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. Construction and Building Materials [online]. 2020, 249, 118751. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118751>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Práce se zaměřuje na zlepšování užitných vlastností dřeva v letectví pomocí známých metod jeho modifikace. Souhrnně jsou popsány strukturní a mechanické vlastnosti dřevin společně se základním přehledem některých leteckých konstrukcí využívající dřevo. Podstatnou část práce tvoří popis jednotlivých metod modifikace včetně jejich dopadů na mechanické vlastnosti dřeva. Práce je zakončena souhrnem některých dodavatelů dřeva coby materiálu pro konstrukci letadel a dále také popisem některých nových metod modifikace.

## **Klíčová slova**

dřevo, modifikace, mechanické vlastnosti dřeva, strukturní vlastnosti dřeva, dodavatelé dřeva, letouny, kluzáky, acetylace, furfurylace, DMDHEU, impregnace

## **Summary**

The work focuses on improving the useful properties of wood in aviation using known methods of its modification. The structural and mechanical properties of wood are described together with a basic overview of some aircraft structures using wood. A substantial part of the work consists of a description of individual modification methods, including their impact on the mechanical properties of wood. The work ends with a summary of some suppliers of wood as a material for aircraft construction and also with a description of some new methods of modification.

## **Keywords**

wood, modification, mechanical properties of wood, structural properties of wood, wood suppliers, airplanes, gliders, acetylation, furfurylation, DMDHEU, impregnation

## **Bibliografická citace**

NOVOSÁD, Matěj. *Zlepšování vlastností dřeva v letectví*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157370>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce František Löffelmann.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že je tato práce mým dílem a zpracoval jsem jí samostatně pod vedením  
Ing. Františka Löffelmanna, Ph.D.

Matěj Novosád

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mojí práce Ing. Františku Löffelmannovi, Ph.D., za vedení mojí bakalářské práce, ochotu, rady a věcné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat především rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.



# Obsah

Úvod .....	11
1 Strukturní a mechanické vlastnosti dřeva .....	12
1.1 Strukturní vlastnosti.....	12
1.1.1 Obecné strukturní vlastnosti .....	12
1.1.2 Strukturní vlastnosti jehličnatých dřevin.....	12
1.1.3 Strukturní vlastnosti listnatých dřevin.....	13
1.2 Mechanické vlastnosti .....	14
1.2.1 Obecné mechanické vlastnosti .....	14
1.2.2 Pružnost.....	14
1.2.3 Pevnost .....	15
1.2.4 Tvrdost.....	15
1.2.5 Ohýbatelnost .....	16
1.3 Mechanické vlastnosti některých dřevin používaných v letectví.....	16
1.3.1 Smrk sitka .....	16
1.3.2 Douglaska tisolistá .....	17
1.3.3 Ostatní dřeviny .....	17
2 Letecké konstrukce využívající dřevo.....	18
2.1 Kluzáky .....	18
2.1.1 Lilienthal Normalsegelapparat .....	18
2.1.2 Airspeed Horsa .....	18
2.2 Letouny .....	19
2.2.1 Wright Flyer .....	19
2.2.2 De Havilland DH-98 Mosquito .....	20
2.2.3 Spacek SD-1 Minisport.....	20
2.3 Kosmonautika .....	21
2.3.1 LignoSat .....	21
3 Metody zlepšování vlastností dřeva v letectví.....	23
3.1 Důvody zlepšování .....	23
3.2 Chemická modifikace .....	23
3.2.1 Acetylace.....	24
3.2.2 Modifikace pomocí DMDHEU.....	27
3.2.3 Furfurylace.....	28
3.2.4 Impregnace pryskyřicemi .....	31
3.2.5 Impregnace křemičitanem sodným.....	32

3.2.6	Ostatní metody chemické modifikace .....	34
3.3	Mechanická modifikace dřeva .....	34
3.3.1	Lisování dřeva .....	34
3.3.2	Překližka.....	37
4	Dodavatelé materiálu .....	39
4.1	Severní Amerika .....	39
4.1.1	Aircraft Spruce & Specialty Co.....	39
4.2	Evropa .....	39
4.2.1	Touchwood .....	39
4.2.2	Aircraftspruce.eu .....	40
4.2.3	Plywood for Europe .....	41
4.2.4	Letecké dřevo .....	41
5	Nové a perspektivní metody.....	42
5.1	Transparentní dřevěné materiály .....	42
5.2	Kompozity ze dřeva.....	45
5.2.1	Glulam vyztužený FRP.....	46
5.3	Nanotechnologie.....	48
Závěr .....		50
Obsah použitých zdrojů .....		53
Seznam obrázků.....		60
Seznam grafů .....		60
Seznam tabulek .....		61

# Úvod

Dřevo bylo využíváno jako konstrukční materiál od počátku věků. Díky jeho jedinečným vlastnostem a hojnosti našlo využití ve spoustě nejen technických odvětví.

Jedním z těchto odvětví se stalo od začátku 20. let i letectví. Jisté pokusy s létáním se objevily již dříve, ale až v roce 1903 spatřilo světlo světa první motorové letadlo. Na počátku této éry bylo dřevo hlavním konstrukčním materiálem pro stavbu letadel. S postupným technologickým vývojem dřevo postupně nahradily kovy, slitiny kovů a kompozity. Tyto materiály měly vhodnější strukturní, pevnostní a fyzikální vlastnosti pro stavbu letadel. Dřevo tak zůstalo upozaděno a je nyní využíváno jen zřídka na některé součásti letadel.

Doba se však změnila a s ní i technologické postupy na úpravu dřeva. Nynější metody dokážou velmi významně ovlivnit vlastnosti dřeva. Může se dřevo opět dostat na piedestal konstrukčních materiálů používaných při stavbě letadel? V dnešní době, kdy se značně hledí i na enviromentalistiku, by to mělo svou podstatu. Dřevo se dá totiž považovat za ekologický, resp. plně obnovitelný materiál.

Musíme však brát v potaz fakt, že povaha dřeva závisí na druhu dřeviny, ze kterého je získáno. Každá dřevina má své jedinečné vlastnosti. Z toho nám plyne, že ne každé dřevo je pro využití v leteckém průmyslu vhodné. Dále je potřeba mít na paměti, že se jedná o přírodní materiál, tudíž se nedají s jistotou zaručit zcela stejné vlastnosti u jednoho typu dřeviny. Vhodným pěstováním, kontrolami a zpracováním však lze tuto nevýhodu z části eliminovat. Oproti konvenčním materiálům má dřevo i své nedostatky, jako je hořlavost. Některé druhy modifikace však dokážou i tyto slabiny eliminovat.

Je také potřeba zmínit, že i moderní způsoby úpravy dřeva mají své limity. Závisí jak na dřevě, tak na typu úpravy. Nesmírně důležitou roli má i ekonomické hledisko. Mnoho z moderních způsobů úpravy dřeva je ekonomicky velmi nákladných, proto se výrobcům vyplatí sáhnout po konvenčních materiálech. S postupem času by však měly tyto metody zlevňovat a mohli bychom se s nimi potkávat častěji.

# 1 Strukturní a mechanické vlastnosti dřeva

## 1.1 Strukturní vlastnosti

### 1.1.1 Obecné strukturní vlastnosti

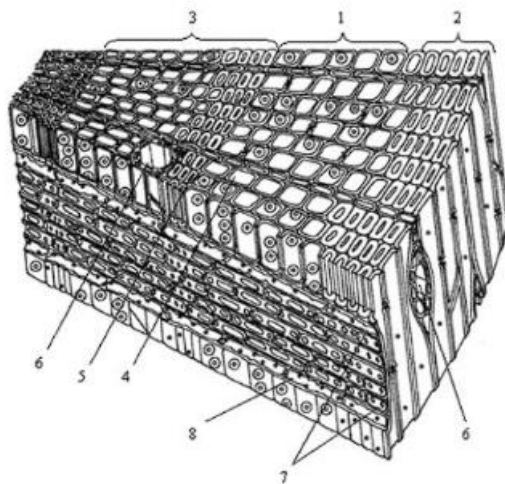
Jak bylo zmíněno již v úvodu, každá dřevina má své specifické vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou závislé na struktuře, hustotě, vlhkosti. Strukturu můžeme posuzovat z hlediska makroskopického a mikroskopického. Zaměříme se na mikroskopickou strukturu, jelikož je významnější vzhledem k zadání a cílům práce.

Obecně můžeme říct, že jehličnaté stromy mají jinou strukturu oproti listnatým. Listnaté stromy obsahují více druhů buněk, z nichž každý druh má svou funkci. Tyto funkce mohou být např. vodivé, zásobní, zpevňující nebo vyživovací [1]. Buňky se stejnými vlastnostmi tvoří pletiva. Tato pletiva pak utváří dřevo jako celek. Některé druhy buněk jsou společné jak pro listnaté, tak pro jehličnaté stromy. Těmi jsou cévice a parenchymatické buňky [1]. Dalším společným znakem je chemické složení struktury dřeva. Veškeré dřevo obsahuje celulózu, hemicelulózu a lignin. Celulóza a hemicelulóza se vyskytuje ve stěnách buněk, lignin v mezibuněčném prostoru [2].

### 1.1.2 Strukturní vlastnosti jehličnatých dřevin

Jehličnaté dřevo má jednodušší strukturu, protože je vývojově starší [3]. Jeho strukturu tvoří pouze dva typy buněk. Těmi jsou cévice (tracheidy) a parenchymatické buňky. Cévice se ve struktuře dřeva vyskytují asi z 90 %, zbytek tvoří výše zmíněné parenchymatické buňky [4]. Cévice dělíme na jarní a letní. Jejich orientace jsou většinou vertikální. Liší se svými rozměry, vlastnostmi a funkcí. Jarní jsou menší, mají tenčí stěnu a plní funkci vodivou, tzn. že se podílejí na vedení látek dřevem. Letní jsou naproti tomu větší se silnější stěnou a plní funkci mechanickou [1]. Parenchymatické buňky pak mají především funkci vodivou a zásobní. Vytvářejí struktury, jako jsou dřeňové paprsky nebo u některých dřevin pryskyřičné kanálky, které se podílejí na vedení a uchování látek.

Obecně se dá díky těmto strukturním vlastnostem říct, že dřevo jehličnanů je vesměs měkčí než dřevo listnatých dřevin.

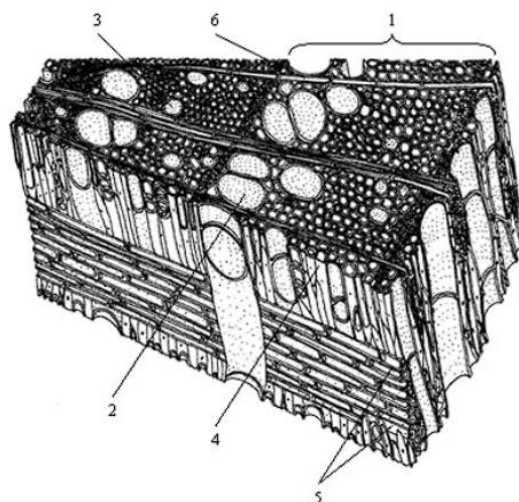


Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997): 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida, 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřevňový paprsek, 8 – příčná tracheina

Obrázek 1: Struktura jehličnatých dřevin [1]

### 1.1.3 Strukturní vlastnosti listnatých dřevin

Jak již bylo naznačeno, vývojově mladší listnaté dřeviny jsou strukturně složitější. Obsahují větší počet druhů buněk [4]. K cévicím a parenchymatickým buňkám, jež jsou společné pro oba druhy dřevin, přibyly cévy (tracheje) a libriformní buňky. U listnatých dřevin jsou parenchymatické buňky zastoupeny hojněji než u jehličnatých dřevin. Cévy mají vodivou funkci a jejich orientace je rovnoběžná s osou kmene. Vytvářejí kanálky s různou délkou v závislosti na dřevině. Jejich podíl ve struktuře listnatého dřeva záleží na druhu dřeviny [5]. Libriformní buňky neboli dřevní vlákna představují nadpoloviční podíl ve struktuře listnatých dřevin. Jejich funkce je čistě mechanická.



Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997): 1 – letokruh, 2 – jarní céva, 3 – letní céva, 4 – libriformní vlákno, 5 – dřevňový paprsek, 6 – podélný parenchym

Obrázek 2: Struktura listnatých dřevin [5]

## 1.2 Mechanické vlastnosti

### 1.2.1 Obecné mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dřeva jsou velmi proměnlivé. Jsou dány jeho strukturou, ale i jinými faktory, jako je vlhkost, hustota nebo vady dřeva. V případě vlhkosti platí, že čím vyšší vlhkost dřeva, tím nižší bude pevnost [6]. Obecně lze říct, že má dřevo kompozitní charakter [7]. Vlákna ve struktuře jsou tvořena celulózou a jako pojivo slouží lignin. Jelikož má většina vláken orientaci rovnoběžnou s osou kmene, tak jeho mechanické vlastnosti jsou závislé na směru působení síly (tzv. anizotropie). Mechanické vlastnosti dřeva jsou mnohonásobně lepší, pokud napětí působí ve směru vláken [6].



Obrázek 3: Směry zkoušení vlastností dřeva [8]

U dřeva rozlišujeme tyto mechanické vlastnosti:

- **Pružnost**
- **Pevnost**
- **Tvrдость**
- **Ohýbatelnost**
- **Štípatelnost**

### 1.2.2 Pružnost

Jedná se o vratnou deformaci vlivem vnějších sil, tzn. že se dřevina vrací do původního stavu, jakmile na ni přestanou působit ony síly. Základním parametrem, kterým hodnotíme pružnost dřeva, je modul pružnosti [8]. Ten nám popisuje schopnost dřeva bránit se deformaci. V případě normálového působení (tlak, tah, ohyb) jej značíme E, v případě smykového G. Jednotkou je MPa. U dřevin se nejčastěji měří modul pružnosti v ohybu. V naší zemi se zkouší podle normy ČSN EN 408+A1 [9].

### 1.2.3 Pevnost

Oproti pružnosti se jedná o deformaci vlivem vnějších sil, která je ovšem nevratná. Dojde k trvalému porušení. Pevnost charakterizujeme napětím, kterého je potřeba dosáhnout, aby došlo k poškození [10]. Tato pevnost se pak liší v závislosti na orientaci působení vzhledem k vláknům (rovnoběžně nebo kolmo k vláknům) a v případě kolmého působení se liší radiální nebo tangenciální působení [8]. Jednotkou je opět MPa. V tuzemsku zkoušení probíhá podle norem ČSN, jež se liší v závislosti na druhu namáhání.

ČSN 49 0110 – Pevnost **v tlaku ve směru** vláken

ČSN 49 0112 – Pevnost **v tlaku kolmo** k vláknům

ČSN 49 0113 – Pevnost **v tahu ve směru** vláken

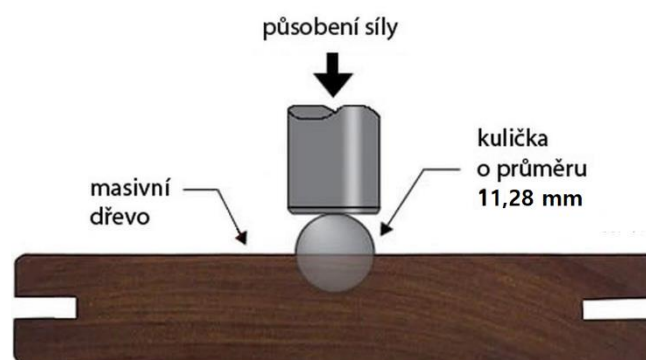
ČSN 49 0114 – Pevnost **v tahu kolmo** k vláknům

ČSN 49 0115 – Pevnost ve statickém ohybu ve směru vláken

ČSN 49 0118 – Pevnost ve smyku ve směru vláken

### 1.2.4 Tvrdost

Tvrdost je schopnost povrchu dřeva odolávat vniknutí cizího tělesa. Konkrétně u dřeva rozlišujeme dvě metody zkoušení tvrdosti. Zkouška podle Brinella a zkouška podle Janky [8]. V obou případech se do zkušebních vzorků vtlačí kulička, jež se u každé ze zkoušek liší svými rozměry. Metody odečtu tvrdosti se taktéž odlišují. U Brinella se tvrdost vypočte z velikosti zatížení a rozměru důlku. U Janky se po vytvoření důlku o obsahu 1 cm<sup>2</sup> odečte vynaložené zatížení, jež je pak udávanou hodnotou [11].



Obrázek 4: Schéma zkoušky tvrdosti podle Janky [11]

## 1.2.5 Ohýbatelnost

Ohýbatelnost je schopnost dřeva udržet si tvar, jenž mu dodáme vlivem vnějších sil. Je závislá především na množství ligninu ve struktuře. Čím více je ligninu ve struktuře, tím vyšší je ohýbatelnost [2]. Před samotným ohýbáním je potřeba dřevo připravit – tzv. plastifikace. Ta se provádí buď tepelně, za pomoci vlhkosti, či za použití chemických látek [8]. Po dosažení požadovaného tvaru se dřevo vysouší, čímž mu zůstane požadovaný tvar.

## 1.3 Mechanické vlastnosti některých dřevin používaných v letectví

### 1.3.1 Smrk sitka

Svémi rozměry se jedná o největšího zástupce z rodu smrk a zároveň i třetí největší dřevinu na světě. Vyskytuje se podél západního pobřeží Severní Ameriky. Díky svým jedinečným vlastnostem si zasloužil místo v mnoha odvětvích. Používá se na výrobu hudebních nástrojů, lodí, je skvělý pro výrobu papíru nebo jako palivové dříví [12]. Především má ale skvělý poměr mechanických vlastností k hmotnosti. Oproti druhému nejvíce používanému dřevu v letectví, douglasky tisolisté, je díky své nižší hustotě lehčí, přesto má mechanické vlastnosti jen mírně zhoršené [13]. Proto je to také nejvíce používaná dřevina v letectví.

#### Základní pevnostní údaje [14]:

Modul pružnosti v ohybu: 11 GPa

Mez pevnosti v ohybu: 70 MPa

Tvrдость (zkouška podle Janky): 1600 N

Hustota po vysušení: 370 kg\*m<sup>-3</sup>



Obrázek 5: Smrk sitka [72]



### 1.3.2 Douglaska tisolistá

Další zástupce jehličnatých stromů. Jedná se o rychle rostoucí dřevinu, jež svými rozměry překonává smrk sitku. Nalezneme jí především na západě Spojených států amerických a částečně na jihozápadě Kanady. Oproti smrku je tvrdší a pevnější [14]. Používá se na výrobu nábytku, nosníků, na stavbu domů nebo právě v letectví [15].

#### Základní pevnostní údaje [13]:

Modul pružnosti v ohybu: 13,8 GPa

Mez pevnosti v ohybu: 84 MPa

Tvrдость (zkouška podle Janky): 2300 N

Hustota po vysušení: 450 kg\*m<sup>-3</sup>



Obrázek 6: Douglaska tisolistá [73]

### 1.3.3 Ostatní dřeviny

Výše zmíněné dřeviny patří k nejčastěji používaným dřevinám v letectví. Existují i další, jež našly uplatnění v leteckém průmyslu (různé druhy **topolu**, **břízy**, **borovice** nebo **jasanu** či jiné druhy smrků), ale jejich využití není tak velké, anebo, v případě topolu a břízy, spočívá využití především ve výrobě překližky, která se pak využívá na části letadel [16].

## 2 Letecké konstrukce využívající dřevo

### 2.1 Kluzáky

#### 2.1.1 Lilienthal Normalsegelapparat

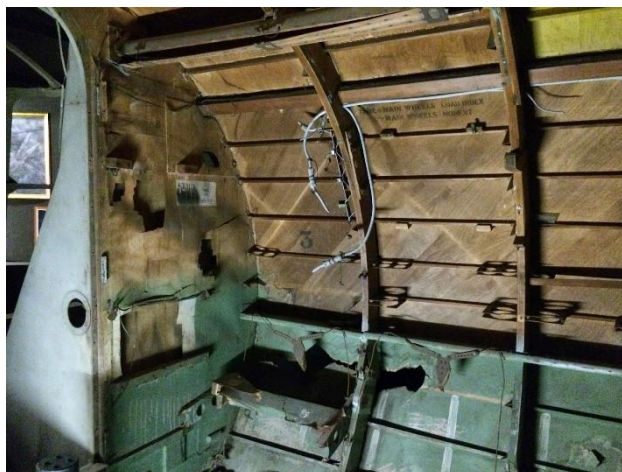
Nejvýznamnější a nejznámější kluzák, který vyvinul, jak už název napovídá, Otto Lilienthal. Byl to první kluzák, jenž byl vyráběn sériově. Prodalo se 9 kusů. První let byl uskutečněn v roce 1893. Konstrukce se skládala z trupu, křídel a ze svislých i vodorovných ocasních ploch. Odpovídala tedy svým způsobem moderním kluzákům. Pilot v kokpitu doslova visel. To znamená, že se držel pouze rukama. Nohy, kterými se pilot rozbíhal kvůli nabrání rychlosti, se pak snažil držet ve vodorovné poloze ve směru letu kluzáku. Přistání pak opět probíhalo dosednutím na pilotovy nohy. Celá konstrukce byla dřevěná. Trup byl postaven z **borovicového dřeva, křídla, ocasní plochy a kokpitu pak z vrbového dřeva** [17]. K potažení křídel a ocasních ploch pak sloužila utkaná látka. Dodnes jsou k vidění v muzeích v Londýně, Moskvě a ve Washingtonu [18].



Obrázek 7: Detailní pohled na centrální část Lilienthal Normalsegelapparat [74]

#### 2.1.2 Airspeed Horsa

Jedná se o nejúspěšnější britský kluzák z období druhé světové války. První let tohoto kluzáku proběhl v roce 1941. Účastnil se důležitých bojových střetnutí během celé války. Kromě dvou pilotů mohl nést 25 vojáků nebo jeden Jeep Willis, popřípadě kanón OQF 6 pounder [19]. Celkem bylo vyrobeno asi 3660 těchto kluzáků. Byly vyráběny v podnicích po celé Velké Británii. Kluzák byl celý postaven z **břizové překližky a ze smrku** [20].



Obrázek 8: Pohled na dřevěný trup Airspeed Horsa zevnitř [75]

## 2.2 Letouny

### 2.2.1 Wright Flyer

Jedná se o letoun, se kterým uskutečnili bratři Wrightové první let stroje těžšího než vzduch s motorem. Jednalo se o dvouplošník s výškovým kormidlem před pilotem a svislou ocasní plochou za ním. Letadlo bylo postaveno ze dřeva a potaženo mušelinem [21]. Jelikož na trhu nebyl k dispozici vhodný motor, postavili si jej svépomocí. Byl to benzínový řadový čtyřválec o výkonu 12 koní a váze 77 kg [22]. Tento motor pak poháněl dvě vrtule. Na ohýbané části byl použit **smrk červený** a na rovné části **jasan americký** [23]. Pilot ležel na křídle v kyčelní kolébce, kterou ovládal pohybem těla a v levé ruce držel páku ovládání výškového kormidla. Kyčelní kolébka pak sloužila k ovládání kroucení křídel, čímž se prováděl náklon letadla. Nyní můžeme vidět Wright Flyer v National Air and Space Museum ve Washingtonu D. C [24].



Obrázek 9: Pohled zblízka na konstrukci Wright Flyer [76]

## 2.2.2 De Havilland DH-98 Mosquito

Řeč je o britském, druhoválečném těžkém stíhacím letounu. V době svého vzniku dosahoval vyšších rychlostí než jakákoliv jiná stíhačka států Osy Berlín – Řím – Tokio. I přes své vyšší rozměry měl skvělou ovladatelnost a dosahoval vynikající manévrovatelnosti a odolnosti. Tyto jedinečné vlastnosti mu vynesly přezdívku „dřevěný zázrak“. Ke konstrukci se používalo především vrstvené dřevo. **Vnitřní tři vrstvy byly z balzovníku jihoamerického a dvě vrstvy z břízy** [25]. Dále byla použita **jedle a smrk**. Ve 30. letech 20. století požadovala britská RAF (Royal Air Force) dvoumotorový střední bombardér s univerzálním využitím. Konstruktor Geoffrey de Havilland se svým podnikem De Havilland nabídl tento letoun, avšak kvůli despektu úředníků, především kvůli dřevěné konstrukci, nebyl vybrán. Letoun byl během 30. let ještě několikrát nabídnut britské RAF, pokaždé se stejným výsledkem. Obrat nastal v roce 1940. 2. světová válka byla v plném proudu, Francie kapitulovala a Británie se připravovala na hrozící útok. Projekt Geoffreyho de Havillanda dostal zelenou, a tak vznikl jeden z nejlepších letounů 2. světové války. Poslední Mosquito bylo vyřazeno ze služby v Jugoslávii v roce 1963 [26].



Obrázek 10: Pohled na dřevěný trup de Havilland DH.98 Mosquito při restauraci [77]

## 2.2.3 Spacek SD-1 Minisport

Jedná se o zástupce soudobých dřevěných letounů, přesněji ultralightů. Může nás těšit, že výrobcem je česká firma Spacek, s. r. o., se sídlem v nedalekém Hodoníně. Prototyp SD-1 začal vznikat již v 90. letech 20. století v režii nynějšího majitele Spacek, s. r. o., Igora Špačka. Ten se rozhodl postavit vlastní letadlo při dodržení tří základních kritérií – jednoduché lehké letadlo pro jednoho pilota, možnost zhotovení v amatérských podmínkách s lehkou montáží a demontáží. V roce 2005 vzlétl první prototyp. Zajímavostí je, že tento prototyp vážil i se záchranným systémem pouze 134

kg a dosahoval rychlosti až 160 km/h. Letoun rychle získal pozornost a přišli první poptávky od zájemců. Igor Špaček proto v roce 2007 zakládá svoji firmu a začíná vyrábět SD-1. Výhodou SD-1 je možnost dodání jako stavebnice nebo kompletní výrobek. Nejen z těchto důvodů, ale i bezpečnostních není celé letadlo postavené ze dřeva, ale i tak je dřevo základem celé konstrukce. Především v křídle jsou zastoupeny i jiné materiály. Například pásnice jsou poskládány z plochých karbonových pásků a stojina nosníku ve tvaru „I“ je sendvičové konstrukce ze skelného materiálu a pěnové výplně. Žebra jsou naproti tomu z extrudovaného polystyrenu. Křídlo jako celek je potažen překližkou z finské břízy. Výjimkou jsou náběžné hrany, které jsou tvořeny zaobleným polystyrenem, který se laminuje kvůli zpevnění. Trup je příhradovou konstrukcí ze smrkového dřeva potažený překližkou opět z finské břízy. Tloušťka překližky se pohybuje v závislosti na umístění od 0,8 mm do 5 mm. Výhodou pro zákazníka je možnost výběru z nabízených pohonných jednotek nebo možnost zvětšení trupu a kokpitu pro pohodlí vyšších pilotů. Firma dokáže vyrobit až 40 letadel ročně, přičemž valná většina jde na export do zahraničí. Zákazníci jsou nejen z Evropy, ale i ze Spojených států amerických, Nového Zélandu či z Jižní Koreje [27].



Obrázek 11: Pohled na dřevěnou kostru trupu letounu SD-1 [27]

## 2.3 Kosmonautika

### 2.3.1 LignoSat

Jedná se o první satelit ze dřeva, který by měl být vypuštěn během roku 2024. O jeho konstrukci se postarali vědci z univerzity v Kjótu společně s dřevařskou společností Sumitomo Forestry [28]. Při jeho konstrukci bylo využito magnóliového dřeva. Samotný satelit bude mít velikost „hrnku na kávu“ [29]. Po zkouškách na Zemi bylo již dříve vysláno společně s dalšími typy dřev na ISS (Mezinárodní vesmírná stanice), kde byla otestována schopnost dřeva odolávat podmínkám ve vesmíru. Po roce na oběžné dráze byly vzorky dopraveny zpátky na Zemi k analýze. Bylo zjištěno jen minimální poškození vzorků. To bylo pravděpodobně způsobeno faktem, že ve vesmíru není žádný kyslík, který by způsoboval biodegradaci materiálu.

Spouštěčem pro vytvoření dřevěného satelitu byl fakt, že veškeré družice se vyrábějí z kovů a slitin kovů, včetně hliníku. Když satelit začne hořet při sestupu do atmosféry, kromě zničení samotného satelitu dojde ke vzniku oxidů hliníku. Tyto oxidy zůstanou v atmosféře a podle nejnovějších výzkumů mohou tyto oxidy způsobit degradaci ozónové vrstvy a také ovlivnit množství světla dopadajícího na Zemi [29].



Obrázek 12: Vizualizace LignoSatu [28]

# 3 Metody zlepšování vlastností dřeva v letectví

## 3.1 Důvody zlepšování

Jak již bylo zmíněno v kapitolách *Úvod a Strukturní a mechanické vlastnosti*, dřevo má v některých ohledech jedinečné vlastnosti. Na druhou stranu má i své nedostatky, které plynou především z přírodního původu tohoto materiálu, jako přirozená biologická degradace nebo změna vlastností a rozměrů kvůli absorbované vlhkosti z okolí. Dále můžeme zmínit anizotropii či hořlavost, zde se však jedná spíše o fyzikální vlastnost dřeva. Kvůli těmto neduhům provádíme operace, jež mají tyto vlastnosti omezit nebo rovnou neutralizovat. Naproti tomu tyto metody dokážou zlepšit i zhoršit některé jiné vlastnosti.

Vzhledem k omezenosti zdrojů a rozmanitosti metod zlepšování nelze přesně určit ty metody, které se používají přímo v leteckých konstrukcích. Zaměříme se proto na metody, jež zdokonalují vlastnosti, které považujeme za podstatné v letectví. S tímto vědomím vynecháme **tepelné zpracování a hydrotermické zpracování**, která sice mohou zlepšit rozměrovou stálost a odolnost vůči biologické degradaci, ale zároveň zhoršují většinu jiných mechanických vlastností, ať už se bavíme o modulu pružnosti nebo o pevnosti [30][31][32].

## 3.2 Chemická modifikace

V současnosti asi jedna z nejrozšířenějších metod modifikace dřeva. Existuje velké množství typů chemické modifikace, které se odlišují v závislosti na typu použité látky, způsobu průběhu úpravy až po konečné zlepšené vlastnosti. Princip spočívá v průniku chemické látky do struktury dřeva. Tento průnik může být buď povrchový nebo hloubkový [33]. V zásadě se chemická modifikace dělí primárně na dvě skupiny:

**Aktivní modifikace** – tato forma spočívá v chemické reakci mezi složkami struktury dřeva s dodanou látkou, popřípadě reakcí mezi samotnými složkami struktury dřeva. [34][33][35]

**Pasivní modifikace** – při tomto postupu nedochází k chemickým reakcím. Dojde k vyplnění volného prostoru mezi dřevěnými buňkami, popřípadě dojde k vyplnění buněčných stěn. [34][33][35]

Dále můžeme chemické úpravy dělit podle změn, které provedou ve struktuře dřeva. Tyto změny lze dělit na čtyři základní principy:

**Blokování** – princip, při kterém se do struktury dřeva impregnuje pryskyřice, může být přírodní nebo syntetická [34]. Považuje se za pasivní chemickou modifikaci. Tato pryskyřice pak po vytvrnutí zabraňuje vlhkosti přístupu do dřeva. Výsledné změny

závisí na druhu pryskyřice, dřeva i způsobu provedení impregnace. Všeobecně však platí, že takto ošetřené dřevo by mělo mít lepší rozměrovou stálost a vyšší pevnost [33].

**Sítování** – zástupce aktivní chemické modifikace. Pomocí chemické látky, kterou může být třeba dimethyloldihydroxyethylenmočovina (DMDHEU) nebo furfurylalkohol (FA) dojde ke spojení dvou OH skupin ve struktuře dřeva [34]. Tím se spojí místa, kde by za normálních okolností mohlo dojít k reakci s jinými látkami, které by způsobily degradaci dřeva. Takto upravené dřevo má vyšší pevnost a odolnost vůči zásadám nebo kyselinám [33].

**Roubování** – další princip aktivní chemické modifikace. V tomto případě impregnujeme dřevo látkami, které nahradí reaktivní OH skupinu jinou, méně reaktivní skupinou. Tato skupina pak už neváže látky, které by mohly způsobit rozpad nebo poškození dřeva [33]. Pro tento postup se používají především anhydridy, konkrétně anhydrid kyseliny octové. Díky tomuto zlepšení má dřevo vyšší odolnost vůči biologické degradaci.

**Odbourání** – postup aktivní chemické modifikace, při kterém se nepoužívá žádná chemická látka, která by se impregnovala do struktury dřeva. Místo toho se dřevo upravuje pomocí vysokých teplot (asi 200 °C) v inertní atmosféře [34]. V těchto podmínkách dochází ve struktuře dřeva k chemickým reakcím především hemicelulóz a ligninu. Dochází k depolymerizaci u hemicelulóz, resp. ke vzniku dehtových látek u ligninu. Společně se vznikem krystalické celulózy dochází ke vzájemné reakci vzniklých látek, které ke konci procesu snižují počet volných OH skupin [33]. Takto upravené dřevo má vyšší rozměrovou stálost i odolnost proti biologickému rozpadu.

### 3.2.1 Acetylace

Proces aktivní chemické modifikace, kterou poprvé provedli v Německu v roce 1928. Byl použit anhydrid kyseliny octové a jako katalyzátor, což je látka pro urychlení reakce, byla použita kyselina sírová. Po tomto pokusu se pokračovalo ve výzkumu acetylace a jejího působení na vnitřní strukturu dřeva. Byly použity jiné katalyzátory jako pyridin nebo dimethylanilín. V roce 1945 bylo poprvé poukázáno na fakt, že acetylované dřevo, konkrétně balsa, je odolná proti hnilobě [36]. O rok později bylo prokázáno, že dřevo upravené acetylací je odolné vůči nasávání vlhkosti. V průběhu následujících let probíhalo zkoušení spousty jiných látek jako katalyzátoru, ať už ve formě páry nebo v tekuté formě. Můžeme zmínit například chlorid zinečnatý, dimethylformamid, kyselina trifluoroctová nebo  $\gamma$ -paprsky. Nejnovější metody acetylace jsou prováděny s anhydridem kyseliny octové bez použití katalyzátoru při teplotách až 120 °C [37]. Acetylace může být prováděna společně s jinými úpravami, které mohou ještě zlepšit vlastnosti dřeva.

Chemická podstata acetylace spočívá v tom, že při reakci anhydridu kyseliny octové s látkami v buněčných stěnách dochází k esterifikaci volných hydroxylových skupin (OH skupin) za vzniku kyseliny octové [37]. Jedná se tedy o roubování [33]. Po tomto



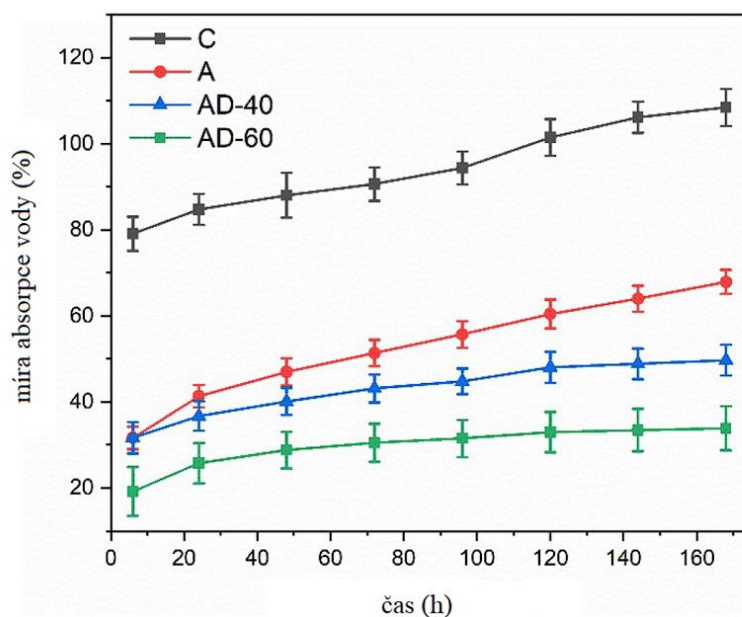
procesu je třeba odstranit vzniklou kyselinu octovou kvůli pachu [36]. Ten může být pro uživatele nepříjemný.

Jaké má acetylace přínosy pro vlastnosti, které požadujeme v letectví? V článku [38] z roku 2022 bylo provedeno srovnání mechanických vlastností neupraveného dřeva smrku štětinatého se dřevem modifikovaným acetylací, lisováním nebo kombinací obou. Výsledky ukázaly zlepšení ve všech zkoumaných vlastnostech u vzorku upraveného acetylací. V případě vzorků upravených lisováním nebo kombinací obou bylo zlepšení ještě vyšší. Grafy znázorňují chování vzorků o rozměrech 20 x 50 x 120 mm.

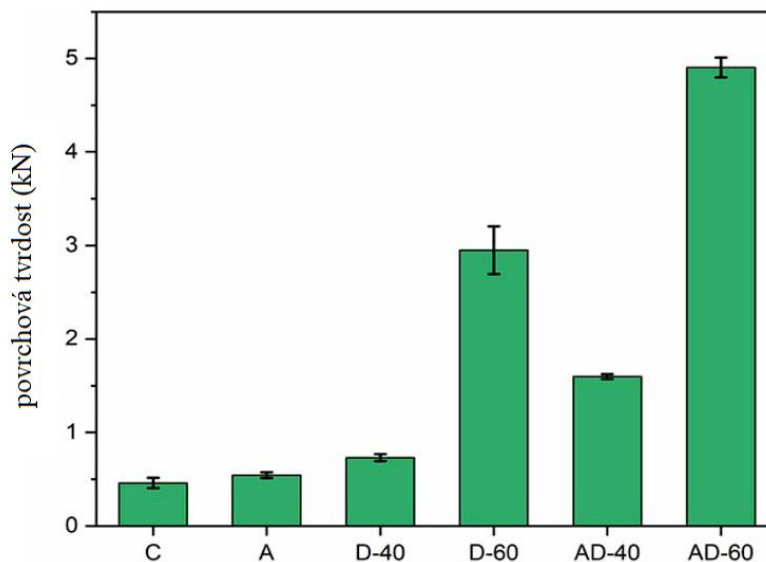
Vysvětlivka grafů:

- C – neupravený vzorek
- A – vzorek upravený acetylací
- D-40 – vzorek slisován o 40 % vůči původní tloušťce
- D-60 – vzorek slisován o 60 % vůči původní tloušťce
- AD-40 – vzorek upraven acetylací a následně slisován o 40 % původní tloušťky
- AD-60 - vzorek upraven acetylací a následně slisován o 60 % původní tloušťky

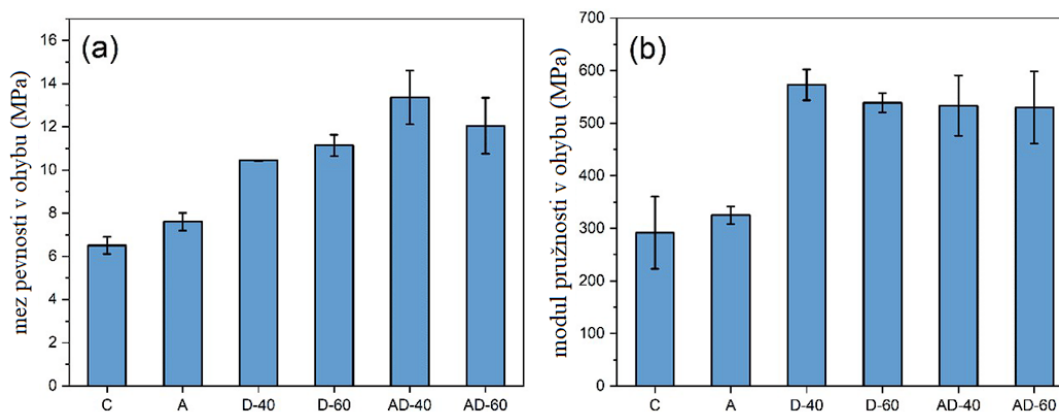
Graf 1: Míra absorpce vody v závislosti na čase (upraveno z [38])



Graf 2: Povrchová tvrdost jednotlivých vzorků  
(upraveno z [38])



Graf 3: Mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu u jednotlivých vzorků (upraveno z [38])



Zlepšení mechanických vlastností vlivem acetylace bylo pozorováno také u dřevin topolu nebo borovice lesní. Naopak u buku a borovice montereyské byla pozorována stagnace nebo dokonce zhoršení mechanických vlastností vlivem acetylace [39].

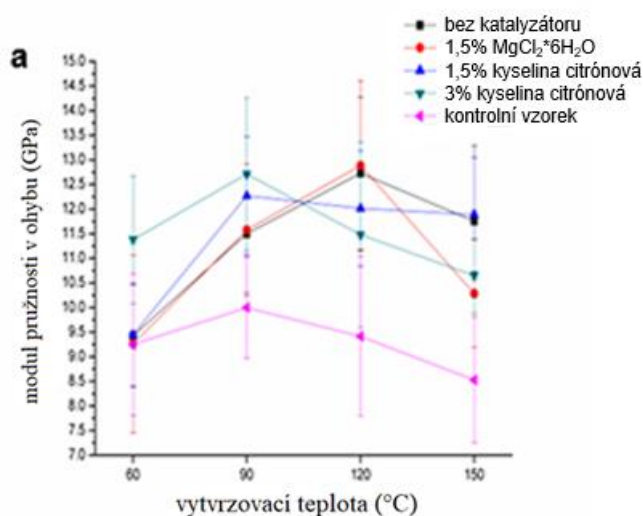
Za předpokladu výběru vhodného typu dřeva by tak acetylace mohla nalézt uplatnění v modifikaci dřeva pro letecké konstrukce.

### 3.2.2 Modifikace pomocí DMDHEU

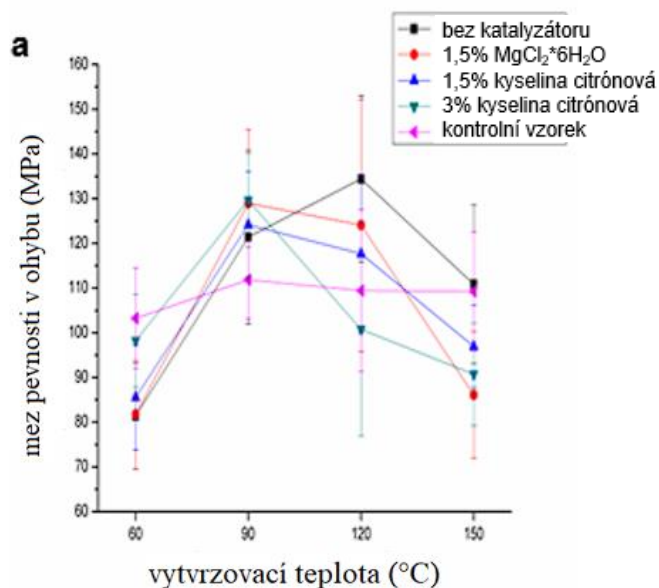
Další zástupce aktivní chemické modifikace dřeva pomocí chemické sloučeniny dimethyloldihydroxyethylenmočoviny. Jedná se o poměrně novou metodu úpravy, při které dochází k síťování, tedy k reakci a spojení volných hydroxylových skupin na buněčné úrovni [33]. Původně bylo DMDHEU používáno v textilním průmyslu k ošetření bavlněných textilií. DMDHEU u těchto textilií zvyšoval hydrofobnost. Vzhledem k tomuto použití je jasné, že dřevo ošetřené DMDHEU je zdravotně nezávadné. Samotný postup úpravy má dva kroky. Prvním krokem je impregnace samotného dřeva DMDHEU. Jako doprovodnou látku lze použít katalyzátor. Impregnace se většinou provádí pomocí podtlaku a přetlaku. V druhé fázi se dřevo vytvrzuje při teplotách a časech, které se liší v závislosti na postupu. Obecně je však tato teplota kolem 100 °C. Časy se naproti tomu pohybují v rámci hodin. Tento proces se nazývá Belmadur [40].

DMDHEU u dřeva zlepšuje tvrdost, rozměrovou stálost, odolnost vůči plísním nebo odolnost dřeva vůči absorpci vody. Podstatné však je, že po této modifikaci dochází ke zlepšení mechanických vlastností materiálu. Ale ne vždy je to pravda. Tvrdost se zlepšuje téměř pokaždé, ale modul pružnosti nebo pevnost se někdy i snížila. Proto byla v jedné práci [41] zkoumána možnost, že změna mechanických vlastností má souvislost s použitím katalyzátoru a s vytvrzovací teplotou. V této práci byly použity vzorky dřeva topolu ussurijského o rozměrech 150 x 50 x 3 mm. Tyto vzorky byly po dobu dvou hodin impregnovány podtlakem 0,8 baru, poté 2 hodiny s přetlakem 3 bary. Následovalo odstranění přebytečného DMDHEU a vzorky se 24 hodin nechaly odstát. Posledním krokem bylo čtyřhodinové vytvrzování při daných teplotách.

Graf 4: Závislost modulu pružnosti v ohybu na teplotě pro různé katalyzátory (upraveno z [48])



Graf 5: Závislost meze pevnosti v ohybu na vytvrzovací teplotě pro různé katalyzátory (upraveno z [48])



Z grafů je patrné, že se zvyšující se teplotou se zlepšují i pevnostní charakteristiky. Při vysokých teplotách přichází opačný trend a charakteristiky se zhoršily. Při vysokých teplotách si vedly dobře vzorky bez katalyzátoru. To mohlo být způsobeno tím, že katalyzátor urychlil degeneraci dřeva při vysokých teplotách [41]. Práce se ovšem zaměřila pouze na dřevo topolu.

Topol se v letectví používá zřídka na výrobu překližky. Předpokládáme však, že vzhledem k podobné struktuře u listnatých dřevin lze pozorovat podobné změny mechanických vlastností i u jiných listnatých dřevin. Je však potřeba dalších výzkumů pro potvrzení této teorie. Za vhodných teplot a s vhodným katalyzátorem je modifikace DMDHEU vhodná pro dřevo v letectví.

### 3.2.3 Furfurylace

Aktivní chemická modifikace pomocí furfurylalkoholu. Furfurylalkohol je čirá kapalina, sloučenina furanu a hydroxymethylové skupiny, která se získává z bioodpadu, jako jsou kukuřičné klasy nebo cukrová třtina. Při furfurylaci se dřevo impregnuje touto látkou, přičemž ve struktuře dochází k reakci furanu s buněčnými stěnami dřeva. Tato reakce vede k síťování [33]. Díky této modifikaci má dřevo zlepšenou většinu mechanických vlastností, jako je pružnost, rozměrovou stálost nebo tvrdost. Negativní vliv má furfurylace na houževnatost a částečně pevnost [42]. Při impregnaci se může furfurylalkohol doprovodit jinými látkami, které mohou sloužit jako katalyzátor.

Nevýhodou může být fakt, že takto modifikované dřevo dostane tmavší odstín nebo může dokonce až zčernat [43].

Je potřeba zmínit, že furfurylalkohol je klasifikován jako nebezpečný. Jeho páry, které produkuje, mohou v přítomnosti vzduchu dokonce explodovat [33]. Může být život ohrožující zvláště při vdechnutí nebo při kontaktu s pokožkou.

První pokusy použít furfurylalkohol jako modifikátor dřeva byly provedeny již v 50. letech 20. století ve Spojených státech amerických Alfredem Stammem společně s jeho studentem Irvingem Goldsteinem. Tyto pokusy ukázaly pozitivní vliv na většinu mechanických vlastností i na odolnost dřeva vůči plísním. Problémem byl použitý katalyzátor, chlorid zinečnatý, který urychloval degradaci celulózy v buněčných stěnách a z dlouhodobého hlediska měl negativní vliv na mechanické vlastnosti dřeviny. V 90. letech 20. století se objevují snahy o komercializaci furfurylace pod vedením Marca Schneidera. Problémem byla vysoká spotřeba chemikálií při modifikaci, která vedla k vysoké ceně upraveného dřeva. Výzkum byl proto zaměřen na vhodné ředění, které by snížilo výslednou cenu produktu. Výsledkem je směs na vodní bázi. Díky tomuto průlomů vznikly komerční procesy furfurylace. Těmi jsou VisorWood, který je vhodný pro měkká dřeva a Kebony pro tvrdá dřeva [43]. Rozdíl je především v množství furfurylalkoholu použitém při modifikaci.

Samotný proces modifikace má několik kroků [43]:

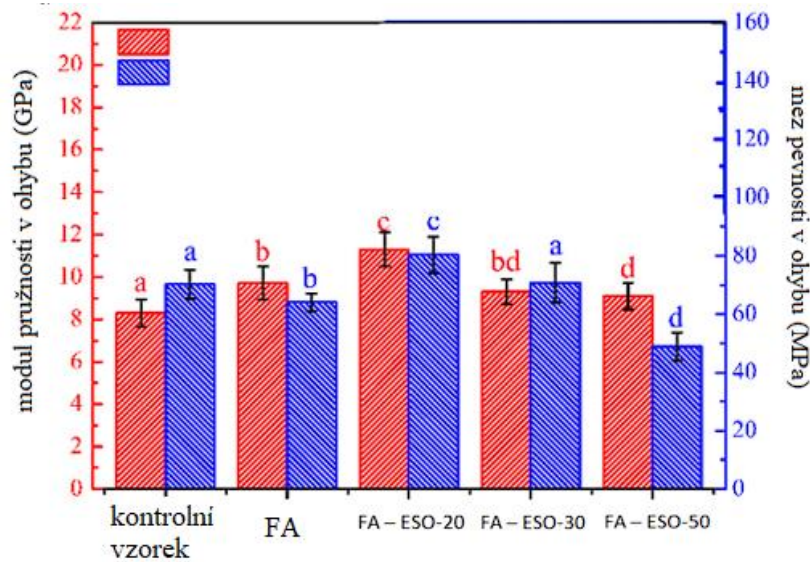
- Namíchání a skladování chemikálií, které se provádí ve speciální nádrži.
- Impregnace pomocí změn tlaku.
- Reakce a vytvrzování probíhá v komoře, která je ohřívána vodní párou. Teplota záleží na modifikaci. Po ochlazení komory se vzniklý kondenzát sbírá pro opětovné použití.
- Sušení.
- Čištění odvětráním plynů.

Výzkum furfurylace stále pokračuje. Akademická práce [42] zkoumala vliv epoxidovaného sójového oleje (ESO), který byl v roztoku s furfurylalkoholem, na mechanické vlastnosti dřeva. Došlo ke zlepšení mechanických vlastností při modifikaci zmíněným roztokem oproti úpravě samotným furfurylalkoholem. Jako dřevo určené k modifikaci byla vybrána borovice vejmutovka. Vzorky byly nařezány na tři různé rozměry, přičemž se každý vzorek používal na jiný druh zkoušek. K impregnaci se použily čtyři různé roztoky:

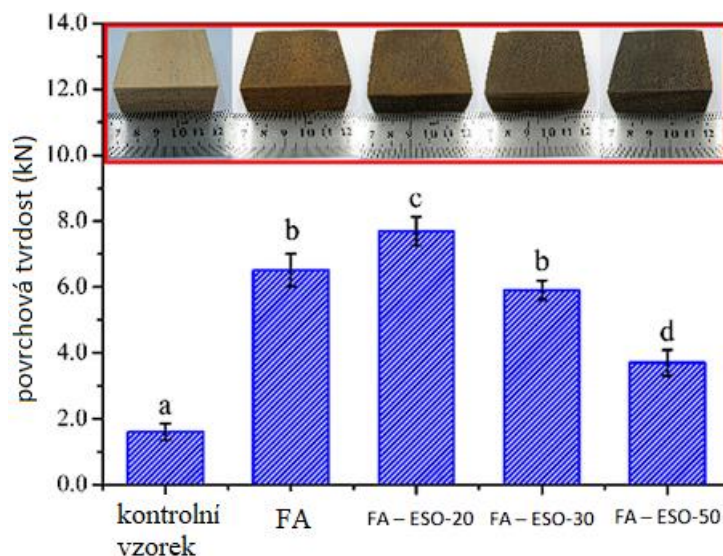
1. Čistý furfurylalkohol (FA)
2. Roztok furfurylalkoholu s ESO v poměru 4:1 (FA – ESO-20)
3. Roztok furfurylalkoholu s ESO v poměru 7:3 (FA – ESO-30)
4. Roztok furfurylalkoholu s ESO v poměru 1:1 (FA – ESO-50)

Vzorky se nejdříve vysušily v troubě. Následovala hodina dlouhá tlaková impregnace. Po 24 hodinách byl z povrchů odstraněn zbylý roztok a vzorky zůstaly dalších 12 hodin ležet při pokojové teplotě. Posledním krokem bylo vysoušení při různých teplotách za daný čas.

Graf 6: Mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu pro jednotlivé roztoky (upraveno z [49])



Graf 7: Povrchová tvrdost pro jednotlivé roztoky a zbarvení vzorků vlivem roztoků (upraveno z [49])



Z grafů je patrné, že vhodné množství epoxidovaného sójového oleje pozdvihuje mechanické vlastnosti. Tato dodatečná úprava by proto mohla být vhodná u modifikace dřeva použitého pro letecké konstrukce.

### 3.2.4 Impregnace pryskyřicemi

Způsob modifikace dřeva, při kterém je dřevo impregnováno především syntetickými pryskyřicemi. Tyto pryskyřice mohou být formaldehydové, epoxidové nebo polyuretanové. V závislosti na druhu pryskyřice pak dochází k různým modifikačním strukturám dřeva. Tyto modifikace mohou být jak pasivní, tak aktivní. První velký rozmach této modifikace nastal ve 30. letech 20. století ve Spojených státech amerických [33]. Tehdy byly formulovány tři základní požadavky pro pryskyřice používané při modifikaci. Jsou [35]:

- Dostatečně malé molekuly, aby byly schopné prostoupit do buněčné stěny.
- Dále by měly být rozpustitelné v rozpouštědlech, především ve vodě, aby mohly být dopraveny do buněčných stěn.
- Molekuly pryskyřice nesmí být odpuzovány látkami v buněčné stěně.

Díky těmto vlastnostem by měly molekuly pryskyřice proniknout do buněčné stěny, kde by měly především bránit přístupu vlhkosti [44]. Dále zde mohou vzniknout vazby, které ve výsledku zlepšují vlastnosti struktury. V počátcích byla používána především fenol-formaldehydová pryskyřice (PF). Postupem času byly objeveny další druhy pryskyřic, které našly uplatnění při úpravě dřeva, jako například [35]:

- močovino-formaldehydová pryskyřice (UF)
- melamin-formaldehydová pryskyřice (MF)
- fenol-močovino-formaldehydová pryskyřice (PUF)
- methylovaná močovino-formaldehydová pryskyřice (MUF)
- methanol-melamin-formaldehydová pryskyřice (MMF)
- methylendifenyl-diisokyanát (MDI)
- epoxidová pryskyřice
- polyuretanová pryskyřice

Samotná impregnace se může provádět vícero způsoby. Na celkový výsledek modifikace má vliv počáteční vlhkost dřeva, proto se většinou začíná vysušením. Samotná pryskyřice se pak míchá s rozpouštědlem, abychom dosáhli požadované viskozity roztoku. Tento roztok můžeme smíchat s takzvaným tvrdidlem, což je chemická látka, která pryskyřici časem vytvrdí. Toto vytvrzení lze provést i bez tvrdidla pouze ohřevem nebo kombinací tvrdidla i ohřevu. V závislosti na hloubce impregnace pak můžeme dřevo roztokem pouze potírat, máčet ho v roztoku nebo použít komoru, kde vlivem změn tlaku dojde k nejhlubší impregnaci [44]. Při těchto nejhlubších impregnacích se také zkoumá možnost využít přírodní pryskyřice [33]. Mezi tyto

pryskyřice řadíme kalafunu, mastix nebo šelak, který je však živočišného původu. Rostlinné pryskyřice se získávají z poškozených stromů, z nichž vytékají ve formě takzvaných balzámů. Nevýhodou je však rozdílné složení těchto pryskyřic. Rozpouštět se dají například v benzínu nebo v alkoholu. Výhodou je větší ekologičnost těchto pryskyřic.

Mechanické vlastnosti dřeva modifikovaného pryskyřicemi jsou různé. Ve většině případů vzroste pevnost, pružnost, tvrdost. Získá lepší rozměrovou stálost nebo odolnost vůči chemikáliím. Některé pryskyřice zlepšují i odolnost vůči biologickým škůdcům nebo dodají dřevu odolnost vůči vznícení a hoření. Jistou nevýhodou může být křehkost vyskytující se u některých pryskyřic [35]. Další nevýhody mohou plynout z ceny modifikace nebo z uvolňování formaldehydu ze dřeva kvůli toxicitě. Velmi dobré zlepšení vlastností lze především sledovat u dřeva modifikovaného epoxidovou pryskyřicí. Jako další výhodu lze zmínit možnost upravit pryskyřice při výrobě, a tím „nastavit“ zlepšení pro dané použití modifikovaného dřeva [33].

### 3.2.5 Impregnace křemičitanem sodným

Křemičitany neboli silikáty jsou sloučeniny oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ), tedy kyslíkaté sloučeniny. Jsou nerozpustné ve vodě s výjimkou křemičitanů alkalických kovů, mezi které patří i křemičitan sodný ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) neboli vodní sklo. Některé křemičitany lze rozpustit v kyselinách. Všechny křemičitany však lze rozpustit za vysokých teplot v roztocích alkalických hydroxidů. Různé křemičité směsi byly zkoumány a zkoušeny jako možnost modifikace dřeva. Jejich předností je nižší cena a celková dostupnost křemičitanů. Většina těchto směsí měla pozitivní vliv na tvrdost a hydrofobnost dřeva [33].

Křemičitan sodný je pro velké spektrum lidí známý pojem. Díky jeho schopnosti rozpouštění ve vodě se zpracovává do vodního roztoku. Z toho vychází i výše zmíněný název vodní sklo. Tento roztok může mít různé koncentrace, které vycházejí z použití roztoku. Díky jeho jedinečným vlastnostem, jako odolnost vůči vysokým teplotám, chemická stabilita nebo možnost tvořit vodotěsné vrstvy, našel využití ve velkém množství odvětví a výrobků. Lze zmínit stavebnictví, kde se používá jako součást nátěrů nebo jako přísada do betonu pro zvýšení jeho odolnosti. V textilním průmyslu ho lze použít k změkčení a k bělení tkanin. Využití našel také v automobilním průmyslu pro ošetření částí vozidel vůči korozivním účinkům nebo v potravinářském průmyslu jako konzervační prostředek. Vajíčka ošetřená křemičitanem sodným dokážou vydržet čerstvá až 9 měsíců [45].

Díky těmto vlastnostem a způsobech využití byl použit i pro modifikaci dřeva. Dřevo můžeme tímto roztokem potírat nebo jej v něm máčet. Nejlepších výsledků z pohledu mechanických vlastností však dosáhneme při impregnaci dřeva tímto roztokem. Dřevo impregnované křemičitanem sodným má nižší absorpci vody, několikanásobně lepší pružnost, pevnost i tvrdost [46]. Velké pozitivum je to, že takto ošetřené dřevo má vysokou odolnost vůči vznícení a hoření a degradaci za vysokých teplot [47]. A pokud



začne hořet, potlačuje kouř. Křemičitan sodný reaguje s OH skupinami ve struktuře dřeva za vzniku vazeb, jedná se proto o aktivní chemickou modifikaci.

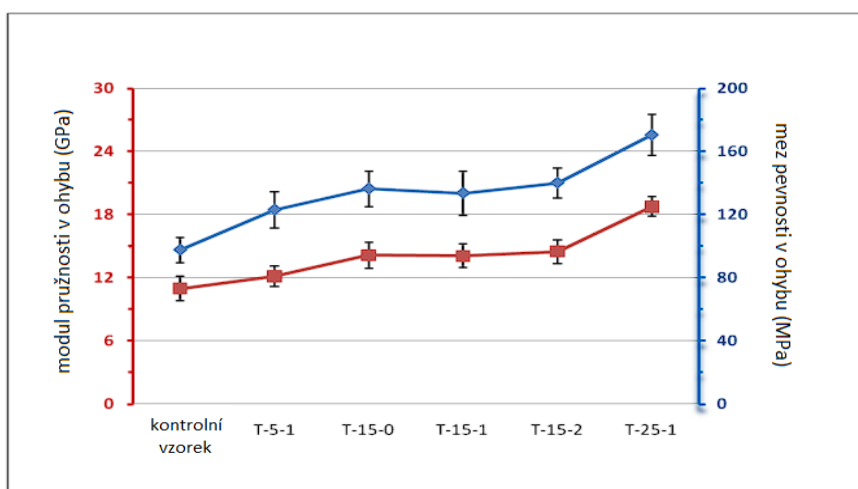
Samotný postup impregnace se neliší od jiných postupů impregnace popsanych výše. Dřevo se nejdříve připraví vysušením na požadovanou vlhkost 10–12 %, poté se vkládá do komory, kde se impregnuje připraveným roztokem pomocí změn tlaku po určitý čas [47]. Po vytažení z komory a odstranění přebytečného roztoku z povrchu se dřevo nechává opět vysušit.

Do roztoku vodního skla se mohou přimíchat látky, které zlepší výsledné účinky [46].

Jedna z prací [46] se zaměřila na možnost přidání celulóзовých nanovláken (CNF) do roztoku vodního skla. Nanovlákná jsou získávána biosyntézou. Tato vlákna jde v dnešní době komerčně koupit, jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena [48]. Jako testovací dřevo bylo použito dřevo z borovice těžké. Samotný proces impregnace měl stejnou posloupnost jako klasická impregnace s rozdílnými tlaky, teplotami a časy trvání. Přibyl i mezikrok v podobě zabalení ošetřeného dřeva do plastových pytlů na 6 hodin. K impregnaci bylo použito celkem 5 roztoků. Ty byly namíchaný z roztoku vodního skla o koncentraci 37,5 % a suspenze celulóзовých nanovláken o koncentraci 10 %. Jednotlivé roztoky byly:

1. T-5-1 – roztok s 5 % křemičitanu sodného s 1 % CNF
2. T-15-0 - roztok s 15 % křemičitanu sodného bez CNF
3. T-15-1 - roztok s 15 % křemičitanu sodného s 1 % CNF
4. T-15-2 - roztok s 15 % křemičitanu sodného s 2 % CNF
5. T-25-1 - roztok s 25 % křemičitanu sodného s 1 % CNF

Graf 8: Modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu pro jednotlivé roztoky (upraveno z [46])



Z grafů je patrné, že mechanické vlastnosti se zlepšovaly se zvyšujícím se množstvím podílu křemičitanu sodného v roztoku. Množství CNF mělo na mechanické účinky minimální vliv.

Z výčtu vlastností usuzujeme, že by tento způsob modifikace byl velmi vhodný pro využití v letectví.

### 3.2.6 Ostatní metody chemické modifikace

Existuje velké množství dalších metod chemické modifikace dřeva. K výše zmíněným metodám můžu zmínit metody jako [33]:

- Impregnace směsmi olejů, vosků a pryskyřic
- Impregnace sacharidy
- Impregnace solemi
- Impregnace polyethylenglykolem
- Čpavkování

Tyto metody nebyly již dále zmiňovány z důvodu jejich účinků na vlastnosti dřeva, které nepovažují v leteckých konstrukcích za důležité nebo při zlepšení některých z těchto vlastností dojde ke zhoršení jiných, taktéž podstatných vlastností [35][33].

V případě impregnace směsmi olejů, vosků a pryskyřic se jedná o relativně novou a neprobádanou metodu, která zatím nenašla většího využití. Podle dostupných zdrojů však i ona dokáže vylepšit mechanické vlastnosti [33].

## 3.3 Mechanická modifikace dřeva

### 3.3.1 Lisování dřeva

Při tomto typu modifikace upravíme strukturu dřeva za účelem zlepšení vlastností pomocí vnějších sil. Při působení těchto sil dojde k zhutnění struktury, díky kterému se zdokonalí vlastnosti jako pevnost nebo tvrdost. Zhutnění je možné díky pórovité struktuře dřeva. Těmito póry se myslí především cévy uvnitř struktury. Výsledné vlastnosti se odvíjí i od provedení lisování. Při slisování můžeme ovlivnit směr slisování vzhledem k dřevním vláknům, tlak působící na dřevo, rychlost lisování nebo teplotu při lisování. Důležitým faktorem je i voda volná (nevázaná), která se nachází uvnitř dřeva. Podmínkou je nepoškodit buněčné stěny příliš vysokým tlakem. Záleží taktéž na druhu dřeviny, protože vlivem rozdílné struktury lze jinak lisovat jehličnaté a listnaté dřeviny [33].

Samotnou kapitolou je plastifikace dřeva [44]. Tu musíme provést před samotným slisováním. Při plastifikaci se dřevo stane přechodně tvárným. Vzroste jeho schopnost plastických deformací a zároveň se snižuje schopnost elastické deformace. To proto, aby dřevo zůstalo na konci v procesu v požadovaném tvaru. Plastifikaci můžeme provést buď za vysokých teplot při vysoké vlhkosti dřeva nebo pomocí chemických látek. Také můžeme tyto metody zkombinovat, což nám zajistí nejvyšší stupeň plasticity [33].

Při prvním způsobu dřevo navlhčíme, přičemž záleží na množství vlhkosti uvnitř dřeva. Dostaneme-li se mez hygroskopicity, tedy na mez, kdy už dřevo není schopno pojmout další vodu, dosáhneme nejvyšší plasticity. Zároveň musíme dřevo zahřát na teplotu asi 100 °C. Pro dosažení tohoto stavu se dřevo nahřívá ve vodní páře, popřípadě se může přímo vařit ve vodě. V některých případech může být dřevo ohříváno mikrovlnami nebo jiným druhem záření. Jisté výzkumy naznačují, že po ohřátí na teploty kolem 170 °C může být dosaženo ještě lepších výsledků, především ve výsledné rozměrové stabilitě [33]. Zároveň při těchto teplotách hrozí vyšší křehkost výsledného materiálu.

Při druhé možnosti plastifikace se dřevo plastifikuje amoniakem, přesněji amoniakovými parami. Jedná se tedy o čpavkování, které bylo zmíněno na konci předešlé kapitoly. Amoniak má velmi dobrou schopnost pronikat do struktury dřeva. Zde dochází k reakcím jak v buněčných stěnách, tak i se samotným ligninem [33]. Tyto reakce mají za následek nejen samotnou plastifikaci, ale také ztmavnutí dřeva.

Dřevo lze částečně slisovat i bez provedení plastifikace. Tento postup je však velmi neúčinný a hrozí, že se dřevo vrátí do původního stavu [33].

Po samotném slisování je dřevo potřeba stabilizovat, ochladit a vysušit [44]. Tyto operace zajistí stálý tvar slisovaného dřeva. Pokud se slisované dřevo používá v podmínkách s vysokou koncentrací vlhkosti, hrozí u něj postupné bobtnání a navrácení k původnímu stavu. Tomu však lze zabránit úpravou slisovaného dřeva nejen chemickou modifikací [33].

Způsoby lisování podle směru působící síly [44]:

- Ve směru kolmém na dřevní vlákna
- Ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny
- Prostorové (izostatické) – síly působí ze všech stran

Způsoby lisování podle rovnoměrnosti [44]:

- Rovnoměrné:
  - Kolmo na dřevní vlákna
  - Rovnoběžné s dřevními vlákny
  - Prostorové (izostatické)
- Nerovnoměrné
- Kolmo na dřevní vlákna

## Lisování dřeva plastifikovaného ve vodní páře ve směru kolmém na vlákna

Nejjednodušší typ lisování, při kterém dřevo leží na podložce a z opačné strany posuvná deska slisovává materiál. Vhodné je mít všechny součásti lisu, které přijdou do kontaktu s dřevem, vyhřívané, aby dřevo mělo stálou teplotu a zůstávalo v plastifikovaném stavu. V průmyslovém měřítku je vhodnější dřevo méně navlhčit. Bude potřeba použít vyšší tlaky, ale razantně se tím sníží doba sušení dřeva. Tlaky vyvinuté lisem mohou dosáhnout hodnoty až 30 MPa. Při tomto druhu lisování lze rozlišit rovnoměrné a nerovnoměrné lisování. Pokud jsou **desky rovné**, mluvíme o **rovnoměrném** lisování. Pokud jsou **tvarované**, mluvíme o **nerovnoměrném** lisování, přičemž tloušťka slisovaného dřeva se bude lišit [44]. Rychlost lisování může ovlivnit tvrdost materiálu. Pokud budeme lisovat rychle, horní vrstvy budou tvrdší než spodní. Při menších rychlostech bude tvrdost podobná pro všechny hloubky. Takto slisované dřevo lze použít při aplikacích, kde požadujeme odolnost vůči opotřebení a mechanické zátěži [33].

## Lisování dřeva plastifikovaného amoniakem

O dřevu slisovaném po plastifikaci amoniakem lze říct, že je to materiál Lignamon. Postup pro výrobu tohoto typu slisovaného dřeva byl objeven v 60. letech 20. století ve spolupráci estonských a československých výzkumných ústavů. Plastifikace probíhá jak hydrotermicky, tak čpavkováním. Lisovací tlak se pohybuje kolem 1,5 MPa. Celkový čas procesu je asi 50 hodin, může se však lišit v závislosti na výsledných požadavcích. Výsledný produkt si zachovává žádané vlastnosti původního dřeva, zároveň má však větší pevnost i pružnost. Dá se obrábět, lepit nebo povrchově dokončovat. V závislosti na stlačení jsou různé možnosti aplikace [33]:

- 15% stlačení – materiál vhodný pro truhláře nebo na výrobu nábytku.
- 30% stlačení – více namáhané části interiéru jako jsou podlahy sportovních hal nebo veřejných prostor, schody, hudební nástroje.
- 50% stlačení – extrémně namáhané části.

## Izostatické lisování dřeva

Tato metoda byla vyvinuta v 90. letech 20. století ve Švédsku. Pro tento druh lisování se používá speciální druh lisu. Jeho součástí je pružná gumová planžeta, která stlačuje požadované dřevo. Pro tuto metodu byl ve Švédsku vyvinut postup průmyslové výroby tzv. Callignum [44]. Touto metodou lze upravovat především dřeva s nižší hustotou. Podmínkou je, aby upravované dřevo nemělo příliš mnoho suků nebo jiných vnitřních vad. Tímto procesem může pevnost v ohybu vzrůst až o 70 % a tvrdost až o 100 % [33]. Takto upravené dřevo má vyšší schopnost propouštět tekutiny, což může být využito při impregnaci při chemické modifikaci. Možnosti uplatnění takto upraveného dřeva je nespočet, především však pro velmi namáhané části interiérů nebo i strojů.

### **Lisování dřeva ve směru rovnoběžném s vlákny**

Tento typ lisování je svým způsobem zvláštní, protože výsledný produkt má jedinečné vlastnosti, díky kterým zůstává trvale plastický. Tento způsob lisování byl vyvinut a patentován ve 20. letech 20. století. Samotný postup spočívá v prvotním plastifikování pomocí páry a vysoké teploty. Postup plastifikování závisí na druhu dřeviny. Poté je takto plastifikované dřevo, které nesmí obsahovat žádné vnitřní deformace, umístěno do speciálního lisu. Ten ze všech stran podpírá dřevo tak, aby při samotném lisování nedošlo k uhnutí vláken. Po stlačení asi o 20 % se lis zafixuje a dřevo ochladí a vysuší. Takto lze modifikovat velké množství druhů dřevin. Výsledný produkt jde i za studena ohýbat. Mluvíme o tzv. ohýbacím dřevu. Menší změny tvaru můžeme provést ručně, pro větší už je potřeba nástrojů. Toto dřevo můžeme taky jinak zpracovávat nebo obrábět. V průmyslovém měřítku byl pro tento druh lisování vyvinut postup Compwood. Ten se liší oproti výše zmíněnému postupu v tom, že po slisování se lis částečně povolí a výsledná změna rozměru je asi kolem 5 % [33]. I tento materiál je však trvale plastický. Využití takto zpracovaného dřeva je částečně omezené. Kvůli vyšší náchylnosti k bobtnání se nehodí do míst s vyšší vlhkostí. Kvůli nižší pevnosti je doporučeno podepření, například pásnicí.

### **3.3.2 Překližka**

Důležitým materiálem, jenž se používal v letectví především pro potah letounů, je překližka. Překližku lze řadit společně s dalšími materiály, jako je složená dýha, heraklit nebo dřevotříska, mezi kompozitní dřevo. Tento pojem zastřešuje velké množství materiálů, které jsou odvozené ze dřeva. Zaměříme se primárně na překližku, jelikož se používala v historii v letectví, a i v současnosti jí lze vidět u dřevěných leteckých konstrukcí, které jsou však raritní.

Jaký byl vlastně podnět k vytvoření překližky? Jak již bylo několikrát zmíněno, dřevo je anizotropní materiál. Překližka tuto vlastnost eliminuje svou konstrukcí. Skládá se z několika k sobě přilepených dřevěných desek, které se nazývají dýhy [49]. Toto lepení probíhá v lisech pod vysokým tlakem, aby došlo k dokonalému spojení. Dýhy mají tloušťku v řádech milimetrů a jsou nařezány ve směru vláken [50]. Při konstrukci překližky je důležité dbát na orientaci vláken v dýhách. Základem je středová dýha, na kterou se z každé strany nalepí jedna dýha. Tyto dvě dýhy mají vůči sobě souhlasnou orientaci vláken, ale zároveň mají vlákna otočená o 90° vůči střední dýze. Pokud bychom na tento soubor dýh nalepili z každé strany další dýhu, byla by orientace vláken těchto dýh souhlasná s vlákny středové dýhy ale otočená o 90° vůči předchozím dýhám. Z tohoto důvodu je počet dýh lichý [51]. Tím jsou zajištěny stejné mechanické vlastnosti ve všech směrech. Zároveň je zajištěna vyšší rozměrová stabilita.

První překližka byla představena na světové výstavě Lewis and Clark Centennial Exposition v Portlandu v roce 1905 [50]. Tato překližka byla třívrstvá, přičemž dýhy byly z douglasky tisolisté. Překližka slavila úspěch a v následujících letech si našla místo ve spoustě průmyslových odvětví. Limitující pro první překližky bylo použité lepidlo. To

bylo přírodní (ze škrobu nebo sóji) nebo živočišné. Tato lepidla špatně odolávala vodě, a proto se výrobky z této překližky používaly pouze v interiérech. Zlom nastal v roce 1934, kdy světlo světa spatřilo první voděodolné syntetické lepidlo. Velké uplatnění našla překližka během druhé světové války. Posloužila při konstrukci mnoha letounů i dalšího vybavení. S postupem času se konstrukce překližky stále vylepšovala, hlavně díky novým druhům lepidla.

Vlastnosti překližky jsou závislé na druhu dřeviny i na lepidlu. Dýhy mohou být z měkkého i tvrdého dřeva [49]. Nejběžnější je asi využití břízového dřeva. Lepidlo pak vybíráme na základě budoucí aplikace překližky. Některé typy lepidel jsou [52]:

- Lepidla na bázi formaldehydu
- Epoxidová lepidla
- Polyvinylacetát
- Lepidla na bázi polyuretanu

Druhů lepidel je obrovské množství, zde jsou vypsána jen některá základní. Nejběžněji používaná lepidla jsou na bázi formaldehydu [51]. Ta zajistí pevný spoj odolný vůči vodě. Nevýhodou je vysoká toxicita. Velkým pozitivem je, že v dnešní době máme velký výběr lepidel i dřevin. Proto můžeme překližku vyrobit na míru budoucí aplikaci [52].

Překližku lze také modifikovat. Některé druhy překližek mohou mít kromě dřevěných vrstev i vrstvy z jiných materiálů. Tím lze ještě zlepšit výsledné vlastnosti. Tyto materiály však nelze zcela považovat za překližky, nýbrž za kompozity.

## 4 Dodavatelé materiálu

Co kdybychom si chtěli hypoteticky postavit letadlo ze dřeva? Dá se sehnat materiál pro stavbu, i když jsou dřevěné letecké konstrukce v dnešní době relativně vzácné? Odpověď zní **ano**. I v dnešní době lze najít prodejce dřeva speciálně pro letecké konstrukce. Těchto prodejců není moc, jsou především v Severní Americe a v Evropě. Pravděpodobně je to z důvodu kupní síly v těchto částech světa a zároveň z důvodu historie, můžeme říct tradice, v konstrukci letadel v těchto oblastech. Na těchto kontinentech se také nachází většina druhů dřevin, které při konstrukci letadel využíváme.

Je potřeba zmínit, že není v kapacitách této práce nalézt všechny dodavatele materiálu. Ne všichni prodejci mají internetové stránky, které jsou pro hledání primárně používány.

V dnešní době internetových tržišť lze koupit dřevo pro stavbu leteckých konstrukcí i na těchto stránkách. Zde je rizikem dodání materiálu, který nesplňuje požadavky.

### 4.1 Severní Amerika

#### 4.1.1 Aircraft Spruce & Specialty Co.

Největší prodejce leteckého příslušenství včetně konstrukčního dřeva v Severní Americe. Historie tohoto prodejce sahá do roku 1956, kdy manželé Bob a Flo Irwinovi založili obchod Fullerton Air Parts na letišti Fullerton Municipal v Jižní Kalifornii. Tento maloobchod se zaměřil na prodej leteckých dílů. V roce 1965 obchod prodali a založili podnik Aircraft Spruce Co., který se zaměřil pouze na prodej smrkového dřeva pro stavbu a restaurování letadel. Později do sortimentu přidávali další vybavení, kvůli kterému změnili název na současný Aircraft Spruce & Specialty Co. Podnik neustále roste a díky stálému zájmu zákazníků se rozrostl o další zaměstnance i prodejny. Aktuálně počet zaměstnanců překonal počet 300 [53].

[www.aircraftspruce.com](http://www.aircraftspruce.com)

### 4.2 Evropa

#### 4.2.1 Touchwood

Především evropský prodejce a zpracovatel dřeva, přesněji smrku sitky a cedru žlutého aljašského. Společně se zpracovatelským závodem v Nizozemsku vlastní ještě závod v Kanadě. Díky tomu mají schopnost uspokojit poptávku jak v Severní

Americe, tak i v Evropě. Touchwood dodává smrkové dřevo nejen pro stavu letadel, ale i pro stavbu lodí, hudebních nástrojů nebo jiných projektů. Cedr žlutý aljašský je vzácná dřevina, která se používá především na podlahy, kvalitní nábytek nebo paluby lodí [54].

[www.sitkaspruce.nl](http://www.sitkaspruce.nl)

**Adresy zpracovatelských závodů:**

1. Nieuwe Molenheide 20  
5482 ZV Schijndel  
Nizozemsko
2. 944 Kalum Lake Road,  
Terrace, BC  
Kanada

#### **4.2.2 Aircraftspruce.eu**

Další zástupce evropských prodejců. Společně se stavebním materiálem prodávají i další příslušenství. Jedná se o zástupce Aircraft Spruce & Specialty Co. v Evropě. To znamená, že prodávají sortiment tohoto podniku, přičemž dodávky probíhají letecky dvakrát týdně ze Spojených států amerických. Aircraftspruce dokáže zprostředkovat i dodávku nadměrnějších nákladů [55].

[www.aircraftspruce.eu](http://www.aircraftspruce.eu)

**Adresa sídla:**

Sandevling Aerospace GmbH  
Münstertäler Str. 22  
79427 Eschbach  
Německo



### 4.2.3 Plywood for Europe

Litevský prodejce překližek prodávající i překližku vhodnou pro potah letounů. Tyto překližky dovážejí především z pobaltských států. Kupující jsou zákazníci z celé Evropy. Leteckou překližku prodávají z břízového dřeva. Na lepení této překližky se používá lepidlo z fenol-formaldehydu. Okraje jsou pak natřeny akrylovým vodoodpudivým nátěrem [56].

[www.plywoodeurope.com](http://www.plywoodeurope.com)

**Adresa:**

Verkių g. 10, Vilnius,  
09108 Vilniaus m. sav.,  
Litva

### 4.2.4 Letecké dřevo

Materiál pro stavbu dřevěných leteckých konstrukcí lze sehnat i v tuzemsku. Tento prodejce nabízí zájemcům jak jehličnaté, tak i listnaté konstrukční dřevo. Z jehličnatých dřevin nabízí dřevo smrku a borovice, z listnatých především lípu a jasan. Domluvit se lze i na jiných dřevinách v případě zájmu kupujícího a taktéž na rozměrech dodávaného dřeva. Sídlo prodejce se nachází u letiště ve Vyškově, dopravu lze zařídit po celé České republice [57].

[www.leteckedrevo.eu](http://www.leteckedrevo.eu)

**Adresa:**

Průmyslová 725  
682 01 Vyškov  
Česká republika

## 5 Nové a perspektivní metody

Vývoj technologií postupuje skokovým tempem, a to se týká i technologií na úpravu a modifikaci dřeva. Spousta výzkumů si klade za cíl vytvořit ze dřeva takový materiál, který by nahradil konstrukční neobnovitelné materiály. A některé z výzkumných prací naznačují, že by tyto nové dřevěné materiály mohly nahradit i takové materiály, u kterých by to bylo několik let nazpět téměř nemyslitelné. Jelikož se však stále jedná o nové materiály, je potřeba dalších výzkumů k dovedení těchto metod do praxe.

### 5.1 Transparentní dřevěné materiály

Jednou z nových metod úpravy je změna dřeva na transparentní materiál, tzn. materiál schopný propouštět světlo.

Podíváme-li se především do oblasti stavebnictví, zjistíme, že velká část spotřebované elektrické energie se vypočítá na osvětlení. Vzhledem k rostoucí populaci a celkově s ekonomickým a technickým pokrokem se předpokládá, že tato spotřeba ještě poroste [58]. Z tohoto důvodu máme v obydlích okna. Přírodní světlo je nejen zadarmo, ale i zdraví prospěšné. Proto by mohlo být prospěšné stavět budovy s větším podílem transparentních materiálů. Problémem je, že současně nejvíce používaným transparentním materiálem je sklo, které má své limity především z důvodu jeho křehkosti i tepelné vodivosti [59]. Ve vývoji je proto řada nových transparentních materiálů. Jedním z těchto materiálů je i transparentní dřevo. To by mohlo mít tu výhodu, že by mohlo sloužit zároveň i jako hlavní stavební materiál díky svým vlastnostem [60].

Princip funkčnosti transparentního dřeva je svým způsobem jednoduchý. V kapitole strukturní a mechanické vlastnosti dřeva byla popsána základní skladba struktury. V případě transparentního dřeva je především důležité chemické složení dřevěné struktury. Buňky jsou z celulózy a hemicelulózy a mezibuněčný prostor je vyplněný ligninem. A právě lignin má klíčovou roli při vytváření transparentního dřeva. Lignin absorbuje světlo až z 95 %, proto je ho potřeba odebrat ze struktury, tzv. **delignifikace** [58].

Jedná se o chemicko-fyzikální proces. Proces je také využíván při výrobě papíru. Při tomto procesu dojde ke zrušení vazeb mezi ligninem a celulózą s hemicelulózą. Zároveň převedeme lignin na produkty schopné rozpouštění ve vodných varných roztocích [61]. Existují dva používané typy procesu delignifikace [62]:

- Sulfátový postup – v roztoku hydroxidy a sulfidy (většinou sodné), častější využití, používají se zásadité chemikálie [62].
- Sulfitový postup – v roztoku většinou oxid siřičitý + vápník, sodík nebo hořčík, menší využití, používají se kyselé chemikálie, vlákna celulózy nemají takovou pevnost jako v případě sulfátového postupu z důvodu kyselého prostředí [62][61].

V obou případech je dřevo v těchto roztocích máčeno za vyšších teplot, které se pohybují v rozmezí 80 °C až 180 °C. Tato teplota se odvíjí v závislosti na postupu a výsledném zpracování. Provedením delignifikace zbydou vlákna celulózy a hemicelulózy, kterým se říká **buničina** [61]. Po delignifikaci se může výsledná buničina ještě vybělit kvůli odstranění či zamaskování zbytků ligninu, avšak tento krok jsme nikde u výroby transparentního dřeva nezaznamenali, patrně z důvodu, že toto bělení snižuje pevnost buničiny [62].



Obrázek 13: Dřevo před a po delignifikaci (upraveno z [59])

Takto delignifikované dřevo samo o sobě nemá ještě žádné transparentní vlastnosti. Je pouze zbavené ligninu a jeho mikrostruktura je více porézní. Neprůhlednost je způsobena rozdílem indexu lomu světla mezi buněčnou stěnou a vzduchem uvnitř buněk. Tento rozdíl způsobuje rozptyl světla, kvůli kterému se zdá delignifikované dřevo jako neprůhledné [60]. Z tohoto důvodu se delignifikované dřevo impregnuje metylmetakrylátem. Ten zaplní všechny póry uvnitř struktury namísto vzduchu a po polymerizaci způsobí se svým rozlišným indexem lomu oproti vzduchu transparentnost materiálu [58].

Výsledná průhlednost materiálu je velmi proměnná. Odvíjí se od tloušťky, množství celulózy ve struktuře i vlastností světla. Podle práce [58] lze v nejlepších případech dosáhnout průhlednosti kolem 90 %. Například při tloušťce 0,7 mm byla propustnost zmíněných 90 %. Po zvětšení tloušťky na 3,7 mm se propustnost snížila asi na 40 %. V případě vzrůstu množství celulózy z 5 % na 65 % se snížila propustnost z 85 % na 34,6 %.

Výsledné mechanické vlastnosti takto vzniklého materiálu jsou vesměs lepší než u samotného polymethylmetakrylátu nebo u samotného delignifikovaného dřeva [63].

Zajímavé je pozorování pevnosti v tahu v závislosti na zbylém ligninu ve struktuře v jedné z prací [60]. Nejlepší pevnosti v tahu ve směru vláken dosahovalo lipové transparentní dřevo s 15% obsahem zbytkového ligninu ve struktuře. Pokud se procento zbytkového ligninu, jakkoliv změnilo, pevnost v tahu podél vláken klesala.

Jiná práce [58] se zaměřila na modul pružnosti v tahu ve směru vláken. V případě transparentního dřeva s 5 % celulózy balzy a 2,9 % zbytkového ligninu v celkovém objemu byl modul pružnosti v tahu ve směru vláken asi 2,05 GPa.

U polymetylmetakrylátu se hodnota modulu pružnosti v tahu pohybuje kolem 1,8 GPa a u delignifikované balzy 0,22 GPa. Je potřeba zmínit, že samotný polymetylmetakrylát není anizotropní, tudíž nerozlišujeme směry tahové zkoušky. V případě tahové zkoušky kolmo k vláknům celulózy však dojdeme k závěru, že modul pružnosti transparentního dřeva je sice vyšší než samotného delignifikovaného dřeva, ale nedosáhne hodnoty polymetylmetakrylátu. Stejně vlastnosti lze pozorovat i u meze pevnosti v podélném, resp. v příčném směru vůči vláknům.



Obrázek 14: Transparentní dřevo [79]

Slibným způsobem, jak použít transparentní dřevo, je výroba překližky. Lze tak ještě vylepšit mechanické vlastnosti transparentního dřeva [59]. Tímto způsobem můžeme také omezit pozorovanou vlastnost horšího modulu pružnosti a meze pevnosti v příčném směru vůči vláknům.

Výroba tohoto druhu překližky probíhá na stejném principu jako u klasické překližky. Transparentní dýhy jsou k sobě lepeny, přičemž se orientace vláken těchto dýh mění o  $90^\circ$ . V jedné z prací byly zkoumány vlastnosti transparentní překližky vyrobené tímto klasickým způsobem a transparentní překližky, u níž se orientace vláken dýh měnila o  $45^\circ$ . Tyto transparentní překližky byly vyrobeny z pěti transparentních dýh, které byly vyrobeny z delignifikované balzy a polymetylmetakrylátu. Obsah zbytkového ligninu ve struktuře byl 3 % a obsah celulózy 10 % [59].

Modul pružnosti v tahu byl vyšší u „klasické“ překližky oproti překližce se změnou orientace o  $45^\circ$  v podélném i příčném směru vzhledem k vláknům základní vrstvy. Ve směru vláken má však nejvyšší modul pružnosti v tahu samotná transparentní dýha. Konkrétní hodnoty byly 4,3 GPa pro samotnou transparentní dýhu, 4,1 GPa pro „klasickou“ překližku a 3,9 GPa pro překližku se změnou orientace o  $45^\circ$  [59].

Mez pevnosti v tahu ve směru vláken má nejvyšší samotná transparentní dýha. Za ní se umístila klasicky orientovaná překližka. Ve směru kolmém na vlákna dosahuje nejvyšší meze pevnosti v tahu klasicky orientovaná překližka následovaná překližkou se změnou orientace vláken o  $45^\circ$ . Jednotlivé hodnoty meze pevnosti v tahu jsou 62,5 MPa pro samotnou transparentní dýhu, 50,1 MPa pro „klasickou“ překližku a 45,4 MPa pro překližku se změnou orientace o  $45^\circ$  [59].

Podíváme-li se na ohybové vlastnosti, resp. na mez pevnosti v ohybu, zjistíme, že nejlepších vlastností dosahuje překližka se změnou orientace vláken o 45°, konkrétně hodnoty asi 80 MPa oproti „klasické“ překližce s hodnotou asi 70 MPa. U samotné transparentní dýhy se bavíme o hodnotě přibližně 50 MPa [59].

Nesmíme opomenout optické vlastnosti těchto překližek. V obou případech lze dosáhnout vysoké propustnosti světla. Při tloušťce překližek 3–3,5 mm dosahuje propustnost světla 83 % pro „klasickou“ překližku a 75 % pro překližku se změnou orientace o 45°. Tyto hodnoty můžeme srovnat se samotnou dýhou o tloušťce asi 0,8 mm nebo se samotným polymetylmetakrylátem o tloušťce 3 mm. V obou případech dosahuje propustnost 90–95 % [59].

Tabulka 1: Shrnutí mechanických vlastností transparentních překližek a jejich částí

	modul pružnosti v tahu ve směru kolmém na vlákna (GPa)	modul pružnosti v tahu ve směru vláken (GPa)	mez pevnosti v tahu ve směru vláken (MPa)	mez pevnosti v tahu ve směru kolmém na vlákna (MPa)	mez pevnosti v ohybu (MPa)	propustnost světla (%)
polymetylmetakrylát	1,8		44,1		57	90-95
transparentní dýha	2,4	4,3	62,5	14,6	43	90-95
transparentní překližka (změna orientace o 45°)	3,5	3,9	45,4	42	82	75
transparentní překližka (změna orientace o 90°)	3,9	4,1	50,1	44,9	68	83

Transparentní dřevo představuje zajímavou alternativu k dnešním, běžně používaným, průhledným materiálům, jako je sklo či průhledné plasty. Díky jeho mechanickým a optickým vlastnostem si ho lze v budoucnosti představit jako konstrukční materiál u budov nebo jiných konstrukcí. Důležitou roli bude hrát pokrok ve výzkumu, jelikož se stále jedná o novou technologii. Dokázali bychom si představit využití transparentních dřevěných materiálů jako materiál oken u malých letadel. U dopravních letadel, především vzhledem k přetlakování kabiny i rozdílům teplot uvnitř a vně kabiny, prozatím převládají pochybnosti.

## 5.2 Kompozity ze dřeva

Dalším způsobem, jenž by mohl sloužit k modifikaci a zlepšení vlastností dřeva v budoucnu, je výroba různých nových druhů dřevěných kompozitů. Tyto kompozity jsou již známé materiály, u kterých se zkoumá možnost vyztužením dřevem. Díky této modifikaci můžeme znatelně zlepšit především pevnostní charakteristiky materiálu.

Mnoho výzkumů a studií zkoumalo možnost využití bambusu coby složku kompozitů. Výsledky v některých z nich byly velmi zajímavé z pohledu pevnostních konstrukcí [64]. Bohužel byt' se bambus může na první pohled jevit jako dřevina, z přírodovědeckého hlediska se řadí do rodu trav [65]. Z toho důvodu mu nebude dále věnována pozornost.

## 5.2.1 Glulam vyztužený FRP

Nejslibnější z progresivních druhů dřevěných kompozitů. FRP je zkratka pro Fibre – reinforced plastic, což by se volně dalo přeložit jako „plast vyztužený vlákny“. V češtině ho pravděpodobně známe pod názvem **vláknový kompozit** [66]. Těmito vlákny bývají většinou skleněná vlákna nebo uhlíková vlákna. Matrice je pak z reaktoplastů nebo termoplastů [67].

Glulam je naproti tomu zkratka pro Glued laminated timber, volně přeloženo jako „lepené lamelové dřevo“. V české literatuře se tento pojem vyskytuje pod názvem **lepená dřevěná konstrukce** nebo **lepené lamelové dřevo**. Jedná se většinou o dlouhé nosníky, které se skládají z několika desek, které se k sobě lepí. Toto lepení probíhá pod tlakem za tepla a jako lepidlo jsou používány různé druhy pryskyřic. Podmínkou jsou dobře opracované stykové plochy pro co nejvyšší pevnost konstrukce. Orientace vláken těchto desek je rovnoběžná. Množství a tloušťka těchto desek může být proměnlivá v závislosti na aplikaci. Tloušťka desek se obvykle pohybuje v rámci několika centimetrů [68]. Vzhledem k použití glulamu především coby nosníků nebo trámů u staveb se na vnější desky používají dřeviny s lepšími mechanickými vlastnostmi, jelikož u těchto desek hrozí větší zatížení na tlak a tah [69]. Vzniknou bloky, které lze k sobě dále lepit. Díky tomu mohou vzniknout nosníky nebo jiné konstrukce, jejichž velikosti bychom nedosáhli pouze samotnými deskami. Lze také vyrobit zahnuté či jinak tvarované lepené dřevěné konstrukce. Použití je různorodé, od interiérů přes střešní konstrukce až po mosty. Devízou lepených dřevěných konstrukcí je pevnost, odolnost, tvářitelnost, rozměrová stabilita, zpracovatelnost.



Obrázek 15: Pohled na lepenou dřevěnou konstrukci [80]

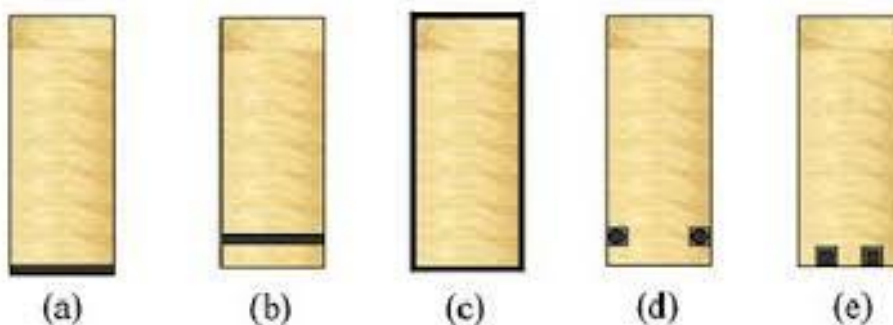
Vyztužení lepené dřevěné konstrukce pomocí FRP může být provedeno více způsoby. Podstatou je vyztužit namáhanou část. Toto vyztužení může být provedeno vložím desky vláknového kompozitu mezi desky lepené dřevěné konstrukce, popřípadě jí nalepit jako poslední vrstvu. Další možností je poslední desku vyztužit vertikálními deskami vláknového kompozitu. Možností je také vyztužení pomocí prutů. Tyto pruty mohou mít kulatý nebo hranatý průřez. Pruty jsou pak vloženy do drážek, které se mohou nacházet na boku desky i na vrchním či spodním povrchu konstrukce. Toto jsou

jen některé z možných druhů vyztužení. Vzhledem k variabilitě možností vyztužení závisí výsledná podoba především na konečném zatížení výsledného produktu [64].

Velice podstatnou součástí je vytvoření dostatečně silné vazby mezi FRP deskou a dřevem. V opačném případě hrozí vznik trhlin na rozhraní dřevo/FRP, které by vedly v konečném důsledku k celkovému selhání spoje. Výzkum tohoto problému je však stále na počátku. Je potřeba dalších výzkumů pro posouzení vlivu vlastností obou materiálů či samotného lepidla na pevnost výsledného spoje [64].

Slibně se také jeví možnost využít předpětí při vyztužování. Přesněji vyztužit lepenou dřevěnou konstrukci, na kterou působí během lepení vnější síla, která způsobí vznik napětí uvnitř struktury. Především během ohybu, přičemž dojde k vyztužení tahem namáhané části lepené dřevěné konstrukce. Tohoto vyztužení je dosaženo nalepením FRP na povrch lepené dřevěné konstrukce. Výzkumy vyvozují zlepšení mechanických vlastností u takto vyztužených lepených dřevěných konstrukcí nejen vzhledem k nevyztuženým konstrukcím, ale také vzhledem ke konstrukcím vyztužených bez předpětí. Jako příklad lze uvést testování lepených dřevěných konstrukcí z osmi desek o celkových rozměrech (0,13 x 0,305 x 6,7 m) z douglasky tisolisté. K vyztužení se použil vláknový kompozit s uhlíkovými vlákny o tloušťce 3,3 mm, který byl nalepen na povrch strany namáhané na tah. K lepení se využila fenolová pryskyřice. Takto vyztuženy byly lepené dřevěné konstrukce s předpětím i bez předpětí. Modul pružnosti v ohybu dosáhl u nevyztužené kontrolní konstrukce 11,7 GPa, kdežto u obou druhů vyztužených konstrukcí hodnoty 12,6 GPa. Zajímavější byly změny meze pevnosti v ohybu. U kontrolní konstrukce dosahovala 27,6 MPa. U vyztužené konstrukce bez předpětí dosahovala 39,9 MPa a s předpětím 49 MPa [64].

Tato nová technologie vykazuje slibné výsledky i vzhledem k jisté „novosti“ této metody. Pokud půjde výzkum stejným tempem jako doposud, mohli bychom tuto technologii vidět v blízké budoucnosti i v běžném životě. V případě leteckých konstrukcí by mohla tato technologie být využita u konstrukcí křídel jako pásnice vzhledem k druhu namáhání.



Obrázek 16: Znázornění lepené dřevěné konstrukce v řezu s možnostmi vyztužení [81]

## 5.3 Nanotechnologie

V poslední letech vzrostl zájem o nanotechnologie, což je obor vědy, který se zaměřuje na technologie a materiály ve velikostech v řádech nanometrů. S nanomateriály se můžeme už v dnešní době setkat téměř na každém kroku a často si to nemusíme ani uvědomit. S nanotechnologiemi se setkáme ve spoustě odvětví, počínaje strojírenstvím při úpravě povrchů materiálů přes barvy a laky až po impregnace na textil. Není proto divu, že se neustále zkoumá možnost využití nanotechnologií v kombinaci se dřevem. V kombinaci se dřevem existují dvě možnosti využití těchto nanotechnologií [70]:

- Povrchové barvy a laky obsahující nanomateriály
- Impregnace nanočásticemi, které proniknou do pórovité struktury dřeva

V případě povrchových nátěrů z nanomateriálů se jeví jako jedna z největších výhod jejich nezávadnost vůči životnímu prostředí. Současné nátěry obsahují rozpouštědla a chemikálie, které mohou být toxické. Tyto nátěry mají za cíl zlepšit trvanlivost, mechanické vlastnosti, odolnost vůči hoření nebo zvýšit hydrofobnost. Nátěry mají i výhodu v lehčí aplikaci oproti penetraci. Nanočástice použité v těchto nátěrech mohou například být [70]:

- **Oxid zinečnatý (ZnO)** – dodává dřevu odolnost vůči hoření a mikrobům. Také zvyšuje hydrofobnost dřeva.
- **Oxid titaničitý (TiO<sub>2</sub>)** – dodává dřevu odolnost vůči mikrobům a proti oděrům a poškrábání
- **Oxid ceričitý (CeO<sub>2</sub>)** – dodává dřevu tvrdost a odolnost proti oděrům
- **Grafenové nanovrstvy** – dodává dřevu ohnivzdornost

Tyto látky se nanášejí na povrch dřeva pomocí roztoků a laků, jako jsou vodní roztoky, polyuretanové a akrylové laky, ethanol, propylenglykol nebo syntetické pryskyřice. Pro každý typ nanočástice je vhodný jiný typ roztoku. Důležitým aspektem je rovnoměrné rozložení nanočástic po celém objemu těchto roztoků a laků [70].

Další možností je využití nanočástic v případě lepidel, které se používají ve výrobě dřevěných kompozitů nebo překližek pro slepení jednotlivých vrstev. V tomto případě byl zkoumán vliv na nejvíce používaná lepidla, a to lepidla na bázi formaldehydu. Tato lepidla byla upravena například pomocí [70]:

- **Oxid křemičitý (SiO<sub>2</sub>)** – zvýšení pevnosti v ohybu, tahu i smyku, zvýšení modulu pružnosti v ohybu, zlepšení rozměrové stability
- **Oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** – zvýšení pevnosti v ohybu i modulu pružnosti v ohybu, zlepšení rozměrové stability a pokles uvolňování toxického formaldehydu
- **Oxid zinečnatý (ZnO)** – zvýšení pevnosti i modulu pružnosti v ohybu, zlepšení rozměrové stability



- **Oxid titaničitý (TiO<sub>2</sub>)** – zvýšení pevnosti v ohybu i modulu pružnosti v ohybu a pokles uvolňování toxického formaldehydu

Nanotechnologii lze použít ještě jedním odlišným způsobem. Místo toho, abychom upravili dřevo nanočásticemi, můžeme ze dřeva získat nanomateriály pro modifikaci jiných materiálů. Konkrétně lze ze dřeva získat nanocelulózu a ligninové nanočástice [70].

Nanocelulózu lze získat z delignifikovaných vláken dřeva ve formě nanovláken nebo nanokrystalů. Postup delignifikace je stejný jako u transparentních dřevěných materiálů, viz kapitola 5.1 *Transparentní dřevěné materiály*. V závislosti na konečném zpracování nanocelulózy pak dostaneme výše zmíněná nanovlákná nebo nanokrystaly. Výzkumy se zabývají využitím nanocelulózy jako složky jiných materiálů za účelem jejich zlepšení. Přidání celulózových nanokrystalů do polyvinylacetátu (PVA) zlepšilo jeho vlastnosti jako tvrdost nebo tepelnou stabilitu. Jiný výzkum naznačuje zlepšení vlastností u lepidel na bázi formaldehydu, do kterých byla přidána celulózová nanovlákná. Spoje lepené takto upraveným lepidlem měly lepší mechanické vlastnosti a nižší úroveň uvolňování toxického formaldehydu. Přidání nanocelulózy do nátěrů zlepšilo výsledné vlastnosti těchto nátěrů. Především u vodou ředitelných akrylových nátěrů se přidáním nanocelulózy zlepšily vlastnosti, jako je tvrdost, odolnost vůči poškrábání, pevnost v tahu nebo odolnost vůči plísním [70].

Ligninové nanočástice jsou produktem ligninu, přičemž lignin má tu výhodu, že jakožto vedlejší produkt při výrobě papíru je cenově dostupný a zároveň vykazuje žádoucí vlastnosti jako antioxidační aktivita nebo tepelná stabilita. Částice samotného ligninu však mají i své nevýhody, jako je velikost těchto částic nebo různé tvary částic. Proto se přišlo s ligninovými nanočásticemi, které tyto neduhy postrádají. Ligninové nanočástice jsou spojovány s pozitivními vlastnostmi jako antioxidační a antimikrobiální účinky, odolnost vůči UV záření nebo absorpce těžkých kovů. Vzhledem k těmto vlastnostem se staly tyto částice předmětem zkoumání v několika pracích. Ligninové nanočástice mohou být použity jako ztužující činidlo při výrobě polymerů, v kombinaci s tymiánovými esenciálními oleji ho lze využít jako přírodní prostředek pro ochranu dřeva proti hnilobě a houbám. Celkově mají ligninové nanočástice největší potenciál ve využití v ochranných nátěrech dřeva, avšak díky novotě této technologie je třeba dalšího bádání v této oblasti. Další oblastí, kde by bylo možno využít tyto nanočástice, je výroba kompozitů a nanokompozitů. Ligninové nanočástice ve spojení s polymethylmetakrylátem vytvořil materiál, který je tvrdší, odolnější vůči oděru a UV záření oproti klasickému polymethylmetakrylátu. I tato oblast je však ještě stále téměř neprobádaná a je proto třeba dalších výzkumů a prací na toto téma [70].

# Závěr

Zadáním práce bylo zjistit, zda by mohlo dřevo zažít svou renesanci v rámci leteckých konstrukcí díky metodám zlepšování jeho vlastností.

V první části byla stručně popsána mikroskopická stavba dřevin. To znamenalo popsat rozdíly mezi jehličnatými a listnatými dřevinami, ať už z pohledu chemického složení nebo typu buněk a jejich funkcí. Jelikož se jednalo o stručný popis, byla tato část relativně zkrácena. Vzhledem k cílům práce je to pochopitelné, neboť samotná stavba dřeva by mohla být rozsahově tématem jiných prací.

Další část byla věnována mechanickým vlastnostem dřevin. Byly vypsány základní mechanické vlastnosti, které jsou podstatné pro letecké konstrukce, včetně jejich popisu a postupu jejich zkoušení. U některých jsou zmíněny i normy těchto zkoušek. Závěr této části patřil základním dřevinám, které našly největší uplatnění u leteckých konstrukcí kvůli svým mechanickým i přírodním vlastnostem.

V pořadí následující kapitola popsala některé významné letecké konstrukce, k jejichž stavbě posloužilo především dřevo. Jedná se především o historické konstrukce z důvodu historicky většího zastoupení dřeva v letectví i díky informacím, které bylo možné dohledat o těchto konstrukcích především týkajících se využitého druhu dřeva. U novodobých raritních dřevěných leteckých konstrukcí byl problém nalézt bližší technické specifikace, především co se využití dřeva v konstrukci týče. Přisuzujeme to především firemnímu tajemství u těchto strojů, ale roli mohly hrát samozřejmě i další okolnosti.

Nejobsáhlejší čtvrtá kapitola byla stěžejní, jelikož se již plně zaměřila na téma závěrečné práce. Byly v ní popsány metody zlepšování dřeva. Z důvodu množství a různorodosti metod jsme vybrali a popsali ty metody, které ve výsledku zlepšily ty konkrétní vlastnosti, které považujeme u leteckých konstrukcí za podstatné a zároveň měly minimální negativní dopad na jiné, taktéž podstatné, vlastnosti. Bohužel byl problém nalézt výzkumné práce, které by se zaměřily na dřeviny používané v letectví. Proto byla snaha nalézt alespoň takové zdroje, které se zabývaly dřevinami používanými okrajově v letectví, popřípadě dřevinami ze stejného rodu.

Předposlední část byla věnována dodavatelům materiálu, přesněji dřeva, které lze použít pro stavbu leteckých konstrukcí. Dodavatelů existuje určitě více, avšak předpokládáme, že ne všichni tito prodejci mají své webové stránky, skrze které jsme je vyhledávali. Zaměřili jsme se především na Evropu a z části i na Severní Ameriku.

Závěrečná část byla věnována novým a perspektivním metodám zlepšování dřeva. Soustředili jsme se na metody, které se jeví jako nejzajímavější a zároveň měly největší potenciál se stát v budoucnosti běžnými modifikacemi. Zaměřili jsem se na dřevěné transparentní materiály, na dřevěné kompozity a nanotechnologii ve spojení se dřevem. Mezi zajímavé varianty vzhledem k budoucím možnostem využití patří transparentní dřevěné materiály.

Tabulka 2: Srovnání základních mechanických vlastností [71][72][73][74]

	hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	modul pružnosti v ohybu (GPa)	mez pevnosti v ohybu (MPa)
Smrk sitka	370 (po vysušení)	11	70
Douglaska tisolistá	450 (po vysušení)	13,8	84
Topol ussurijský modifikovaný DMDHEU	>300	12,75	135
Borovice vejmutovka modifikovaná furfurylalkoholem	910	11 (s použitím ESO)	80 (s použitím ESO)
Borovice těžka modifikovaná křemičitanem sodným	>400	18,76 (s použitím CNF)	170 (s použitím CNF)
Hliníková slitina 2024	2770	72,4 (v tahu)	až 485 v závislosti na stavu (v tahu)
Polyetheretherketon	1340	4	170
Polyamido-imidy	1400	5	150
Uhlíko-epoxidový kompozit	1600	70 (v tahu)	570 (v tahu)

V tabulce nalezneme srovnání mechanických vlastností dřevin a některých modifikací se základními materiály používanými v letectví. Především si můžeme všimnout nižší hustoty u dřevin oproti konvenčním materiálům. Z tabulky vyplývá, že dřevo upravené některými metodami může konkurovat plastům v těchto základních vlastnostech. Jedná se však o základní přehled, který je potřeba brát s rezervou.

Na základě výsledků práce usuzujeme, že dřevo má šanci v budoucnu zaujmout důležitější postavení v rámci materiálů pro výrobu leteckých konstrukcí. Především díky ekologii, na kterou se v poslední době velmi dbá. Nemysleme si, že by v blízké budoucnosti nastala doba, kdy budeme létat v celodřevěných letadlech, avšak tyto stroje by mohly mít některé části postavené z modifikovaného dřeva či z kompozitů se dřevěnou složkou. Dále může být modifikace dřeva vhodná při stavbě historických dřevěných replik nebo malých letounů pro nadšence. Správně modifikované dřevo by mohlo zvýšit bezpečnost a schopnosti letounu. Tato pozitiva by ve výsledku mohla vést k větší oblibě dřevěných konstrukcí a dále také k většímu zájmu o další výzkum modifikací dřeva společně s komercializací postupů modifikace.

Tabulka 3: Shrnutí vlivu jednotlivých modifikací na základní mechanické vlastnosti dřeva

	Chemické zpracování						Mechanická modifikace	
	Acetylace	DMDHEU	Furfurylace	Impregnace pryskyřicemi	Impregnace křemičitánem sodným	Lisování dřeva	Překlížka	
Pružnost	zlepšení, v kombinaci se slisováním ještě větší zlepšení	zlepšení, odvíjí se od použitého katalyzátoru a vývrzovací teplotě	zlepšení, v případě použití vhodného množství epoxidovaného sójového oleje větší zlepšení	závislost na druhu pryskyřice, ve většině případů zlepšení	zlepšení, v kombinaci s celulózovými nanovláknými větší zlepšení	závislost na druhu dřeviny a lisování, u vhodné kombinace zlepšení	závislost na druhu dřeviny a lepidla, zlepšení alespoň v jednom směru	
Pevnost	zlepšení, v kombinaci se slisováním ještě větší zlepšení	zlepšení, odvíjí se od použitého katalyzátoru a vývrzovací teplotě	zhoršení, v případě použití vhodného množství epoxidovaného sójového oleje zlepšení	závislost na druhu pryskyřice, ve většině případů zlepšení	zlepšení, v kombinaci s celulózovými nanovláknými větší zlepšení	závislost na druhu dřeviny a lisování, u vhodné kombinace zlepšení	závislost na druhu dřeviny a lepidla, zlepšení alespoň v jednom směru	
Tvrdost	zlepšení, v kombinaci se slisováním ještě větší zlepšení	zlepšení	zlepšení, v případě použití vhodného množství epoxidovaného sójového oleje větší zlepšení	závislost na druhu pryskyřice, ve většině případů zlepšení	zlepšení	závislost na druhu dřeviny a lisování, u vhodné kombinace zlepšení	závislost na druhu dřeviny	
Jiné	závislost na druhu dřeviny, u jiných může dojít ke zhoršení, hydrofobnost, odolnost vůči hnilobě	závislost na druhu dřeviny, u jiných může dojít ke zhoršení, rozměrová stálost	závislost na druhu dřeviny, zlepšena rozměrová stálost, snížená houževnatost	závislost na druhu dřeviny a pryskyřice, u některých odolnost vůči biologickým škůdcům, vznícení a hoření nebo chemikáliím, zlepšena rozměrová stálost	závislost na druhu dřeviny, hydrofobnost, odolnost vůči vznícení a hoření	závislost na druhu dřeviny a lisování, každá z kombinací má odlišné ostatní vlastnosti	závislost na druhu dřeviny a lepidla, vysoká toxicita některých lepidel	

# Obsah použitých zdrojů

- [1] Mikroskopická stavba jehličnatých dřevin. *Nábytkářský informační systém* [online]. c2013 [cit. 2024-02-04]. Dostupné z: <https://www.n-i-s.cz/cz/mikroskopicka-stavba-jehlicnatych-drevin/page/321/>
- [2] Chemické složení dřeva. *Dřevo centrum* [online]. [cit. 2024-02-04]. Dostupné z: <https://drevo.celyden.cz/sloen-a-vlastnosti-deva/chemicke-slozeni-dreva/index.html>
- [3] Druhy dřevin. *Informační systém MUNI* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/jc6o7/5519230/pracestechnym/drevo/druhdyrevin.html>
- [4] Stavba dřeva - část 2/2. *Mezi stromy* [online]. [2017] [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/stavba-dreva-cast-2-2/odborny>
- [5] Mikroskopická stavba listnatých dřevin. *Nábytkářský informační systém* [online]. c2013 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.n-i-s.cz/cz/mikroskopicka-stavba-listnatych-drevin/page/322/>
- [6] Mechanické vlastnosti dřeva domácích dřevin. *Dřevostavitel* [online]. 2013 [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/mechanicke-vlastnosti-dreva-domacich-drevin>
- [7] NOVÁK, Petr. Dřevo je geniální kompozit 1.díl. *Dřevostavitel* [online]. 2012 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/drevo-je-genialni-kompozit-1dil>
- [8] Dřevo - základní mechanické vlastnosti dřeva. *VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební - Zkoušení stavebních materiálů a výrobků* [online]. 2010 [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: [https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo\\_zkouseni](https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zkouseni)
- [9] TECHNICKÉ NORMY ČSN. *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. 2012.
- [10] Vlastnosti ohýbacího dřeva. *Truhlářství URBAN* [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://www.eurourban.cz/vlastnosti-ohybaciho-dreva>
- [11] DŘEVO. *BLASTER* [online]. [cit. 2024-04-11]. Dostupné z: <https://www.brouseni-podlah.cz/drevo/>
- [12] Sitka Spruce. *Forests for Oregon* [online]. Spring 2008, **2008**, 2 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.oregon.gov/ODF/Documents/ForestBenefits/SitkaSpruce.pdf>

- [13] American Coast Douglas Fir Wood. *MatWeb* [online]. c1996-2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=fb8008d482234765aedf64a3bc252472&n=1>
- [14] American Sitka Spruce Wood. *MatWeb: Material property data* [online]. c1996-2024 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=1e56abdf98904f2ca53bff4bd1250cab>
- [15] Douglas-fir. *Naturally:wood* [online]. c2024 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.naturallywood.com/species/douglas-fir/>
- [16] Types of wood used in plane construction. *Wooden Aviation* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://woodenaviation.com/types%20of%20wood%20used.html>
- [17] The Otto Lilienthal Glider: Building and safely flying a replica Otto Lilienthal glider. *United States Hang Gliding and Paragliding Association* [online]. 2018 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.ushpa.org/page/otto-lilienthal-glider.aspx>
- [18] THE AEROPLANE MODELS OF LILIENTHAL. *Otto Lilienthal Museum* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.lilienthal-museum.de/olma/e213.htm>
- [19] AIRSPEED HORSA. *Dumfries & Galloway Aviation Museum* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.dumfriesaviationmuseum.com/the-collection/aircraft/airspeed-horsa-glider/>
- [20] AIRSPEED HORSA GLIDER. *Harris Lebus* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://harrislebus.com/airspeed-horsa-glider/>
- [21] The Wright Flyer. *National Park Service* [online]. 2017 [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://www.nps.gov/articles/wrightflyer.htm>
- [22] Pilot the 1903 Flyer. *PBS: NOVA* [online]. 2003 [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://www.pbs.org/wgbh/nova/wright/flye-nf.html>
- [23] Spruce and Ash. *WRIGHT BROTHERS AEROPLANE COMPANY: A VIRTUAL MUSEUM OF PIONEER AVIATION* [online]. c1999-2015 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: [https://www.wright-brothers.org/History\\_Wing/Wright\\_Story/Inventing\\_the\\_Airplane/Off\\_on\\_Adventure/Aircraft\\_Materials\\_sidebar.htm](https://www.wright-brothers.org/History_Wing/Wright_Story/Inventing_the_Airplane/Off_on_Adventure/Aircraft_Materials_sidebar.htm)
- [24] *1903 Wright Flyer* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: [https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm\\_A19610048000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000)

- [25] HANDRIX, Kris. The RAF's 'Wooden Wonder'. *Royal Air Force Museum* [online]. 2019 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.rafmuseum.org.uk/blog/the-wooden-wonder-of-the-raf/>
- [26] PUJMAN, Ivo. De Havilland DH-98 Mosquito – Dřevěný zázrak. *Aeroweb* [online]. 2010 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/2474-de-havilland-dh-98-mosquito-dreveny-zazrak>
- [27] ŠAMAN, Vojtěch. Návštěvou v SD-planes: aneb jak postavit neobyčejné letadlo pro (ne)náročné piloty. *Pilot LAA ČR: Bulletin Letecké amatérské asociace ČR*. 2021, **2021**(12), 10-15.
- [28] Japan to launch world's first wooden satellite to combat space pollution: The environmentally friendly LignoSat probe – set to orbit this summer – has been created to combat harmful aluminium particles. *The Guardian* [online]. 17 Feb 2024n. I. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/science/2024/feb/17/japan-to-launch-worlds-first-wooden-satellite-to-combat-space-pollution>
- [29] Japan To Soon Launch World's First Wooden Satellite: Know All About It. *NDTV* [online]. 21 Feb 2024n. I. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.ndtv.com/science/japan-to-soon-launch-worlds-first-wooden-satellite-know-all-about-it-5101993>
- [30] ROWSON, Ali, Abdullah UMMI HANI, Ashaari ZAIDON, Hamid NORUL HISHAM a Hua LEE SENG. Hydrothermal Modification of Wood: A Review. *MDPI* [online]. 2021 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/16/2612>
- [31] PRIADI, Trisna a Salim HIZIROGLU. Characterization of heat treated wood species. *ScienceDirect* [online]. 2013 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306912008965>
- [32] YILDIZ, Sibel, Engin GEZER a Umit YILDIZ. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *ScienceDirect* [online]. 2005 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132305003045>
- [33] SUŠENÍ A MODIFIKACE DŘEVA. *MENDELU Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. 2017 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD\\_NMS/Povinne\\_predmety/Modifikace\\_dreva/HUD%20MOD%20text%202017.pdf](https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_predmety/Modifikace_dreva/HUD%20MOD%20text%202017.pdf)
- [34] MODIFIKACE DŘEVA – NÁZVOSLOVÍ. *MENDELU Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. 2017 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD\\_NMS/Povinne\\_predmety/Modifikace\\_dreva/MOD%20nazvoslovi%202017.pdf](https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_predmety/Modifikace_dreva/MOD%20nazvoslovi%202017.pdf)

- [35] AUGUSTINA, Sarah, Wahyu DWIANTO, Imam WAHYUDI, Wasrin SYAFII, Philippe GÉRARDIN a Sari Delviana MARBUN. Wood impregnation in relation to its mechanisms and properties enhancement. *NC State University BioResources* [online]. 2023 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/wood-impregnation-in-relation-to-its-mechanisms-and-properties-enhancement/>
- [36] ROWELL, Roger. Acetylation. *FOREST PRODUCTS JOURNAL* [online]. 2006, **2006**(9), 12 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.accoya.com/app/uploads/2020/04/Wood-Acetylation-Roger-Rowell.pdf>
- [37] MANTANIS, George. Chemical modification of wood by acetylation or furfurylation: A review of the present scaled-up technologies. *NC State University BioResources* [online]. 2017 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/chemical-modification-of-wood-by-acetylation-or-furfurylation-a-review-of-the-present-scaled-up-technologies/>
- [38] GUO, Jianhui, Chao WANG, Cheng LI a Yang LIU. Effect of Acetylation on the Physical and Mechanical Performances of Mechanical Densified Spruce Wood. *MDPI* [online]. 2022 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/10/1620>
- [39] CARMO, Julia, Dennis JONES, Aarni METSA, Antti NURMI a Richard THOMPSON, VAN ACKER, Joris a Callum HILL, ed. *PROCEEDINGS OF THE FIRST EUROPEAN CONFERENCE ON WOOD MODIFICATION*. 2003.
- [40] DEJMAL, Aleš. IMPREGNACE DŘEVA DMDHEU. *MENDELU Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. 2012 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD\\_NMS/Povinne\\_predmety/Modifikace\\_dreva/PR%20MOD%2007.pdf](https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_predmety/Modifikace_dreva/PR%20MOD%2007.pdf)
- [41] YUAN, Jie, Yingcheng HU, Lifan LI a Fangchao CHENG. The mechanical strength change of wood modified with DMDHEU. *NC State University BioResources* [online]. 2013 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-mechanical-strength-change-of-wood-modified-with-dmdheu/>
- [42] LIU, Meihong, Shaoyi LYU, Limin PENG, Liping CAI, Zhenhua HUANG a Jianxiong LYU. Improvement of Toughness and Mechanical Properties of Furfurylated Wood by Biosourced Epoxidized Soybean Oil. *ACS Publications: Most Trusted. Most Cited. Most Read.* [online]. 2021 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.1c01358>
- [43] LANDE, Stig, Mats WESTIN a Marc SCHNEIDER. Properties of furfurylated wood. *Taylor & Francis Online* [online]. 6 October 2011n. I. [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0282758041001915>



- [44] Modifikované dřevo: Modifikované dřevo – dřevo speciálně upravené. *Nábytkářský informační systém* [online]. 2013 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://www.n-i-s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/>
- [45] Vodní sklo. *Ferwer* [online]. [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://www.ferwer.cz/lexikon/latka/vodni-sklo>
- [46] PENG, Yucheng, Yousoo HAN a Douglas J. GARDNER. Sodium silicate coated wood. *International Society of Wood Science and Technology* [online]. 2010 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://www.swst.org/wp/meetings/AM10/pdfs/WS-59%20Peng%20Yucheng%20Paper.pdf>
- [47] LI, Ping, Yuan ZHANG, Yingfeng ZUO, Jianxiong LU, Guangming YUAN a Yiqiang WU. Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression. *ScienceDirect* [online]. 2020 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785419312748>
- [48] Cellulose Nanofiber (Cellulose Nanofibril, Nanofibrillated Cellulose, CNFs). *Nanografi* [online]. 2024 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://nanografi.com/popular-products/cellulose-nanofiber-cellulose-nanofibril-nanofibrillated-cellulose-cnfs/>
- [49] The properties and characteristics of plywood. *SFK plywood* [online]. 2023 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://sfkplywood.com/the-properties-and-characteristics-of-plywood/>
- [50] WANG, Tianxiang, Yue WANG, Roberto CROCETTI a Magnus WÅLINDER. In-plane mechanical properties of birch plywood. *ScienceDirect* [online]. 2022 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822015252>
- [51] *Plywood and laminated wood* [online]. [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Plywood-and-laminated-wood>
- [52] The best adhesives for plywood: A comprehensive guide. *SFK plywood* [online]. 2023 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: [https://sfkplywood.com/the-best-adhesives-for-plywood-a-comprehensive-guide/#Construction\\_Adhesives](https://sfkplywood.com/the-best-adhesives-for-plywood-a-comprehensive-guide/#Construction_Adhesives)
- [53] Aircraft Spruce & Specialty Co. *Aircraft Spruce & Specialty Co.* [online]. c1995 - 2024 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.aircraftspruce.com/>
- [54] TOUCHWOOD. *TOUCHWOOD* [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://sitkaspruce.nl/>
- [55] *Aircraftspruce.eu* [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.aircraftspruce.eu/>

- [56] *Plywood for europe* [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.plywoodeurope.com/>
- [57] *Letecké dřevo* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.leteckedrevo.eu/>
- [58] LI, Yuanyuan, Qiliang FU, Shun YU, Min YAN a Lars BERGLUND. Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance. *ScienceDirect* [online]. 19 January 2022n. I. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1525779721011879#>
- [59] FU, Qiliang, Min YAN, Erik JUNGSTEDT, Xuan YANG, Yuanyuan LI a Lars BERGLUND. Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite. *ScienceDirect* [online]. 14 June 2018n. I. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353818301593#bib16>
- [60] WU, Jiamin, Yan WU, Feng YANG, Caiyun TANG, Qiongtao HUANG a Jilei ZHANG. Impact of delignification on morphological, optical and mechanical properties of transparent wood. *ScienceDirect* [online]. 7 December 2018n. I. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X1830472X>
- [61] Výroba sulfátových buničin. *MENDELU Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD\\_BC/Povinne\\_predmety/Vyroba\\_buniciny\\_a\\_papiru/VVP\\_03\\_-\\_Vyroba\\_buniciny.pdf](https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_BC/Povinne_predmety/Vyroba_buniciny_a_papiru/VVP_03_-_Vyroba_buniciny.pdf)
- [62] CELULÓZA: Buničina. *Katedra chemie: Přírodovědecká fakulta Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem* [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/Celuloza.pdf>
- [63] JUNGSTEDT, Erik, Céline MONTANARI, Sören ÖSTLUND a Lars BERGLUND. Mechanical properties of transparent high strength biocomposites from delignified wood veneer. *ScienceDirect* [online]. 24 February 2020n. I. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X20300919?via%3Dihub#t0015>
- [64] SUN, Xiaofeng, Minjuan HE a Zheng LI. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. : *ScienceDirect* [online]. 2020 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182030756X?via%3Dihub>

- [65] Bambus – tráva, která zabíjí. *Prima ZOOM* [online]. 2016 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://zoom.iprima.cz/valky/bambus-trava-ktera-zabiji>
- [66] Naše systémová nabídka pro duroplastické umělé hmoty: Plasty laminované vlákny, lisované dřevo napuštěné umělou pryskyřicí a blokový třískový materiál. *Röchling* [online]. 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.roechling.com/cz/industrial/produkty/duroplasty>
- [67] KULÍŠEK, Viktor. MKP a ortotropní materiály: Mechanika kompozitních materiálů. *ČVUT Fakulta strojní* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: [https://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/mkm/Kompozity\\_mkp\\_2014.pdf](https://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/mkm/Kompozity_mkp_2014.pdf)
- [68] 3.8 Hodina číslo 49-50 - postup výroby lepených dřevěných konstrukcí. *Střední škola a Základní škola, Oselce* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.stredniskolaoselce.cz/data/download/file/okal/Hodina%2049-50%20postup%20v%C3%BDroby%20lepen%C3%BDch%20d%C5%99ev%C4%9Bn%C3%BDch%20konstrukc%C3%AD.pdf>
- [69] About glulam. *Swedish wood* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.swedishwood.com/building-with-wood/about-glulam/>
- [70] BANSA, Richa, Harish C. BARSHILIA a Krishna K. PANDEY. Nanotechnology in wood science: Innovations and applications. *ScienceDirect* [online]. 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024008286?casa\\_token=GsrIj9wyFakAAAAA:W6q9PIKNaXUgB-Pm5CXMuMIA17NjKpTjjFbi777sEkcaTyZQmyfBFCm4Nh-CeEKXnLY5j9cmXtg#ab0005](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024008286?casa_token=GsrIj9wyFakAAAAA:W6q9PIKNaXUgB-Pm5CXMuMIA17NjKpTjjFbi777sEkcaTyZQmyfBFCm4Nh-CeEKXnLY5j9cmXtg#ab0005)
- [71] Slitiny hliníku. *Fakulta strojní ČVUT* [online]. 2013 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: [https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/PDF\\_01-Slitiny%20Al.pdf](https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/PDF_01-Slitiny%20Al.pdf)
- [72] PEEK: Strong, stiff plastic with outstanding chemical resistance; performs over a wide range of temps. *Curbell plastics* [online]. c2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.curbellplastics.com/materials/plastics/peek/>
- [73] MELTON, George H., Edward N. PETERS a Ruth K. ARISMAN. Engineering Thermoplastics. *ScienceDirect* [online]. 2011 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/polyamideimides>
- [74] Datasheet: Carbon/Epoxy Composite. *RS Composites* [online]. [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/e7c8/0900766b815820b9.pdf>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura jehličnatých dřevin [1] .....	13
Obrázek 2: Struktura listnatých dřevin [5] .....	13
Obrázek 3: Směry zkoušení vlastností dřeva [8] .....	14
Obrázek 4: Schéma zkoušky tvrdosti podle Janky [11] .....	15
Obrázek 5: Smrk sitka [72] .....	16
Obrázek 6: Douglaska tisolistá [73] .....	17
Obrázek 7: Detailní pohled na centrální část Lilienthal Normalsegelapparat [74] .....	18
Obrázek 8: Pohled na dřevěný trup Airspeed Horsa zevnitř [75] .....	19
Obrázek 9: Pohled zblízka na konstrukci Wright Flyer [76] .....	19
Obrázek 10: Pohled na dřevěný trup de Havilland DH.98 Mosquito při restauraci [77] .....	20
Obrázek 11: Pohled na dřevěnou kostru trupu letounu SD-1 [27] .....	21
Obrázek 12: Vizualizace LignoSatu [28] .....	22
Obrázek 13: Dřevo před a po delignifikaci (upraveno z [59]) .....	43
Obrázek 14: Transparentní dřevo [79] .....	44
Obrázek 15: Pohled na lepenou dřevěnou konstrukci [80] .....	46
Obrázek 16: Znárodnění lepené dřevěné konstrukce v řezu s možnostmi vyztužení [81] .....	47

## Seznam grafů

Graf 1: Míra absorpce vody v závislosti na čase (upraveno z [38]) .....	25
Graf 2: Povrchová tvrdost jednotlivých vzorků (upraveno z [38]) .....	26
Graf 3: Mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu u jednotlivých vzorků (upraveno z [38]) .....	26
Graf 4: Závislost modulu pružnosti v ohybu na teplotě pro různé katalyzátory (upraveno z [48]) .....	27
Graf 5: Závislost meze pevnosti v ohybu na vytvrzovací teplotě pro různé katalyzátory (upraveno z [48]) .....	28
Graf 6: Mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu pro jednotlivé roztoky (upraveno z [49]) .....	30
Graf 7: Povrchová tvrdost pro jednotlivé roztoky a zbarvení vzorků vlivem roztoků (upraveno z [49]) .....	30
Graf 8: Modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu pro jednotlivé roztoky (upraveno z [46]) .....	33

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnutí mechanických vlastností transparentních překližek a jejich částí	45
Tabulka 2: Srovnání základních mechanických vlastností [71][72][73][74] .....	51
Tabulka 3: Shrnutí vlivu jednotlivých modifikací na základní mechanické vlastnosti dřeva.....	52