

# Návrh konstrukce součásti z kompozitních materiálů

Tomáš Maděryč

---

Bakalářská práce  
2018

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Maděryč**  
Osobní číslo: **T15503**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh konstrukce součásti z kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Zpracování literární rešerše na dané téma**
- 2. Volba materiálového složení**
- 3. Návrh technologického postupu**
- 4. Závěr a vyhodnocení zkoumané problematiky**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Lukáš Mañas**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**2. ledna 2018**

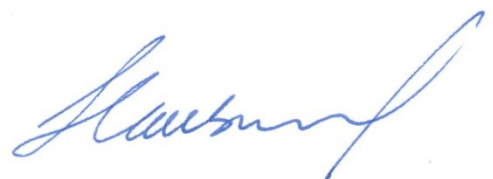
Termín odevzdání bakalářské práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 28. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: TOMÁŠ MADĚRYČ

Obor: TECHNOLOGICKÁ ZARÍZENÍ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10.5.2018

Maděryč

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Představená bakalářská práce se zabývá problematikou kompozitních materiálů. Tato práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou obecně popsány kompozitní materiály, jsou zde uvedeny například definice základních pojmů, základní rozdělení, používané technologie, dále pak jsou zde popsány jednotlivé složky tvořící kompozitní materiály jako matrice, výztuže a jádra. Na konci této části jsou pak uvedeny mechanická namáhání působící na zvolenou součást.

Praktická část této bakalářské práce je zaměřena na výrobu a vzájemné porovnávání vzorků nařezaných ze tří sendvičových desek. První desku tvoří referenční vzorek odpovídající materiálové skladbě zvolené součásti (kanadská kánoe) a zbývající dvě desky tvoří vzorky složené z navrhnuté skladby materiálu, lišící se pouze počtem potahových vrstev, kde potahovými vrstvy všech zkoumaných vzorků je skelná keprová tkanina 163 g/m<sup>2</sup> a jádrem referenčního vzorku je západní červený cedr. Jádrem vzorků s navrhnutou skladbou materiálu je pak borovicová spojovaná překližka.

Klíčová slova: kompozit, výztuž, kánoe, překližka, cedr, sklo

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the issue of composite materials. The thesis is divided into the theoretical and practical part.

Composite materials are generally described in the theoretical part, for example the definitions of basic concepts, the basic distribution, the technology used, and the individual constituents composing composite materials such as matrices, reinforcements and cores. At the end of this section, the mechanical stresses on the selected component are listed.

The practical part of this bachelor thesis is focused on production and mutual comparison of samples cut from three sandwich boards. Where the first board is a reference sample corresponding to the material composition of the selected component (Canadian canoe) and the remaining two boards form samples composed of a propounded material composition differing only from the number of coating layers, where the coating layers of all the samples examined are glass fiber cloth 163 g / m<sup>2</sup> and the core of the reference sample is Western Red Cedar. The core of the samples from the propounded material composition is then pine plywood.

Keywords: composite, reinforcement, canoe, plywood, cedar, glass

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Lukáši Maňasovi za jeho odborné vedení, čas, trpělivost a cenné rady, které mi pomohly při zpracování této bakalářské práce a také za poskytnutí materiálů potřebných pro výrobu zkušebních vzorků.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D za odborné vedení a cenné rady při provádění ohybových zkoušek a také regionálnímu výzkumnému centru CEBIA-Tech za spolupráci a technickou podporu.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....  | <b>13</b> |
| 1.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....   | 13        |
| 1.2 SÍLY/VAZBY V KOMPOZITECH SOUČINNOST MATRICE A VÝZTUŽE ZÁVISÍ NA<br>PŘENÁŠENÍ SIL PŘES JEJICH ROZHRANÍ. NA ROZHRANÍ MATRICE-VÝZTUŽ<br>EXISTUJÍ TŘI DRUHY ADHEZNÍCH SIL. [2] ..... | 14        |
| 1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....   | 15        |
| 1.3.1 Vláknové kompozitní materiály .....  | 15        |
| 1.3.2 Sendvičové kompozitní materiály.....   | 16        |
| 1.3.3 Částicové kompozitní materiály.....  | 17        |
| 1.4 MATRICE .....  | 17        |
| 1.4.1 Reaktoplasty a jejich vytvrzování .....  | 18        |
| 1.4.2 Termoplasty.....   | 19        |
| 1.5 VÝZTUŽ.....  | 19        |
| 1.5.1 Typy polotovarů pro jednotlivé výztuže .....   | 19        |
| 1.5.2 Materiály používané pro jednotlivé výztuže .....   | 20        |
| 1.6 JÁDRA .....  | 23        |
| 1.6.1 Voštinová jádra .....  | 23        |
| 1.6.2 Buňková tělesa (pěny).....   | 23        |
| 1.6.3 Překližky .....  | 24        |
| 1.6.4 Balza.....   | 25        |
| 1.6.5 Korek.....   | 25        |
| 1.6.6 Syntaktické jádro.....   | 26        |
| <b>2 TECHNOLOGIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....  | <b>27</b> |
| 2.1 VAKUOVÁ INFUZE .....   | 27        |
| 2.2 RUČNÍ LAMINACE .....   | 29        |
| 2.3 DALŠÍ MOŽNOSTI ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....   | 29        |
| <b>3 PŘÍKLADY VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....   | <b>31</b> |
| 3.1 LETECKÝ PRŮMYSL .....  | 31        |
| 3.2 VĚTRNÉ TURBÍNY .....   | 31        |
| 3.3 INOVATIVNÍ HOKEJKY .....   | 32        |
| 3.4 KÁNOE .....  | 33        |
| 3.5 STAVBA KÁNOE S POUŽITÍM CEDROVÝCH LATÍ A SKELNÉ VÝZTUŽE .....  | 34        |
| <b>4 NAMÁHÁNÍ A MECHANICKÉ SIMULACE</b> .....  | <b>36</b> |
| 4.1 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA KANOI S PÁDLUJÍCÍM JEZDCEM .....  | 36        |
| 4.2 NAMÁHÁNÍ PŮSOBÍCÍ NA LOĎ.....  | 39        |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....   | <b>45</b> |



|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>5</b>  | <b>CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>  | <b>46</b> |
| <b>6</b>  | <b>VOLBA MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ .....</b>  | <b>47</b> |
| 6.1       | REFERENČNÍ VZOREK .....   | 47        |
| 6.1.1     | Jádro .....   | 47        |
| 6.1.2     | Výztuž .....  | 48        |
| 6.1.3     | Matrice .....   | 49        |
| 6.1.4     | Plnivo .....  | 50        |
| 6.2       | VZORKY S NAVRHNUTOU SKLADBOU MATERIÁLU .....  | 51        |
| 6.2.1     | Borovicový překližkový panel .....  | 52        |
| <b>7</b>  | <b>NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU A VÝROBA<br/>ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....</b>   | <b>53</b> |
| 7.1       | ZHOTOVENÍ CEDROVÝCH LATÍ .....  | 53        |
| 7.2       | NAŘEZÁNÍ PŘEKLIŽKOVÝCH LATÍ Z PŘEKLIŽKOVÉHO PANELU .....  | 54        |
| 7.3       | VÝROBA POMOCNÝCH ZAŘÍZENÍ .....   | 55        |
| 7.3.1     | Žebrové bednění .....   | 55        |
| 7.3.2     | Speciální úhloměř .....   | 56        |
| 7.4       | VÝROBA SPOJOVANÝCH PŘEKLIŽKOVÝCH LATÍ .....   | 58        |
| 7.5       | VÝROBA CEDROVÉ SENDVIČOVÉ DESKY (R) .....   | 63        |
| 7.6       | VÝROBA PŘEKLIŽKOVÝCH SENDVIČOVÝCH DESEK .....   | 69        |
| 7.6.1     | Překližková spojovaná sendvičová deska polaminovaná z každé strany<br>jednou vrstvou 163 g/m <sup>2</sup> skelné tkaniny (P1) ..... | 69        |
| 7.6.2     | Překližková spojovaná sendvičová deska polaminovaná z každé strany<br>dvěma vrstvami 163 g/m <sup>2</sup> skelné tkaniny (P2) ..... | 70        |
| 7.7       | ŘEZÁNÍ A ZNAČENÍ SENDVIČOVÝCH DESEK NA JEDNOTLIVÉ VZORKY .....  | 71        |
| 7.7.1     | Vzorky pro ohybové zkoušky .....  | 71        |
| 7.7.2     | Vzorky pro padovou zkoušku .....  | 73        |
| <b>8</b>  | <b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDNÝCH HODNOT OHYBOVÝCH ZKOUŠEK .....</b>  | <b>74</b> |
| 8.1       | DEFINICE STATISTICKÝCH POJMŮ .....  | 74        |
| 8.2       | ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM .....   | 75        |
| 8.2.1     | Poruchy vzorků řezaných z jednotlivých sendvičových desek .....   | 78        |
| 8.2.2     | Poruchy vzorků řezaných z referenční sendvičové desky R .....   | 78        |
| 8.2.3     | Poruchy vzorků řezaných ze sendvičové desky P1 .....  | 79        |
| 8.2.4     | Poruchy vzorků řezaných ze sendvičové desky P2 .....  | 81        |
| <b>9</b>  | <b>DISKUZE VÝSLEDKŮ Z TŘÍBODOVÝCH OHYBOVÝCH ZKOUŠEK .....</b>   | <b>82</b> |
| 9.1.1     | Modul pružnosti v ohybu .....   | 82        |
| 9.1.2     | Mez pevnosti v ohybu .....  | 83        |
| 9.1.3     | Deformační práce .....  | 85        |
| <b>10</b> | <b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDNÝCH HODNOT PADOVÉ ZKOUŠKY .....</b>   | <b>87</b> |
| 10.1      | PADOVÁ ZKOUŠKA .....  | 87        |
| 10.2      | NEJČASTĚJI VYSKYTUJÍCÍ SE PORUCHY ZKOUŠENÝCH VZORKŮ .....   | 89        |
| <b>11</b> | <b>DISKUZE VÝSLEDKŮ PADOVÉ ZKOUŠKY .....</b>  | <b>90</b> |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 11.1      | MAXIMÁLNÍ SÍLA .....  | 90         |
| 11.2      | ENERGIE PŘI PRORAŽENÍ.....  | 90         |
| 11.3      | KONEČNÁ ENERGIE .....   | 91         |
| <b>12</b> | <b>CENOVÁ A HMOTNOSTNÍ KALKULACE KÁNOÍ VYROBENÝCH<br/>Z CEDROVÉHO A Z PŘEKLIŽKOVÉHO SENDVIČE.....</b> | <b>93</b>  |
| 12.1      | CENOVÁ KALKULACE KÁNOE VYROBENÉ Z CEDROVÉHO SENDVIČE .....  | 93         |
| 12.2      | CENOVÁ KALKULACE KÁNOE VYROBENÉ ZE SPOJOVANÉ SENDVIČOVÉ DESKY P1                                      | 94         |
| 12.3      | CENOVÁ KALKULACE KÁNOE VYROBENÉ ZE SPOJOVANÉ SENDVIČOVÉ DESKY P2                                      | 95         |
| 12.4      | CELKOVÁ HMOTNOST KÁNOE VYROBENÉ Z CEDROVÉHO SENDVIČE .....  | 96         |
| 12.5      | HMOTNOST KÁNOE VYROBENÉ ZE SENDVIČOVÉ DESKY P1 .....  | 97         |
| 12.6      | HMOTNOST KÁNOE VYROBENÁ ZE SENDVIČOVÉ DESKY P2 .....  | 97         |
|           | <b>ZÁVĚR .....</b>  | <b>98</b>  |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>   | <b>100</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>  | <b>107</b> |
|           | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>   | <b>109</b> |
|           | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>  | <b>113</b> |
|           | <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>   | <b>114</b> |

## ÚVOD

Kompozitní materiály jsou relativně nové materiály, které v mnoha ohledech mohou konkurovat konvenčním materiálům. V dnešní době nacházejí velice široké uplatnění v řadě aplikací. Pro konstrukční účely jsou ve velké míře používány vláknové kompozity, kde díky vhodně zvolené kombinaci matrice, výztuže a technologie lze zkonstruovat velice pevný, odolný a lehký materiál. Příkladem mohou být kompozitní díly pro automobily a letadla, dále pak tobogány, bazény, kajaky, kánoe atd.

Zvláštní skupinu kompozitních materiálů tvoří sendvičové materiály, jejichž velkou výhodou je jejich vysoká tuhost, ale zároveň nízká hmotnost. Tyto vlastnosti dělají ze sendvičových materiálů velice oblíbené materiály používané pro stavbu dopravních prostředků jako moderní vlakové soupravy, osobní automobily a letadla. Díky nízké hmotnosti těchto materiálů mají dopravní prostředky z nich postavené nižší náklady na dopravu. Sendvičové materiály mají také velmi dobré izolační a akustické vlastnosti, díky čemuž se používají také ve stavebnictví.

V teoretické části této bakalářské práce jsou obecně popsány kompozitní materiály, zejména jejich jednotlivé složky jako matrice, výztuže, jádra, ale také jejich zpracovatelské technologie. Na konci této části jsou popsána jednotlivá zatížení působící na zvolenou součást.

Cílem praktické části této bakalářské práce bylo navrhnout a mechanicky otestovat materiálové složení, které by v případě pozitivně naměřených výsledků, mohlo být použito jako náhrada materiálového složení pro konstrukci zvolené součásti. Zvolenou součástí pro praktickou část této bakalářské práce byla kánoe.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

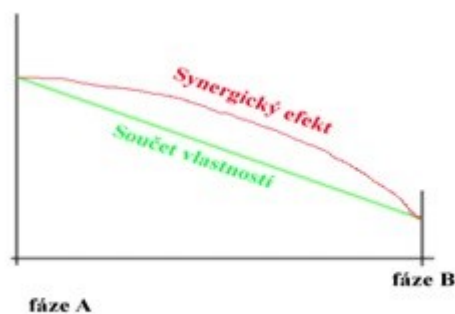
Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály, které jsou tvořeny dvěma nebo více fázemi s rozdílným chemickým složením. Jedna z těchto fází je spojitou fází a nazývá se matrice. Tato fáze plní úlohu pojiva výztuže. Sekundární fáze, která bývá obvykle nespojitá, zpevňuje matrici kompozitu a říkáme jí výztuž. Výztuž je pevnější, tvrdší a tužší než matrice. Tato fáze je složena z různých částic, které mají jiný tvar. Vhodným objemovým poměrem matrice a zpevňující fáze a také jejich adekvátnímu materiálovému složení lze získat materiál neobvyklých vlastností. Tyto vlastnosti jednotlivé složky nemají a nedosahuje se jich ani jejich součtem (synergický efekt). [1]



Obr. 1. Možné aplikace kompozitních materiálů [29]

## 1.1 Základní pojmy

- **Synergický efekt** - efekt, kdy dochází v kompozitu ke kombinaci pozitivních vlastností jeho složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. [2]



Obr. 2. Synergický efekt [30]

- **Laminát** - označuje kompozit ve tvaru plošného výrobku z jednotlivých rozlišitelných vrstev, který vzniká spojením vláken a pryskyřice nezávisle na formě konstrukčního prvku nebo na stavu výroby (nevytvrzený, vytvrzený laminát). [3]
- **Pramen** - vzniká spojením cca 200 elementárních vláken bez kroucení. [3]
- **Rohož** - plošná výztuž skládající se z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných, pramenců vláken spojených pojivem. [3]
- **Roving (prameneček)** - vzniká sdružením určitého počtu základních pramenů bez jejich zkrucování. [3]
- **Tkanina** - skládá se ze vzájemně pravidelně uspořádaných, propletených systémů vláken, plošná dobře zpracovatelná výztuž. [3]
- **Prepreg** - zesílený nebo tvarovaný materiál (např. papír nebo skleněné tkaniny), jež je napuštěn syntetickou pryskyřicí. [1]
- **Anizotropie** - odlišné mechanické vlastnosti pro různé směry zatížení (vysoká pevnost platí jen ve směru orientace vláken, v ostatních směrech je pevnost nižší, nejmenší je kolmo na směr vláken). [49]
- **Izotropní** – mechanické vlastnosti nezávislé na směru zatížení. [3]

## 1.2 Síly/vazby v kompozitech

Součinnost matrice a výztuže závisí na přenášení sil přes jejich rozhraní. Na rozhraní matrice-výztuž existují tři druhy adhezních sil. [2]

- **Mechanické zaklínění**

Čím více je styková plocha drsnější a styk obou fází dokonalejší, tím větší je toto zaklínění. [2]
- **Fyzikální adheze**

Fyzikální adheze souvisí s Van der Waalsovou vazbou a se vzájemnou smáčivostí matrice a výztuže. Její pole působnosti je v rozsahu 0,3 až 0,5 nm a její velikost je 0,7 až 7 Gpa. [2]
- **Chemická adheze**

Velikost chemických vazeb je mezi 7 až 70 Gpa a působí na vzdálenost 0,1 až 0,3 nm. Mezi nevýhody chemické adheze patří křehkost a malá pevnost mezivrstvi, která se v některých případech často používá jako difuzní bariéra. [2]

### 1.3 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály rozdělujeme na vláknové a částicové. [31]

#### 1.3.1 Vláknové kompozitní materiály



Obr. 3. Rozdělení vláknových kompozitů [31]

Jejich velkou výhodou je dosahování velkých pevností a tuhostí, což je dáno zpevňujícími vlákny malého průřezu uloženými do matrice. Důvod užití vyztužujících vláken v matrici vychází z několika paradoxů materiálu. Tyto materiálové paradoxy nám říkají, že teoreticky vypočítaná pevnost materiálu je podstatně vyšší než reálně naměřená pevnost. Je to dáno hlavně výskytem vad a nedokonalostmi v materiálu. Zejména pak trhliny, vyskytující se kolmo ke směru zatížení, negativně ovlivňují materiálovou pevnost. Využití malých průřezů vláken vychází opět z materiálového paradoxu, konkrétně z paradoxu vláknité struktury, podle něhož je pevnost vlákna o to větší, o co je průměr vlákna menší. Spojením matrice a vyztužujících vláken se dosáhne velké pevnosti a tuhosti. Z tohoto důvodu se vláknové kompozity stávají nejdůležitějšími kompozitními materiály. [3,5]



Obr. 4. Řez vláknovým kompozitem

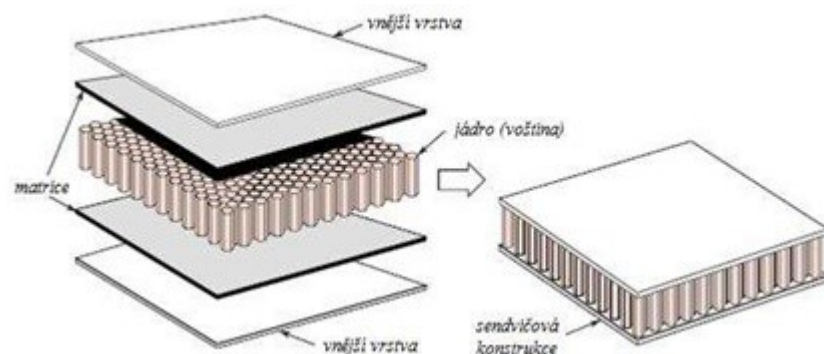
[32]

### 1.3.2 Sendvičové kompozitní materiály

Jsou to progresivní materiály složené z několika vrstev, které mají charakteristické rysy jako vysoké hodnoty tuhosti a ohybové pevnosti současně s malou hmotností, ale mají i jiné přednosti. Pro sendvičové konstrukce je typické, že každá zvolená komponenta je jako samotná málo pevná a flexibilní, ale v případě spojení s ostatními vrstvami sendviče dodává kladné vlastnosti v podobě extrémní tuhosti a pevnosti při nízké hmotnosti a nevelké tloušťce stěny. [6]

Sendvičové konstrukce jsou složeny ze dvou vnějších vrstev, mezi nimiž se nachází jádro. Vnější vrstvy jsou tenké, ale zároveň tuhé. Jádro mívá obvykle malou pevnost a je distanční, jeho hlavní funkcí je přenesení smykového zatížení z jednoho pláště vnější stěny na druhý. Přítomnost jádra však dodává těmto materiálům také jiné vlastnosti, jako je odolnost proti šíření trhlin, únavě, teplotám a rázům a v neposlední řadě dobré akustické a tepelné izolační vlastnosti.




Vnější vrstva je nejčastěji tvořena lamináty. Hlavní účel vnějších vrstev je zajištění pevnosti a tuhosti. Ke spojení vnější vrstvy kompozitu a jádra se používá matrice potahu nebo speciální lepidla. [7,8]



Obr. 5. Konstrukce sendviče[7]

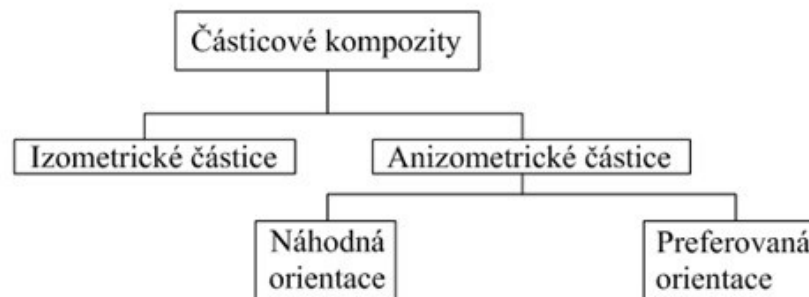
Velkou výhodou sendvičových struktur oproti obyčejnému laminátu je možnost korigovat velký nárůst pevnosti a tuhosti jen tím, že zvětšíme tloušťku jader. Hmotnost se sice zvětší, ale jen nepatrně. [6,8]



|                    | Laminát   | Sendvičová konstrukce  |   |
|--------------------|---|--|---|
|                    |  |  |  |
| Relativní tuhost   | 1   | 7.0  | 37  |
| Relativní pevnost  | 1   | 3.5  | 9.2   |
| Relativní hmotnost | 1   | 1.03   | 1.06  |

Obr. 6. Vliv tloušťky jádra na vlastnostech sendvičového materiálu [6]

### 1.3.3 Částicové kompozitní materiály



Obr. 7. Rozdělení částicových kompozitů [31]

V kompozitních materiálech můžeme použít různých druhů částic, jejichž přítomností můžeme docílit zlepšení mechanických vlastností, elektrické vodivosti, tepelné odolnosti nebo útlumu vibrací. Tyto částice mohou mít tvar např. krychle, kvádrů nebo koule. Na rozdíl od vláknových kompozitů jsou ve většině případů makroskopicky izotropní. Mezi jejich výhody patří nízká hustota 1000-2000 kg/m<sup>3</sup>, odolnost proti kyselinám a organickým rozpouštědlům a také nízká cena. [2,9]

## 1.4 Matrice

Matrice je základním materiálem kompozitů tvořícím spojitou fázi. Tento materiál prosycuje systém vláken, díky čemuž vzniká výrobek stálého tvaru. Matrice používané u polymerních kompozitů se dělí na termoplasty a reaktoplasty. Nejrozšířenějšími polymerními maticemi jsou reaktoplasty, konkrétně polyesterové a epoxidové pryskyřice. Matrice v kompozitu zajišťuje ochranu vláken před vnějšími vlivy, geometrický tvar, stálost tvaru součástí, přenos namáhání na vlákna, také zajišťuje geometrickou polohu vláken a zavádí přenos sil. [3]

### 1.4.1 Reaktoplasty a jejich vytvrzování

Jsou to tavitelné a kapalné pryskyřice, které se vytvrzují pomocí tvrdidel nebo samostatně. Tvrdidla jsou zastoupeny například iniciátory a urychlovači. Správné vytvrzení pryskyřice je velmi důležité. V opačném případě dochází k negativnímu působení na téměř všechny vlastnosti pryskyřice. Nejvíce na odolnost proti chemickým a povětrnostním vlivům a také na odolnost proti stárnutí. Mechanické vlastnosti jsou také závislé na kvalitě vytvrzení. Při výrobě velkých výrobků, jakými jsou například lodě, dochází v technické praxi často k tomu, že takovéto výrobky nejsou zcela vytvrzeny, avšak v některých případech je neúplné vytvrzení vyžadováno kvůli lepšímu mechanickému tlumení a menší křehkosti pryskyřic. Důležitými vnějšími faktory v procesu vytvrzování jsou čas a teplota. Vytvrzení pryskyřic se určuje jejich stupněm vytvrzení. [3]

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)**

Jsou to nejčastěji používané pryskyřice v kompozitních materiálech. Jsou oblíbené zejména pro svou spolehlivost, mnohostrannou použitelnost, nízkou viskozitu, malou cenu, dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům, dobrému smáčení vláken a rychlosti vytvrzování. Vytvrzování probíhá při normálních, nebo zvýšených teplotách. Při jejich vytvrzování dochází k objemovému smrštění mezi 5 a 9 %. Mezi jejich nevýhody patří zhoršená odolnost proti alkalickému namáhání. [3]

U těchto pryskyřic je doporučovanou vytvrzovací recepturou 100 hm.dílů pryskyřice smíchané s 2 hm.díly iniciátoru. [10]

- **Epoxidové pryskyřice (EP-R)**

Jejich největší předností jsou vynikající mechanické vlastnosti. Vyšší pevnost, nižší vnitřní pnutí, ale i vyšší rozměrová přesnost jsou typickými vlastnostmi výrobku zhotoveného z epoxidové pryskyřice ve srovnání s dílem vyrobeného z polyesterové matrice. To je také důvod až 4 krát vyšší ceny. Mezi jejich další výhody patří nízké smrštění, pohybující se mezi 2 až 5 % a vysoká adheze k povrchu (lepidla). Také se osvědčily v oblasti dynamického namáhání. [3]

Pro vytvrzení těchto pryskyřic se smíchá 6,5 hm. dílů tvrdidla s 100 hm. díly epoxidové pryskyřice. [11]

- **Vinylesterové pryskyřice, neboli fenakrylátové pryskyřice**

Vyznačují se vysokou odolností proti alkáliím a dobrou houževnatostí. Ve srovnání s polyesterovými pryskyřicemi jsou daleko dražší, křehčí a odolnější vůči vyšším teplotám a chemickým vlivům, mají nižší viskozitu a jsou reaktivnější. Jejich zpracování je stejné jako u polyesterových pryskyřic. [3]

- **Fenolické pryskyřice**

Tyto matrice se mohou pyšnit vysokou tepelnou a chemickou odolností. V aplikacích vyztužených kompozitů je jejich výskyt spíše ojedinělý. Jako vyztužené vstříkované fenolické pryskyřice se používají v automobilovém průmyslu. Také se uplatňují jako pojivo u vodovzdorných dřevařských výrobků. Nevýhodou je jejich křehkost. [3]

### 1.4.2 Termoplasty

Termoplasty, na rozdíl od reaktoplastů, mají jiné zpracovatelské i uživatelské vlastnosti. Za normálních teplot jsou termoplasty pevné látky, až při zahřátí nad 200°C se stávají tekutými látkami. [3]

Mezi nejdůležitější termoplastické pryskyřice patří:

- Polyetylsulfidové pryskyřice
- Polyamidové pryskyřice
- Polypropylénové pryskyřice
- Polyetermidové pryskyřice [3]

## 1.5 Výztuž

Výztuží rozumíme nespojitou kompozitní složku, která je prosycována matricí. Tato složka se vyznačuje vysokou měrnou pevností a tuhostí. Pro kvalitně vyrobený kompozit je důležité, aby výztuž měla vyšší pevnost a tuhost než použitá matrice. [3,1]

### 1.5.1 Typy polotovarů pro jednotlivé výztuže

- **Roving**

Je nejčastější formou výztuže u vláknitých kompozitů. Rovingy mají formu pramenců navinutých na cívkách, ze kterých jsou následně zpracovávány do konečné formy potřebné k výrobě kompozitního systému. [38]

- **Rohože**

Jedná se o plošný polotovar připravený k dalšímu zpracování. Rohože jsou složeny z jednotlivých pramenců, které jsou spojeny pojivem v jednotlivých vrstvách. [30,38]

- **Tkaniny**

Skládají se ze vzájemně pravidelně uspořádaných propletených systémů vláken, kde jednotlivé prameny k sobě svírají definovaný úhel nejčastěji 90°. Mezi základní druhy tkanin patří plátňové, keprové a atlasové.



Obr. 8. Druhy tkanin [38]

- **Plátňová vazba** - Jedná se o jedno z nejčastěji používaných uspořádání tkaniny. Je vhodná pro jednoduché zpracování
- **Keprová vazba** – Ve srovnání s plátňovou vazbou má vyšší pevnost i tuhost a je vhodná pro laminaci složitějších tvarů.
- **Atlasová vazba** – Používá se u pohledových stran a velmi složitých tvarů výrobků. [30]

### 1.5.2 Materiály používané pro jednotlivé výztuže

- **Skelná vlákna**

Jsou to široce používaná vlákna v kompozitních materiálech, zejména pro jejich finanční dostupnost a relativně vysokých hodnot pevnosti a E modulu. Tato skutečnost je dána silnou kovalentní vazbou mezi kyslíkem a křemíkem v trojrozměrné síti skloviny. Nejběžněji používaným druhem vláken jsou vlákna typu E, které tvoří až 90 % skleněných vláken na trhu. Jsou to izotropní vlákna o pravidelném kruhovém průřezu o průměru pohybujícím se mezi 3,5 až 24  $\mu\text{m}$ . Na trhu jsou k dostání ve formě rohoží, příze, pramenců, sekaných

pramenců, krátkých vláken a sekané příže. Oproti uhlíkovým vláknům mají menší chemickou odolnost. [3,1]



*Obr. 9. Skelná tkanina [8]*

- **Uhlíková vlákna**

Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost, vysoký modul pružnosti a také dobrou tepelnou odolnost a nízkou měrnou hmotnost. Jejich vysokou pevnost a modul pružnosti překonávají pouze monokrystaly  $Al_2O_3$ . Tato vlákna se dělí podle pevnosti a modulu pružnosti na:

- **Vysokopevnostní uhlíková vlákna HS**

- Získávají se při teplotě 900°C až 1500°C

- **Grafitová uhlíková vlákna HM**

Vznikají za teplot 2000°C až 2800°C jsou dražší než HS vlákna. Jsou to vysokomodulová vlákna [9]

Jejich největší přednost pevnost je dokonce až 2,5x vyšší než nejlepší ocele. Také se vyznačují extrémní tuhostí, malou hustotou a o 50 % vyšší odolností než mají skelná vlákna. Mezi jejich nevýhody patří nízká tažnost. [1]



*Obr. 10. Uhlíkové vlákno [38]*

- **Aramidová vlákna**

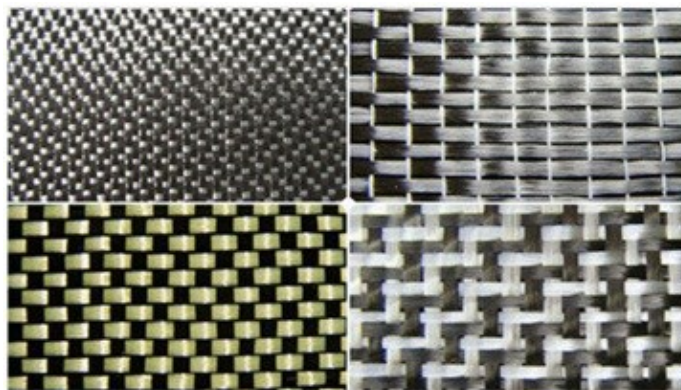
Aramidovými vlákny rozumíme velice pevná a tuhá vlákna, jež jsou na bázi lineárních organických polymerů a která mají orientovány kovalentní vazby podle osy vlákna. Vyskytují se dva typy těchto vláken, meta-aramidová (Nomex) a para-aramidová (Kevlar, Twaron). Jejich teoretická pevnost se odhaduje přibližně na 200 000MPa. Tato vlákna jsou velmi používaná díky jejich vynikajícím rázovým vlastnostem a jejich velkou tahovou pevností. V praxi se z nich vyrábí například vrtulové listy helikoptér. Na trhu jsou k dostání ve formě povrchových rohoží, tkanin, pramenců a přízí. [3,12]



*Obr. 11. Aramidová tkanina [33]*

- **Hybridní tkaniny**

Z finančních důvodů se někdy používají také hybridní tkaniny, které vzniknou kombinací několika druhů vláken. Příkladem takových tkanin mohou být kombinace dražších uhlíkových vláken s levnějšími skleněnými vlákny. Levnější skelná vlákna jsou orientována ve směru menšího působícího zatížení. [6]



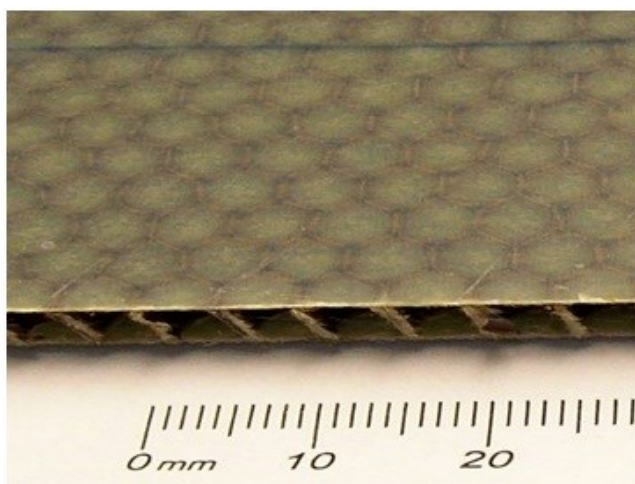
*Obr. 12. Kombinace různých druhů vláken [6]*

## 1.6 Jádra

Výběr sendvičového jádra ve značné míře udává výsledné vlastnosti sendviče jako například hmotnost, tuhost, izolační vlastnosti, odolnost proti vlhkosti a vysokým teplotám a v neposlední řadě výsledný tvar (zakřivená sendvičová kompozitní struktura vyžaduje lepší tvarovatelnost jádra). [1]

### 1.6.1 Voštinová jádra

Samotný název tohoto jádra je odvozen od podoby se včelím plástem. Tvary voštin mívají šestiúhelníkový tvar, ale mohou být reprezentovány také jako pyramidové nebo skládané. Jsou vyráběny z plošného materiálu různými způsoby, jako třeba vrapováním folie, skládáním pásů. Materiály pro výrobu jsou nejčastěji uhlíkové, skleněné a aramidové folie, ale také může být použit hliníkový plech, polypropylen, papír prosycený polyesterovou pryskyřicí, nebo textilie. Tato jádra vykazují lepší mechanické vlastnosti než jádra z pěny při stejné hustotě. Průměr buněk bývá 3,2 až 5 mm, tlaková pevnost 1 až 7 Mpa a hustota se pohybuje v rozsahu 32-96 kg/m<sup>3</sup>. [1]



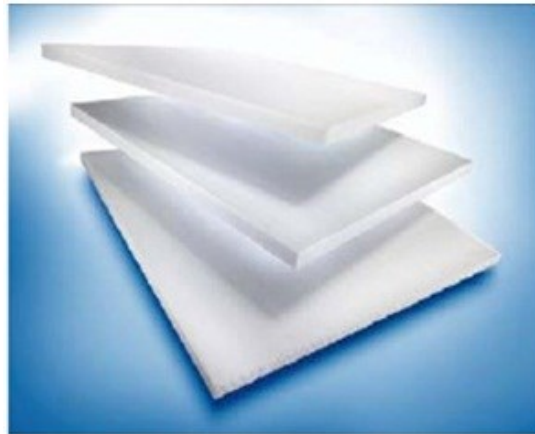
Obr. 13. Panel z voštinového jádra [1]

### 1.6.2 Buňková tělesa (pěny)

Pro výrobu těchto jader se používá převážně materiál na bázi polyuretanu (PET, PVC, SAN) méně často pak materiál na bázi polyeterimidu. Tyto pěny mají buňkovou strukturu, ve které jsou dutiny vyplněné plynem nebo kapalinou. Mezi jejich výhody patří odolnost vůči teplotním a chemickým vlivům, dále odolnost proti protlačení a nárazu. Mají také dobré mechanické vlastnosti jako pevnost a ohybnost. Zvláště vysoce ceněný je

jejich poměr tlakové pevnosti k hmotnosti. Také dobře snášejí dynamické zatížení. Při osovém tlakovém zatěžování dochází k odezvě tlakového osového napětí v závislosti od poměrného stlačení. Tato odezva vykazuje nelineární charakter. Jejich stlačení při konstantním napětí se pohybuje mezi 60 až 80%. [1,13]

Na trhu je k dostání např. polyuretanový vypěňovací systém IPITHERM G-0-35R, nebo dvoukomponentní polyuretanové pěny PUR 2K 45/PUR 3K 90. [26]



*Obr. 14. PET pěny [1]*

### 1.6.3 Překližky

Jedná se o překližované desky, které jsou složeny z několika vrstev dýh situovaných rovnoběžně s rovinou desky. Překližky jsou nejstarší sendvičové výplně, jsou oblíbené zejména pro svou nízkou cenu, mají však celou řadu nevýhod jako malou pevnost ve stříhu a velkou hmotnost. Jejich velkým problémem je vlhkost, která po určité době působení zapříčiňuje oddělování jednotlivých vrstev a také způsobuje kosmetické vady na kompozitním potahu. [1,4]

Překližky se vyznačují velkoplošnými rozměry a vzhledem přírodního dřeva. Vyrábí se lisováním vybraných elementů dřeva, které jsou získávány mechanickým rozdělením. Dřevo, jež je hlavní surovinou pro výrobu překližek, je samo o sobě anizotropní materiál. U překližek je snahou tuto anizotropii pokud možno co nejvíce eliminovat, toho se dosahuje slepováním dýhových vrstev pod konkrétním úhlem dřevních vláken, díky čemuž dochází k vyrovnání vlastností v rozdílných směrech dřevních vláken. Zvýšením odolnosti proti vodě lze docílit použitím melaminoformaldehydových, nebo fenolformaldehydových lepidel. Použitím antiseptické a retardační úpravy lze snížit další neduhy dřeva jako hořlavost a náchylnost k plísním. [4]





*Obr. 15. Překližka [1]*

#### **1.6.4 Balza**

Jedná se o rychle rostoucí strom, který roste v Jižní Americe. Ve srovnání s polymerními pěny neměkne a má menší tepelnou vodivost. Nevýhodou balzy je její nasákavost. Pro zvýšení pevnosti v tlaku a v stříhu se lepí vlákna do bloků. Tyto bloky se řezou kolmo k vláknům. Sendvičové panely se můžou vyrábět pomocí infuze pryskyřice. Hustota balzy se pohybuje od 50 do 100 kg/m<sup>3</sup>. [1,14]



*Obr. 16. Balzové bloky [1]*

#### **1.6.5 Korek**

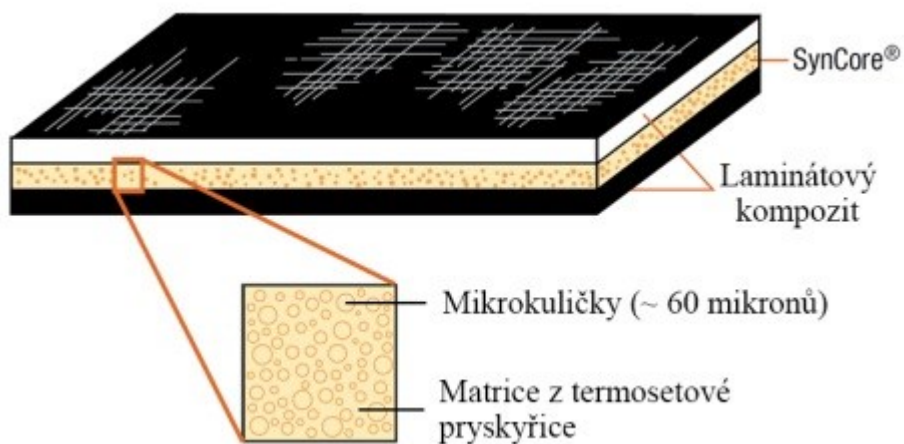
Korek (felém) je vnější část borky korkového dubu, která je nepropustná pro vodu i pro plyny a chrání rostlinu. Dobře tepelně izoluje, odolává poměrně vysokým teplotám (asi do 120 °C), je pružný a lehký. Používá se na výrobu zátek, podlahových krytin, stélky obuvi aj. [50]



Obr. 17. Korek [50]

### 1.6.6 Syntaktické jádro

Vyskytuje se ve formě pěny. Má větší hustotu než voština ( $482\text{--}1284\text{ kg/m}^3$ ) a je vhodné pro tenkostěnné sendvičové konstrukce. Skládá se z matrice (např. epoxidové), která je vyplněna dutými kuličkami (skleněnými nebo keramickými). [51]



Obr. 18. Sendvič se syntatickým jádrem [51]

## 2 TECHNOLOGIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály můžeme vyrábět několika technologiemi, mezi základní patří výroba pomocí vakuové infuze a ruční laminací. Výběr technologie určuje nejen konečné vlastnosti kompozitních výrobků, ale také jejich konečnou cenu. Z tohoto důvodu je důležité věnovat pozornost volbě technologie pro daný výrobek. Mezi faktory určujícími volbu technologie patří sériovost dílce, limit nákladů, členitost a tvar výrobku, kvalita povrchu a požadavky na konečné vlastnosti (hlavně pevnost a hmotnost). Mezi základní technologie patří Vakuová infuze a ruční laminace. [20]

### 2.1 Vakuová infuze

Princip vakuové infuze spočívá ve využití podtlaku pro distribuci pryskyřice v položených vrstvách výztuže. Při výrobě dílce touto technologií jsou na sucho položeny výztuže do dutiny formy. Na tyto výztuže jsou pak položeny další pomocné materiály jako vakuová fólie. Pomocí distribučního média a systému hadiček je pryskyřice nasávána do výztuže.[21]

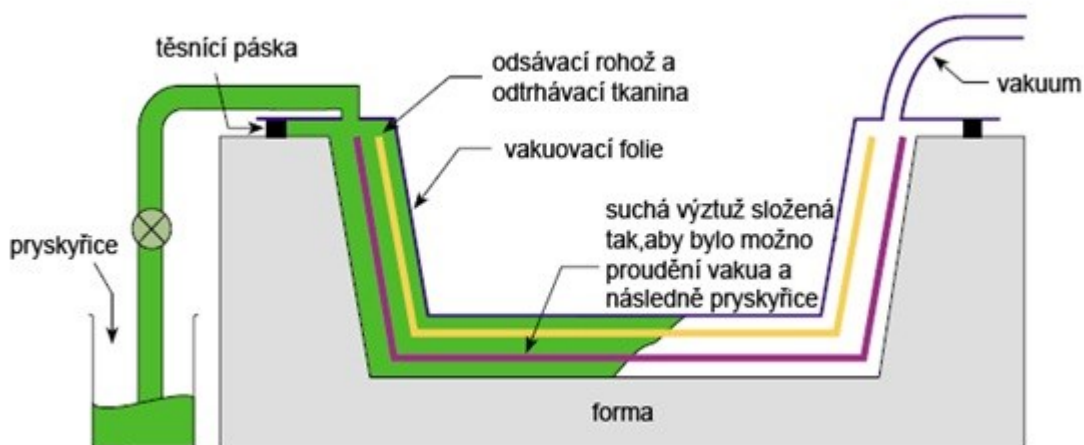
Pro úspěšnou výrobu dílců pomocí vakuové infuze je nezbytné použití pomocných materiálů, ze kterých se po dokončení výroby stává odpad. [27]

Mezi pomocné materiály této technologie patří:

- **Vakuovací fólie**  
Pružná fólie (nylon, PA, PE, Polyimid, PTFE) umožňující aplikaci vakua. [21]
- **Separční fólie**  
Tato fólie (nylon, PE) slouží k oddělení výrobku a ostatních pomocných materiálů.[21]
- **Absorpční tkanina**  
Její úlohou je absorpce přebytečné pryskyřice z dílce. Je vyráběna z netkaného polyesterového vlákna.[21]
- **Odsávací rohož**  
Textilie (PES) zajišťující aplikaci vakua. Zabezpečuje rovnoměrný tlak vakua na výztuže a proudění vzduchu.[21]
- **Odtrhová tkanina**  
Je kladena přímo na výztuže. Vlivem jejího strhnutí vzniká drsný povrch.[21]

- **Distribuční médium**  
Zabezpečuje optimální tok pryskyřice do všech částí výrobku.[27]
- **Pletená páska**  
Používá se pro zlepšení toku pryskyřice. Lze ji použít také pro dopravu pryskyřice do špatně přístupných míst. Vyrábí se z polyesteru.[27]
- **Hadice a konektor**  
Hadice (PE) napomáhá k vytvoření vakua a k dopravě a odvodu nadbytečné pryskyřice. Konektor je využíván jako finančně výhodné spojení přívodu pryskyřice a zavakuované formy. Vyrábí se z polyetylenu.[27]
- **Těsnící páska**  
Spojuje formu s vakuovou fólií. [27]
- **Vakuová vývěva**  
Její význam spočívá ve vytvoření vakua a čerpání pryskyřice do formy.[27]
- **Přepadová nádoba**  
Zachycuje přebytečnou pryskyřici.[27]

Mezi výhody výrobků vyrobených vakuovou infuzí patří vysoká pevnost, nízká hmotnost, tuhost, tvarová stálost, odolnost proti nárazům, odolnost vůči UV záření a chemickým vlivům. Vakuová infuze probíhá v uzavřeném výrobním procesu, díky čemuž není ohroženo zdraví pracovníků. Touto technologií jsou vyráběny velkorozměrné a tvarově jednoduché výrobky jako kanoe, čluny, lodě, kajaky nebo různé kryty a panely, ale také třeba lopatky větrných elektráren. Vzhledem k jejich aplikacím u velkorozměrných součástí se u pojiv volí vytvrzovací systémy, které mají dlouhou dobu zpracovatelnosti.[12,21]

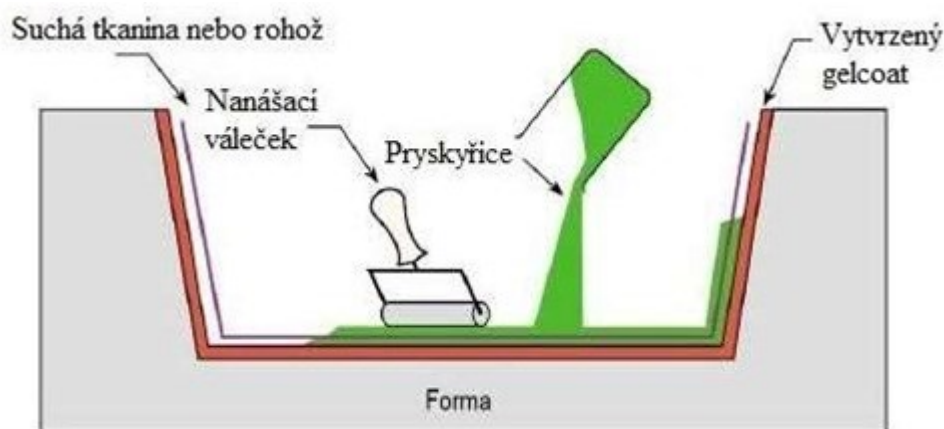


Obr. 19. Vakuová infuze [21]

## 2.2 Ruční laminace

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší technologii. Klazení výztuže se provádí ručně. Tato výztuž je nejčastěji prosycována polyesterovými nebo epoxidovými pryskyřicemi pomocí štětce nebo nanášecího válečku. Prosycování je prováděno ručně nebo strojně. U této technologie hraje významnou roli lidský faktor. Nedostatečná kvalifikace a malé zkušenosti pracovníka se velmi negativně projeví na kvalitě vyráběné součásti. Při laminaci je potřeba zabránit vzniku vzduchových bublin pomocí rýhovaného válečku. Tato technologie se uskutečňuje při normálních podmínkách za pokojové teploty a atmosférického tlaku, je využívána pro výrobu prototypů, velkoplošných dílů a u malých sérií.[3,20]

Technologii ručního laminování lze vylepšit v poslední fázi vytvrzování použitím vakuového vaku (metoda vakuového vaku). V takovém případě jsou použity pomocné materiály jako separační fólie, těsnící páska, vakuovací fólie, vakuové čerpadlo, odtrhová tkanina a odsávací rohož. [ 27]



Obr. 20. Ruční laminování [21]

## 2.3 Další možnosti zpracování kompozitních materiálů

- **Stříkání**

je obdobou ručního laminování s tím rozdílem, že je materiál nanášen stříkací pistolí, ve které se mísí pryskyřice se sekanými vlákny. Technologie je vhodná pro sériovou výrobu středních a větších dílců s jednoduchým tvarem. Nanášení se provádí manuálně, nebo je řízeno počítačem. [20,31]

- **Vysokotlaké vstřikování (RTM – Resin Transfer Molding)**

Tato technologie je díky krátkým výrobním cyklům a reprodukovatelné kvalitě vhodná pro větší série. Kvůli vysokému působícímu tlaku má forma odolnou konstrukci. Výhodou vysokotlakého vstřikování je přesná výroba, vysoká kvalita povrchu výrobku na obou stranách a možnost vyrábět výrobky s tolerancemi. Mezi nevýhody této technologie patří vysoké náklady na vstřikovací zařízení. [20,31]

- **Pultruze**

Pomocí pultruze lze velmi efektivně kontinuálním způsobem vyrábět plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až do 80 %). Impregnovaná výztuž se vtahuje do tvarovací a vytvrzovací hlavy a výsledný profil se odtahuje housenkovými pásy nebo popojíždějícími vozíky. Mezi výhody pultruze patří vysoká produktivita a velká výsledná délka profilu. Mezi nevýhody patří finančně nákladný provoz a tvarové omezení profilu. [20,31]

- **Lisovací technologie (SMC – Sheet Molding Compound)**

U této technologie je prepreg vložen do dvoudílné vyhřívané formy, kde se poté uzavře, vytvaruje a vytvrdí. Lisovací technologie se používají ve velkosériové výrobě. Výhodami jsou dobré mechanické vlastnosti, vysoká produktivita a možnost výroby dílců rozdílné tloušťky. Mezi nevýhody patří malá přizpůsobivost výroby a velká pořizovací cena. [31]

- **Navíjení**

Při této technologii se impregnovaná výztuž navíjí na jádro ve tvaru výrobku, díky čemuž můžeme vyrábět kompozitní dutá tělesa jako trubky a nádrže. Výhodou je vysoká produktivita a naopak nevýhodou jsou vysoké finanční náklady na pořízení strojů. [20,31]

- **Vakuové lisování z prepregu**

Prepreg je společně s pomocnými materiály včetně vakuové fólie ukládán v tenkých vrstvách do formy, kde se pomocí vzniklého vakua jednotlivé vrstvy slisují. Po vložení celé formy do vyhřívané pece se prepreg vytvrdí. Tato technologie se používá pro výrobu součástí, u kterých vyžadujeme vysokou přesnost a vysokou kvalitu pohledových ploch. [31]

### 3 PŘÍKLADY VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

#### 3.1 Letecký průmysl

Vyztužené kompozitní materiály nachází široké uplatnění v leteckém průmyslu. Používají se pro výrobu letadel a helikoptér a to jak v komerční oblasti, tak v oblasti militární. Oproti tradičním materiálům používaných v letectví se jejich použitím dosáhne výrazně zlepšeného pevnostně hmotnostního poměru a také odolnosti proti korozi a únavě. Ve srovnání s leteckými materiály, které obsahují hliník, jsou výrazně odolnější v extrémních podmínkách (vysoké a nízké teploty, vlhkost) a také mají výrazně lepší únavovou odolnost. V dnešní době se v letectví běžně kompozitní materiály používají pro výrobu určitých konstrukčních sekcí jako trup, křídla, přední část, ocas, ale také pro výrobu celého letadla. Pro výrobu jednotlivých letadlových konstrukčních sekcí se využívají QISO tkaniny. [17,18]



*Obr. 21. Kompozity v letectví [17]*

#### 3.2 Větrné turbíny

Vyztužené kompozitní materiály našli uplatnění také v oblasti větrných turbín. Důvod jejich užití v těchto aplikacích je zejména z důvodu potřeby snížení hmotnosti. Vyšší hmotnost lopatek turbíny by vedla ke zvýšenému tření v ložiskách a v podpěrách, díky čemuž by účinnost turbíny byla menší. Z tohoto důvodu se k výrobě těchto zařízení používají kompozitní materiály zpracované pomocí vakuové infuze, která kromě snížené hmotnosti zaručí také optimální pevnost, tuhost a odolnost.[12]



*Obr. 22. Větrná turbína [12]*

### **3.3 Inovativní hokejky**

Výroba těchto inovativních hokejek spočívá v přetažení uhlíkové punčochy (Sharx) přes vytvarované pěnové jádro. Tento vyztužený polotovár je umístěn do dvoučlenné formy, do které je vstříknuta pryskyřice. Tyto výztuže umožňují návrhářům přizpůsobit orientaci vláken k dosažení požadované pevnosti, tuhosti a odolnosti. Výhodou aplikace uhlíkové tubulární výztuže u tohoto typu výrobku je dosažení nižších provozních nákladů, jelikož ruční ovinutí rovingové tkaniny a následné dokončovací práce bývají poměrně pracné. Čepele vyztužené výztuží Sharx jsou lehčí, tenší a o 10 % pevnější než čepele vyrobené z prepregu.[19]



*Obr. 23. Hokejka Easton [34]*





Obr. 24. Uhlíková punčocha [35]

### 3.4 Kánoe

Z důvodů nízké hladiny řek a jezer na některých místech vznikl požadavek pro výrobu ultra lehké kanoe, kterou pro svoji extrémně nízkou hmotnost nebude žádný problém přenést na ramenu i na větší vzdálenosti. Druh kanoí s názvem Adirondack pack canoe váží méně než 8 kg a unese více než 136 kg. Hlavním cílem vývojářů Adirondack pack kanoí bylo nalezení a později realizování nejvhodnějšího kompromisu mezi malou hmotností a pevností, čehož bylo docíleno pomocí vakuové infuze a velmi silné a lehké výztuže. Trup kanoe z vnější strany obsahuje jednu vrstvu uhlíkových vláken biaxiální ( $\pm 45^\circ$ ) tkaniny kaširované plátnovou vazbou uhlíkové tkaniny pro vnitřní stranu trupu. Mezi těmito dvěma vrstvami se nachází ještě vysoce zpevňující QISO triaxiální uhlíková tkanina ( $0^\circ/+60^\circ/-60^\circ$ ). Na dno kanoe je přidána další vrstva uhlíkové biaxiální tkaniny. Pomocí vakuové infuze je k prosycení výztuže potřeba méně pryskyřice, což se v konečném důsledku projeví menší hmotností kanoe. Touto technologií je dosaženo také vysoké kvality a vysoké pevnosti trupu. [15]



Obr. 25. Adirondack pack canoe [15]

### 3.5 Stavba kánoe s použitím cedrových latí a skelné výztuže

Pod záštitou Lawrence Technological University se sídlem v americkém státě Michigan, byla vytvořena kánoe, jejíž trup byl postaven z cedrového dřeva a následně byl vyztužen skelnými vlákny.

Samotné výrobě kánoe předcházelo vytvoření počítačového modelu v programu Solid Edge. V tomto modelu byly po každých 30 cm délky odpovídajícím reálné kánoe vytvořeny řezy. Tyto řezy byly následně pomocí plotteru překresleny na papírové šablony, které se zase překreslily na dřevěná žebra. Po vytvoření všech dřevěných žebor byla jednotlivá žebra umístěná na společný povrch. Na oplátování trupu byly použity cedrové latě o šířce 1,9 cm a tloušťce 0,64 cm. Jednotlivé latě byly pomocí sponkovačky přicvaknuty na dřevěná žebra a vzájemně slepena k sobě. Jakmile lepidlo zaschlo, byly svorky odstraněny. Po úpravě vnitřního i vnějšího povrchu trupu byla na vnitřní stranu trupu natažena jedna vrstva 140 gramové skelné tkaniny prosycena epoxidovou pryskyřicí. Na vnější stranu trupu byly použity dvě vrstvy 140 gramové skelné tkaniny prosycené taktéž epoxidovou pryskyřicí. Nanášení epoxidové pryskyřice a následné prosycování tkaniny bylo prováděno ručně štětcem. Na výrobu kánoe bylo použito 160 latí o celkové délce 1 km. [22]

- **Parametry kánoe**
  - Délka 7,2 m
  - Šířka 1,35 m
  - Kapacita 8 veslařů + 544 kg nákladů



*Obr. 26. Plátování trupu kánoe [36]*



*Obr. 27. Laminace trupu [22]*

## 4 NAMÁHÁNÍ A MECHANICKÉ SIMULACE

Lod' plavící se po moři, nebo řece je neustále vystavována nejrůznějším namáháním a deformacím, které jsou důsledkem působení sil zvenčí i uvnitř lodi. Tyto síly můžeme rozdělit na [25] :

- **Statické síly**

- Vnitřní síly - hmotnost lodi + hmotnost nákladu
- Vnější síly – působení hydrostatického tlaku vody na trup lodi

- **Dynamické síly**

Dynamické síly působící na loď jsou důsledkem síly vln, větru a pohybu lodi. Loď má na hladině 6 stupňů volnosti pohybu (3 lineární a 3 rotační). Různé síly působící na loď se neustále mění v různé míře a frekvenci.[25]

### 4.1 Síly působící na kánoe s pádlujícím jezdce

Síly, které působí na kánoe s pádlujícím jezdce, můžeme rozdělit podle:

#### **Působení**

- Na kánoe
- Na pádlo

#### **Směru působení**

- Svisle
- V ose kánoe
- Napříč

#### **Druhu síly**

- Hydrostatickou
- Hydrodynamickou

Síly působící na kánoi rozdělujeme:

- **Hydrostatické**

- **Vztlak**

Po sečtení vztlaku po celé ploše kánoe dostaneme jednu sílu s působišťem ve středu (těžišťe) výtaku. Toto působišťe se posouvá při náklonu do stran a při náklonu v podélném směru.

- **Rameno**

Vzdálenost mezi těžišťem jezdců a těžišťem vztlaku kolmo k ose lodi

- **Tíha jezdců a kánoe**

Tato síla vždy působí svisle dolů nezávisle na náklonu kánoe. Je snaha, aby vzdálenost působišťe této síly od paluby byla co nejmenší, jelikož se tím omezí otáčivý moment při náklonu.

- **Rameno**

Vzdálenost mezi těžišťem jezdců a těžišťem vztlaku podélně k ose lodi

- **Hydrodynamické**

- **Podélné**

Závisí na rychlosti lodi a na tvaru objemu lodi nacházejícím se pod hladinou. Při konstrukci kánoe je snaha tuto sílu minimalizovat, ale přitom nezhoršit stabilitu a točivost

- **Příčné**

Představují síly od proudu vody. Mají vliv na stabilitu kánoe, při jízdě se kompenzují pomocí náklonů. Jsou závislé na úhlu náběhu vln do trupu kánoe.

- **Rameno**

Vzdálenost těžišťe jezdců od místa působišťe příčné síly

- **Svislé**

Zvedají zadní a především přední část lodi při jízdě vpřed

- **Rameno**

Vzdálenost mezi těžišťem jezdců a působišťem dané síly

Všechny síly působící na pádlo jsou dynamické a rozdělují se:

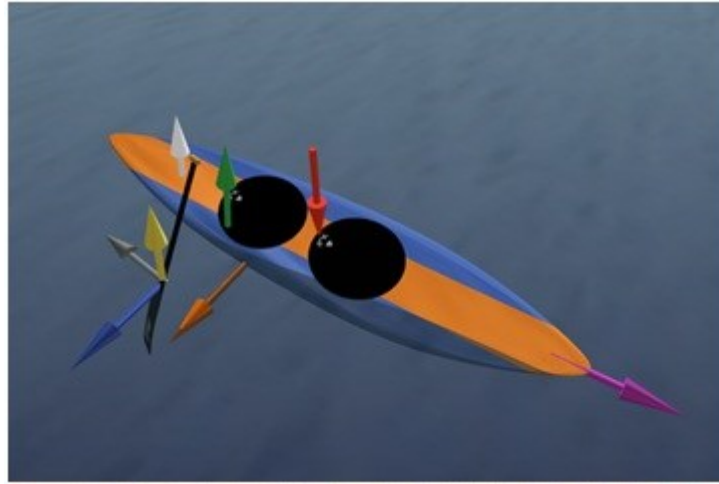
- **Vodorovné kolmé k ose lodi**
  - Rameno  
Vzdálenost mezi pádlem a těžištěm lodi v předozadním směru
- **Vodorovné v ose lodi (pohon kánoe)**
  - Rameno  
Vzdálenost v příčném směru mezi pádlem a těžištěm kánoe
- **Svislé**
  - Rameno  
Vzdálenost v příčném směru mezi pádlem a těžištěm kánoe[24]

Tab. 1. Účinek pádlových sil na posun a otáčení kánoe[24]

| Dyn. Síly působící na pádlo | Účinek na posun lodi   | Účinek na otáčení |
|-----------------------------|------------------------|-------------------|
| Vodorovná kolmo k ose lodi  | Posun lodi kolmo k ose | Točení            |
| Vodorovná v ose lodi        | Pohyb vpřed            | Nechtěné zatačení |
| Svislá                      | -----                  | Náklon            |

Tab. 2. Účinek statické a dynamické síly působící na kánoi[24]

| Statické síly působící na kánoi    | Účinek na posun lodi                            | Účinek na otáčení  |
|------------------------------------|---|--|
| Vztlak                             | Kánoe je nadlehčována                           | Stabilita a náklon   |
| Tíha jezdců a kánoe                |   | Průjezd vlnami a zanoření zádi                               |
| <b>Dyn. síly působící na kánoi</b> |   |  |
| Podélné                            | Brání kánoi při jízdě vpřed                     |  |
| Příčné                             | Posun kánoe kolmo k ose                         | V případě bočního vjezdu do proudu dochází k převržení kánoe |
| Svislé                             | Dochází hlavně ke zvedání přídi při jízdě vpřed | Za jízdy mírné zaklánění lodi                                |



Obr. 28. Rozložení sil na kánoi a pádlo [24]

Tab. 3. Působící síly na kánoi a pádlo [24]

|                    |           | Síla                          |
|--------------------|-----------|-------------------------------|
| Síla vody na pádlo | Dynamická | Vodorovná kolmo k ose kánoe   |
|                    |           | Vodorovná v ose kánoe (pohon) |
|                    |           | Svislá                        |
| Síla vody na kánoi | Statická  | Vztlak                        |
|                    |           | Tíha jezdců a kánoe           |
|                    | Dynamická | Podélná                       |
|                    |           | Příčná                        |
|                    |           | Svislá                        |

## 4.2 Namáhání působící na loď

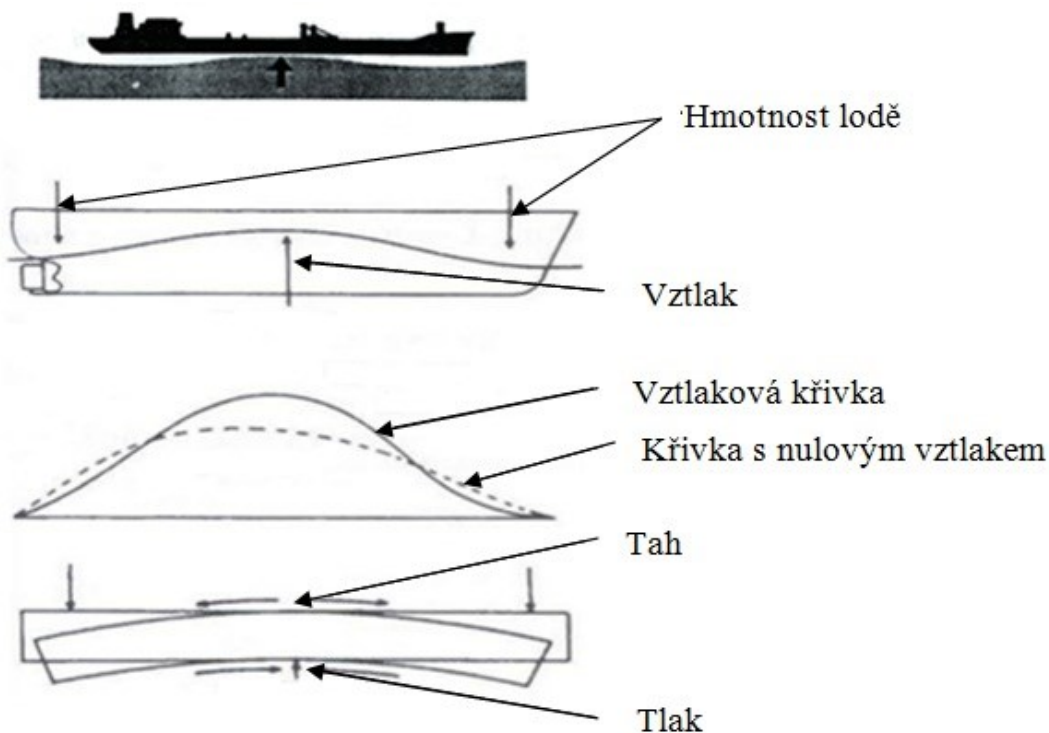
Jsou 3 hlavní druhy namáhání lodi:

- Na tah
- Na tlak
- Na smyk

- **Podélný ohyb směrem nahoru**

Podélný ohyb směrem nahoru nastane, když je na koncích lodi více koncentrována váha kvůli nerovnoměrnému rozložení nákladu nebo když plavidlo zasáhne vlna v jeho středu.

[25]



Obr. 29. Namáhání – podélný ohyb směrem nahoru [25]

Pro zvýšení pevnosti v tahu kánoe jsou používány skleněné uhlíkové a aramidové výztuže.[23,28]

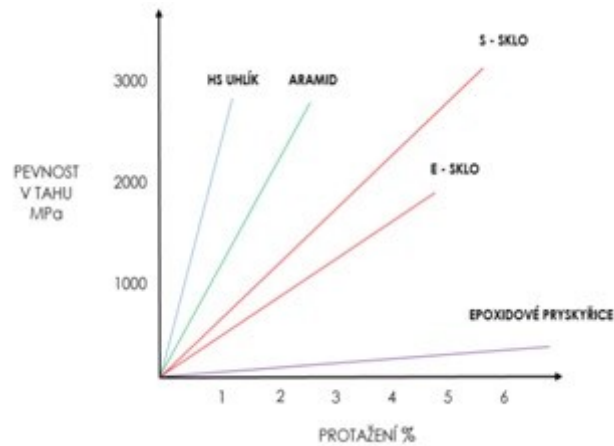
Mechanické vlastnosti uhlíkové, skleněné a aramidové výztuže jsou vypsány v tab.4.

Tab. 4. Mechanické vlastnosti vybraných vláken [37]

| Druh vlákna    | Mez pevnosti v tahu | E modul pružnosti |
|----------------|---------------------|-------------------|
| Skleněná typ E | 3400                | 73 000            |
| Skleněná typ S | 4400                | 86 000            |
| Aramidová      | 3400-3800           | 80 000-186 000    |
| Uhlíková       | 1500-3500           | 180 000-500 000   |



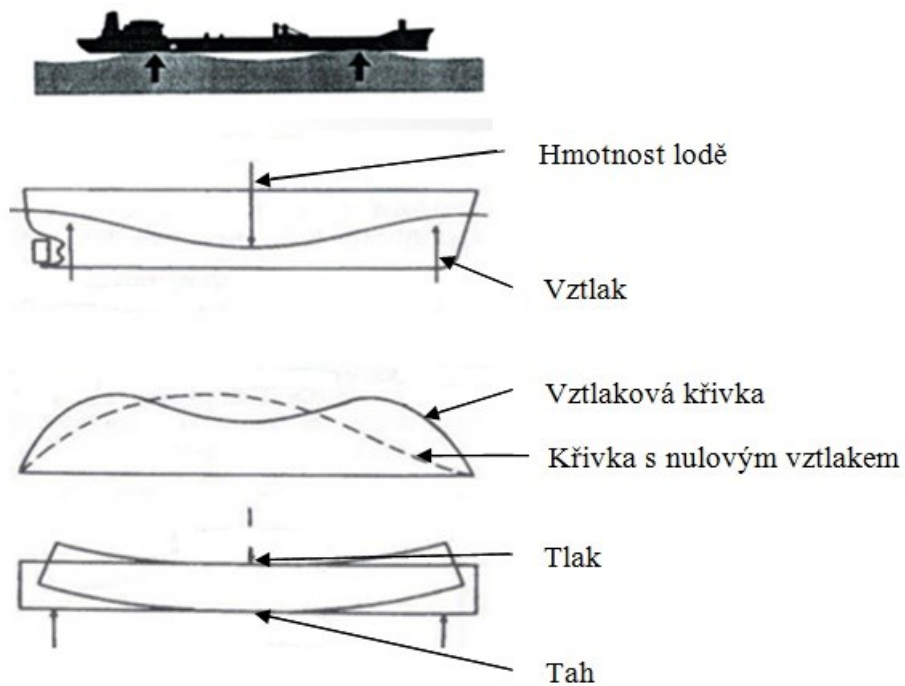
Na obr. 27 je znázorněna pevnost v tahu vybraných vláken s epoxidovou matricí.



Obr. 30. Porovnání výztuží [37]

- **Podélný ohyb směrem dolů**

Podélný ohyb směrem dolů nastává tehdy, když je větší hmotnost koncentrována ve středu lodi nebo když vztlak na koncích trupu je v důsledku vln větší než ve středu trupu. [25]

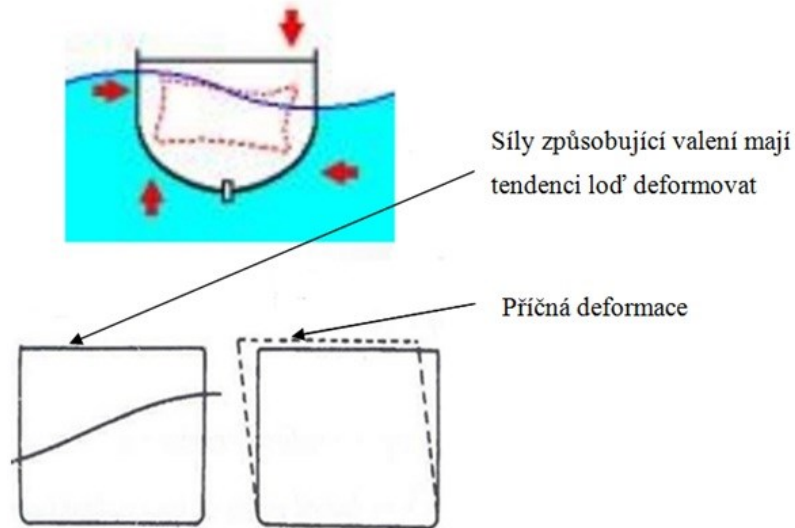


Obr. 31. Namáhání – podélný ohyb směrem dolů [25]

- **Deformace na příčných sekcích lodi**

V důsledku působení vln ve směru kolmém na osu lodi dochází k deformacím na příčných sekcích lodi. [25]

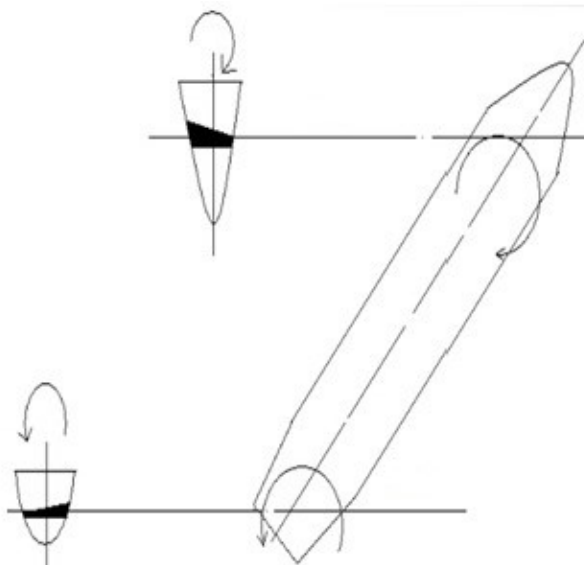
Většina poškození trupu přichází spíše ve formě rány zvenčí než z trvalého zatížení. [23]



Obr. 32. Namáhání – deformace na příčných sekcích lodi [25]

- **Namáhání na krut**

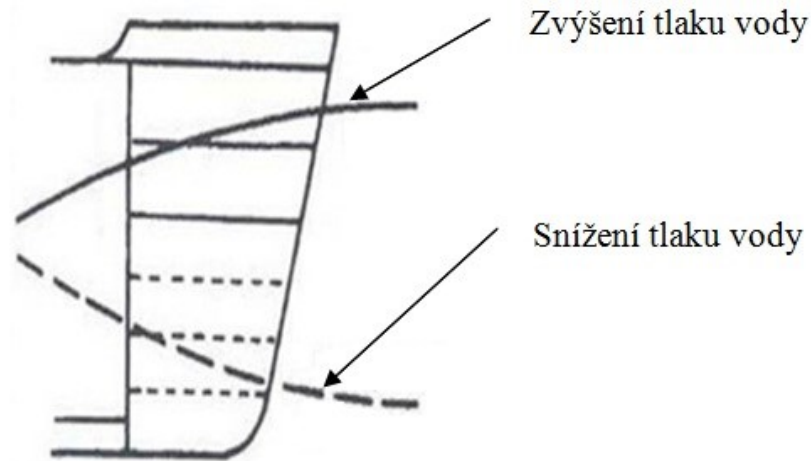
Vlivem působení vln je trup vystaven krouticímu momentu a celá struktura je torzně namáhána. [25]



Obr. 33. Namáhání na krut [25]

- **Namáhání v důsledku změn tlaku vody**

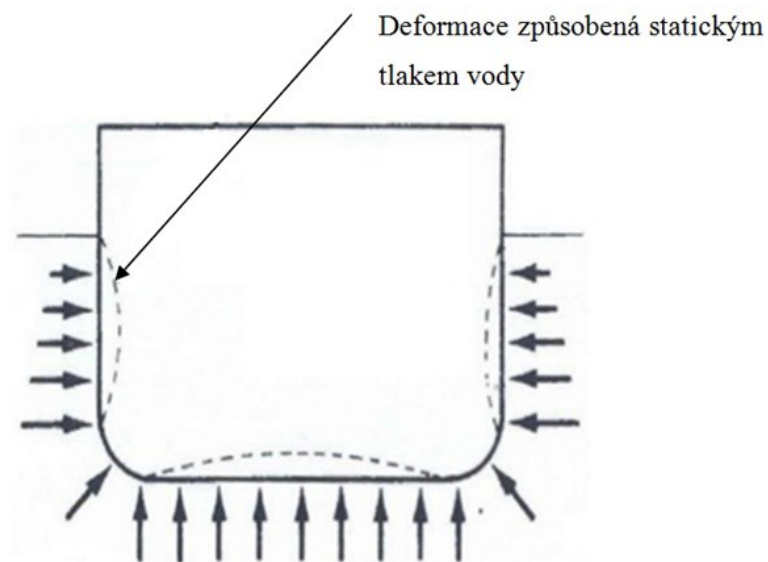
Jedná se o napětí, které se vyskytuje na koncích lodi v důsledku změn tlaku vody na vnějších stěnách plavidla při pohybu. Efekt je zvýrazněn na přídi, když se pluje vpřed. [25]



Obr. 34. Namáhání v důsledku změn tlaku vody [25]

- **Namáhání v důsledku tlaku vody**

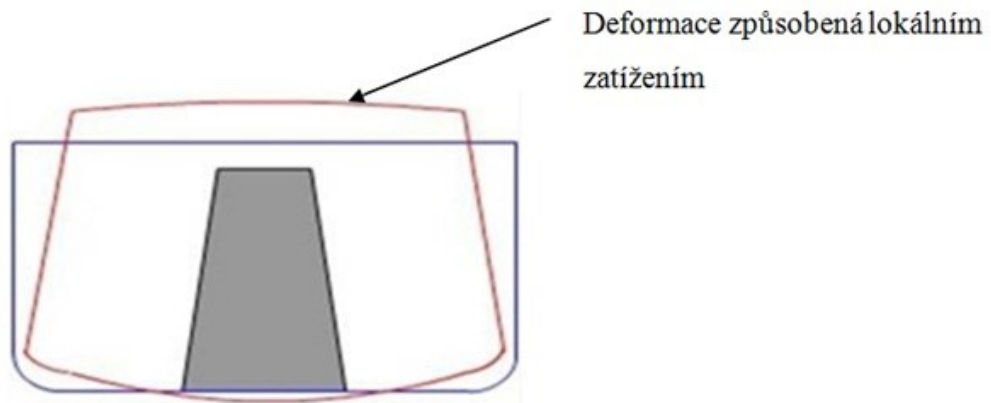
Tlak vody působí kolmo na povrch a zvyšuje se s hloubkou. [25]



Obr. 35. Namáhání tlakem vody [25]

- **Namáhání způsobené lokálním zatížením**

Lokální zatížení způsobuje lokální deformaci příčného průřezu. [25]



*Obr. 36. Lokální zatížení [25]*

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Úkolem praktické části této bakalářské práce je navrhnout a vyrobit vhodnou kombinaci materiálů, pomocí nichž by bylo možné vyrobit kanadskou kánoí. Pro získání údajů, potřebných pro adekvátně navrhnoutou kombinaci materiálů ke stavbě kanadské kánoe, byl vyroben referenční vzorek, který odpovídal přesné materiálové skladbě kanadských kánoí. Tento referenční vzorek byl následně podroben mechanickým zkouškám a porovnán s výsledky mechanických zkoušek vyrobených vzorků s navrhnoutou skladbou materiálu. Vyrobené sendvičové vzorky byly podrobeny padové zkoušce a zkoušce tříbodového ohybu.

Kanadské kánoe jsou vyráběny ze sendviče z cedrového jádra. [39]

Z důvodu větších finančních nákladů na cedrové jádro jsem se rozhodl navrhnout namísto cedru jádro z borovicové překližky, které je ekonomičtější. Délka dostupných borovicových překližkových panelů o podobné tloušťce jaké má cedrové jádro, používané pro stavbu kanadských kánoí, je však mnohem kratší, proto bylo nutné překližkové jádro spojit a při mechanických zkouškách byly zohledněny jednotlivé typy spojů.

Základní postupové body pro vyhodnocení a dosažení cílů:

- Výroba referenčního vzorku
- Výběr vhodného materiálového složení
- Výroba vzorků s navrhnoutou skladbou materiálů
- Zkouška tříbodovým ohybem
- Vyhodnocení testovaných sendvičových vzorků tříbodovým ohybem
- Padová zkouška
- Vyhodnocení padové zkoušky
- Celková bilance mezi kánoí, vyrobenou z cedrového sendviče a kánoí, zhotovenou z překližkového sendviče

## 6 VOLBA MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ

Pro mechanické testování byly vyrobeny dva druhy sendvičových desek, ze kterých byly nařezány jednotlivé typy vzorků. Jedním druhem sendvičové desky byla deska, jejíž materiálové složení odpovídalo materiálům používaným k výrobě kanadská kánoe. Vyrobený sendvič se pak nařezal na jednotlivé referenční vzorky, které byly použity jako etalon. Dalším druhem sendvičových desek byly dvě vyrobené sendvičové desky s navrhnutou skladbou materiálu, které se lišili jen počtem použitých potahů. Z těchto desek byly pak rovněž nařezány jednotlivé typy vzorků, které však zohledňovali jednotlivé druhy spojů.

### 6.1 Referenční vzorek

Referenční vzorek v této bakalářské práci představuje cedrový sendvič s celkovými dvěma vrstvami skelné výztuže.

#### 6.1.1 Jádro

Jádrem sendviče používaným pro stavbu kanadské kánoe jsou slepované latě plné délky (bez spojů) o rozměrech  $\frac{1}{4}'' \times \frac{3}{4}''$  (cca 6,4 x 20) mm vyrobené ze západního červeného cedru. [40,41,42]

Latě těchto rozměrů, vyrobené ze západního červeného cedru, nebylo možné na tuzemském trhu sehnat. Z toho důvodu jsem si od firmy MPC Brno objednal fasádní palubky, ze kterých jsem následně vyrobil latě o požadovaných rozměrech. Objednané fasádní palubky byly bez suků a bez povrchové úpravy. Rozměry prodávané fasádní palubky jsou 17x136x1800 mm.



Obr. 37. Cedrová fasádní palubka

- **Cedr**

Jedná se o jehličnatý strom rostoucí na západě Kanady, dorůstající až do výšky 50 m. Patří mezi nejdéle žijící stromy na světě. Mezi vlastnosti a přednosti tohoto dřeva patří nízká hustota ( $400 \text{ kg/m}^3$ ), snadná opracovatelnost, mimořádná rozměrová stabilita, vysoká odolnost proti dřevokazným škůdcům, dlouhá životnost, skvělé akustické vlastnosti a v neposlední řadě se jedná o vysoce dekorativní materiál s výbornými tepelně-izolačními vlastnostmi. [43,44]

Cena dřeva západního červeného cedru se pohybuje okolo  $50\,000 \text{ Kč bez DPH/m}^3$ . [45]

Tab. 5. Mechanické vlastnosti cedru

| Vlastnosti           | Hodnota (Mpa) |
|----------------------|---------------|
| Pevnost v tlaku      | 33            |
| Mez pevnosti v ohybu | 60            |
| Modul pružnosti      | 8700          |

### 6.1.2 Výztuž

Jako potahové vrstvy cedrového sendviče používaného pro stavbu kanadských kánoí se používá nejběžněji dostupná skelná tkanina kompatibilní s epoxidovou pryskyřicí o gramáži pohybující se mezi 4-6oz (cca  $110\text{-}170 \text{ g/m}^2$ ), která je v jedné vrstvě přilaminována na každou stranu cedrového jádra. Používaná skelná tkanina bývá keprové vazby. [40,46]

Pro výrobu referenčního vzorku byla použita skelná tkanina  $163 \text{ g/m}^2$  AEROGLOSS kepr 2/2, která byla k dispozici ve školní laboratoři. Použitá skelná tkanina byla rovněž kompatibilní s epoxidovou pryskyřicí.

Tab. 6. Vlastnosti použité skelné tkaniny

| Vlastnosti                          | Hodnota     |
|-------------------------------------|-------------|
| Kraje                               | stříhané    |
| Hustota cm (osnova)                 | $12,0\pm 1$ |
| Hustota cm (útěk)                   | $12,0\pm 1$ |
| Pevnost v tahu N/50 x 200 mm osnova | $\geq 700$  |
| Pevnost v tahu N/50 x 200 mm útěk   | $\geq 700$  |





Obr. 38. Použitá skelná tkanina keprové vazby

### 6.1.3 Matrice

Nejběžněji používanou matricí u kanadských kánoí je vysoce transparentní epoxidová pryskyřice 105/207 značky WEST SYSTEM. [39,40]

Jelikož byl velký problém tuto epoxidovou pryskyřici sehnat, musel jsem použít její adekvátní náhradu. Po předložení technického listu epoxidové pryskyřice 105/207 chemickému inženýrovi z firmy HAVEL COMPOSITES mi byla doporučena dostupná epoxidová pryskyřice LH 210 s tužidlem H10.

- **Epoxidová pryskyřice LH 210/H 10**

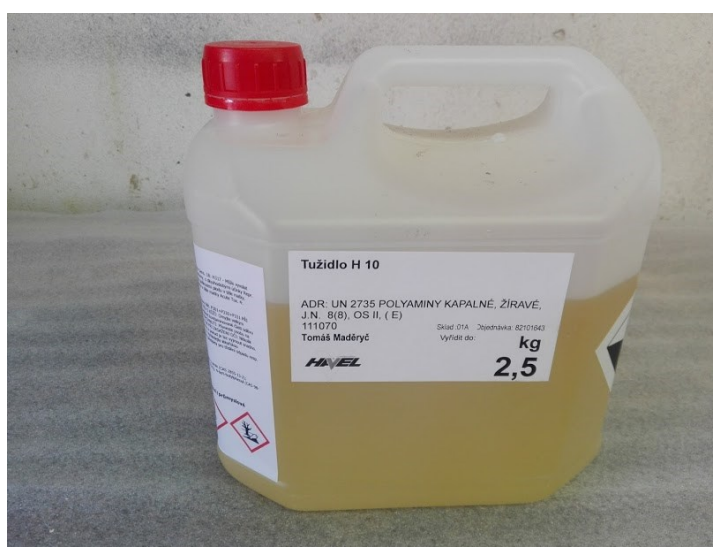
Tato epoxidová pryskyřice má velmi dobrou odolnost proti krystalizaci za nízkých teplot a také má velmi nízkou viskozitu. Vytvrzený systém LH 210 / H10 se vyznačuje extrémní průzračností, vysokou tvrdostí, chemickou odolností, minimální smrštitivostí a také je velmi šetrný k životnímu prostředí, neboť během vytvrzování neprodukuje téměř žádné škodlivé výpary.

Tab. 7. Technické parametry použité epoxidové pryskyřice

| Vlastnosti               | Hodnota             |
|--------------------------|---------------------|
| Teplota vytvrzování      | Od + 10 °C          |
| Doba zpracovatelnosti    | Cca 30 min          |
| Poměr míchání            | 100 : 45 (váhově)   |
| Měrná hmotnost při 25 °C | 1,15 kg / l         |
| Viskozita při 25 °C      | 0,7-0,9 Pa / S      |
| Obsah epoxy skupin       | 5500-6000 mmol / kg |
| Epoxidová molární hmot-  | 166-182 g           |



Obr. 39. Epoxidová pryskyřice LH 210



Obr. 40. Tužidlo H 10

#### 6.1.4 Plnivo

K vzájemnému slepení cedrových latí výrobci kanadských kánoí používají směs zahuštěné epoxidové pryskyřice 105/207 a plniva 403 Microfibers. Oba materiály vyrábí firma WEST SYSTEM [47]

Jelikož jsem toto plnivo také nesehnal, bylo mi na základě technického listu firmou HAVEL COMPOSITES doporučeno použít plnivo s bavlněnými mletými vlákny.

- **Bavlněná mletá vlákna**

Bavlněná mletá vlákna se používají jako plniva v plastech, nátěrech, barvách, třecích materiálech, papírech a lepidlech.

*Tab. 8. Mechanické a fyzikální vlastnosti vláken*

| <b>Vlastnost</b>         | <b>Hodnota</b>        |
|--------------------------|-----------------------|
| Síla vláken              | 18-21 $\mu\text{m}$   |
| Délka vláken             | 0,1-1,2 mm            |
| Teplota rozkladu         | 160 °C                |
| Hustota                  | 1,5 g/cm <sup>3</sup> |
| Pevnost za sucha         | 26,4-43 Cn/tex        |
| Index protažení za sucha | 3-7 %                 |
| Index protažení za mokra | 3-7 %                 |
| Měrný modul pevnosti     | 3,5 -4,8 N/Tex        |



*Obr. 41. Bavlněná mletá vlákna*

## 6.2 Vzorčky s navrhnutou skladbou materiálu

Materiály, použité pro výrobu sendvičových desek s navrhnutou skladbou materiálu, se ve srovnání s referenčním vzorkem lišily pouze v použitém materiálu jádra, kde místo cedrových latí o tloušťce 6,4 mm byly použity latě o stejné šířce, vyrobené z borovicových překližkových panelů o síle 6mm.

### 6.2.1 Borovicový překližkový panel

Borovicové překližkové panely byly zakoupeny ve firmě HORNBACH. Skládaly se z pěti vrstev na sebe lepených dých. Jednotlivé dýchové vrstvy byly na sebe lepeny tak, aby byla zaručena vzájemná kolmost směru vláken jednotlivých dých. Směry vláken obou vnějších dýchových vrstev byly ve směru delší strany panelu. Překližkové latě byly pak řezány v tomto směru. Rozměry borovicových překližkových panelů byly 6 x 610 x 1220 mm. Výrobce udávané vlastnosti 4-8 mm tlustých borovicových překližek jsou znázorněny v tab. 9.

Tab. 9. Vlastnosti 4-8 mm borovicových překližek

| Vlastnost       | Hodnota               |
|-----------------|-----------------------|
| Hustota         | 600 kg/m <sup>3</sup> |
| Pevnost v ohybu | 45 Mpa/38Mpa          |
| Modul pružnosti | 6000 Mpa/3000Mpa      |



Obr. 42. Borovicový překližkový panel

## 7 NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Při návrhu technologického postupu byl brán zřetel na co nejefektivnější a nejrychlejší výrobu zkušebních vzorků. Výroba zkušebních vzorků probíhala stejným způsobem jako výroba kanadské kánoe.

### 7.1 Zhotovení cedrových latí

Polotovarem pro zhotovení 6,4 mm tlustých a 20 mm širokých cedrových latí byly cedrové fasádní palubky. Jelikož však tloušťka fasádních palubek byla o mnohem větší než požadovaná tloušťka, bylo nutné tloušťku jednotlivých fasádních palubek nejprve upravit na tloušťkovacích frézách. Upravení tlouštěk cedrových fasádních palubek provedla firma Š&K truhlářství.



*Obr. 43. Úprava tloušťky palubky*

Pomocí okružní pily a rovné vodící lišty jsem upravené fasádní palubky nařezal na jednotlivé latě.



*Obr. 44. Výroba cedrových latí*

Po nařezání všech latí jsem obrousil jejich hrany od otřepů vzniklých při řezání. Broušení jsem provedl pomocí brusného papíru na dřevo o zrnitosti 120.

## **7.2 Nařezání překližkových latí z překližkového panelu**

Řezání překližkového panelu na jednotlivé překližkové latě probíhalo identicky jako řezání cedrových latí včetně jejich broušení.



*Obr. 45. Řezání překližkových latí*

## 7.3 Výroba pomocných zařízení

Pro přesnější a kvalitnější výrobu zkušebních vzorků bylo potřeba vyrobit pomocná zařízení. Mezi vyrobená pomocná zařízení patřily žebrové bednění a speciální úhломěr.

### 7.3.1 Žebrové bednění

Při výrobě zkušebních vzorků jsem se snažil použít stejné metody a postupy výroby, jaké se používají při stavbě kanadské cedrové kánoe, proto bylo nutností zhotovení vyjmutelných žeber. Pomocí žebrového bednění jsem následně vyrobil cedrové a překližkové sendvičové desky, ze kterých byly nařezány jednotlivé zkušební vzorky.

Účelem vyjmutelných žeber při konstrukci cedrové kánoe je dosažení požadovaného tvaru a snazší dosažení rovinné plochy skládající se z několika latí.



Obr. 46. Pomocná žebra originální kanadské kánoe [36]

Materiálem pro výrobu žebrového bednění byla překližka o dvakrát větší tloušťce nařezaných latí. A to proto, aby při zajišťování pozice latí k žebrovému bednění nemohly hřeby vyklouznout.



*Obr. 47. Výroba žebrového bednění*



*Obr. 48. Vyrobené žebrové bednění*

### **7.3.2 Speciální úhломěr**

Originální kanadské kánoe jsou většinou stavěny z dlouhých celých cedrových latí o tloušťce  $\frac{1}{4}$  palce.[41]



Pro postavení kánoe z překližky o podobné tloušťce je třeba překližkové latě spojovat, jelikož na trhu není k dostání překližkový panel o podobné tloušťce a délce jaké mají originální celé cedrové latě.

Obecně pro vytvoření kvalitních spojů v dřevěných latích je nutné, aby byla dostatečně velká lepená plocha.

Pro dřevěné latě o tloušťce  $\frac{1}{4}$  palce je osvědčená délka řezu 50 mm. [48]

V praxi bylo velice problematické udělat pomocí jemné ruční pily a svěráku takový řez, jelikož pila neustále sjížděla po hranách latě, navíc jednotlivě vytvořené řezy neměly stejnou délku. Z těchto důvodů jsem se rozhodl sestrojil speciální úhloměr, který by zajistil bezproblémové zhotovení řezu.

Navrhnul a sestrojil jsem ho tak, aby překližková lať byla po celou dobu řezu pevně fixována v jakési objímce. Jednotlivé díly pro výrobu speciálního úhloměru jsem vyřezal ze železné pásoviny, kterou jsem následně pomocí technologie ručního svařování elektrickým obloukem svařil k sobě.



*Obr. 49. Výroba speciálního úhloměru*



*Obr. 50. Speciální úhloměr*

#### **7.4 Výroba spojovaných překližkových latí**

Po označení místa překližkové lati budoucího řezu pomocí dvou rysek, jejichž diagonála představuje požadovanou délku řezu, se samostatně každá lat' vloží do speciálního úhloměru tak, aby rysky speciálního úhloměru splývaly s ryskami vyznačenými na překližkové lati.



*Obr. 51. Zarovnání rysek*

Poté se do řezu na úhloměru vloží ruční pila na železo a lat' se v požadovaném úhlu seřízne.



*Obr. 52. Seříznutí překližkové latě*



*Obr. 53. Detail provedeního řezu*



*Obr. 54. Seříznutá překližková lať podle navrhnutého schématu*

Po seřiznutí potřebného množství překližkových latí si připravíme dva plastové kelímky. Do obou plastových kelímků nalijeme směs epoxidové pryskyřice LH 210 a tužidla H10. Množství pryskyřice a tužidla volíme s ohledem na dobu zpracovatelnosti. Doba zpracovatelnosti je výrobcem udávána 30 minut. Výrobcem doporučený hmotnostní poměr mezi pryskyřicí a tužidlem je 100:45-50. Do jednoho ze dvou kelímků přimícháme plnivo. Plnivo tvoří funkci zahuštění pryskyřice, kdy se z dané směsi stává lepidlo.



*Obr. 55. Směs epoxidové pryskyřice a tužidla*

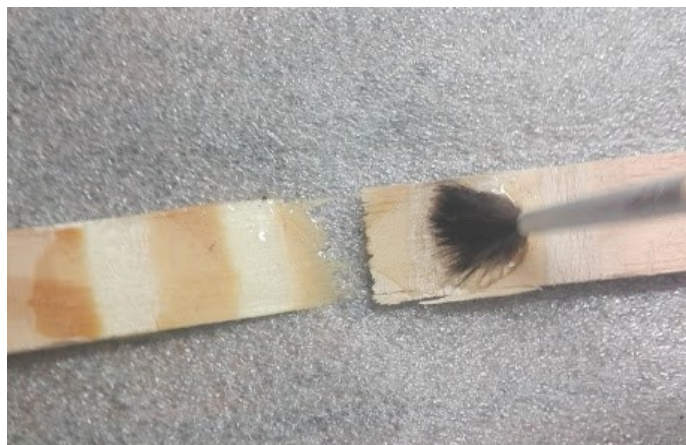


*Obr. 56. Zahuštění epoxidové směsi*

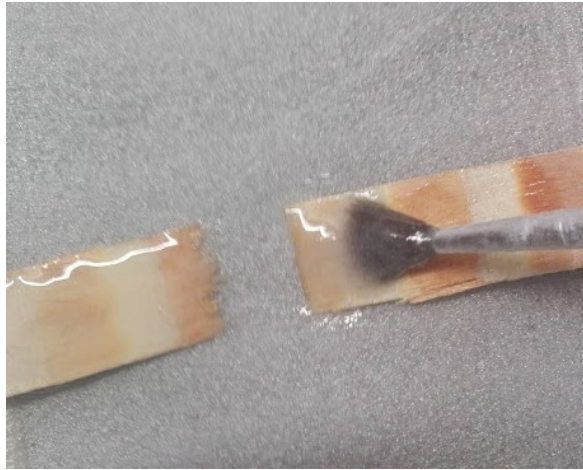


*Obr. 57. Vzniklé lepidlo*

Jakmile máme připravené dva kelímky, jeden s tekutou epoxidovou pryskyřicí a druhý se zahuštěnou epoxidovou pryskyřicí, můžeme provést slepení spoje. Při lepení byl brán zřetel na savost dřeva, proto byly nejprve obě plochy spoje potřeny tekutou epoxidovou pryskyřicí. Po nasycení dřeva tekutou epoxidovou pryskyřicí byly obě plochy spoje natřeny zahuštěnou epoxidovou pryskyřicí. Množství nanesené zahuštěné pryskyřice bylo takové, aby po spojení obou ploch spoje lepidlo přetévalo.



*Obr. 58. Nanášení tekuté epoxidové pryskyřice*



*Obr. 59. Nanášení zahuštěné epoxidové  
pryskyřice*

Po nanesení epoxidového lepidla na obě plochy spoje se obě plochy spojily k sobě. Celý proces lepení probíhal při teplotě 25 °C.



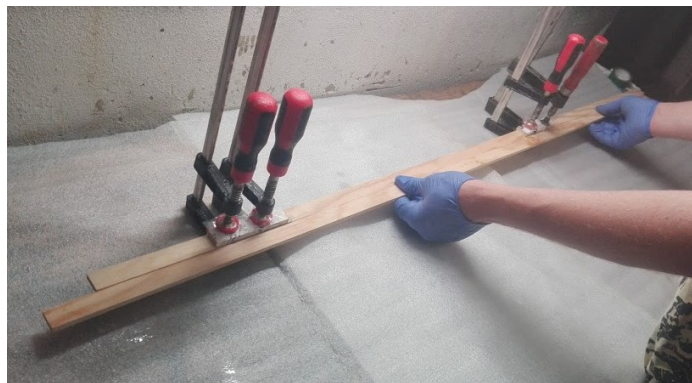
*Obr. 60. Spojení obou lepených ploch*

Poté se na obě vnější strany spoje vložili izolační páskou oplepené 100 mm dlouhé překližkové latě, které sloužily jako styčné plochy pro truhlářské svěrky, pomocí nichž se spoj utáhnul. Izolační páska na styčných plochách byla použita z důvodu lepší separace po zatuhnutí epoxidového lepidla a následném povolení truhlářských svěrek. Na jeden spoj byly použity dvě truhlářské svěrky, každá umístěna přes okraj spoje.



*Obr. 61. Utažení překližkového spoje*

Na jedné překližkové lati byly dle navrženého schématu dva spoje, tudíž se celý proces opakoval i u druhého spoje. Kvůli spojům se překližková lať rozdělila na tři části, díky čemuž po následném opětovném složení jednotlivých částí nebyla lať jako celek rovná, ale každá část byla v různých úhlech odchýlena od rovné přímky, proto bylo třeba splenou lať vyrovnat. K tomuto účelu byla použita jiná nerozřezaná překližková lať, pomocí které se rozřezaná lať opět vyrovnala.



*Obr. 62. Srovnání spojované překližkové latě*

## **7.5 Výroba cedrové sendvičové desky (R)**

Výroba cedrové sendvičové desky probíhala na vyrobeném žebrovém bednění. Na začátku výroby jsem položil jednu cedrovou lať kolmo přes žebra bednění tak, aby hrana cedrové latě byla zarovnána s konci každého žebra. Po zarovnání jsem zajistil polohu cedrové latě pomocí 15 mm dlouhých hřebů.



*Obr. 63. Zarovnání první cedrové latě*

Pak jsem si stejně jako v případě lepení překližkových spojů nachystal dva kelímky, kde v jednom kelímku byla směs epoxidové pryskyřice LH 210 a tužidla H10, ve druhém stejná směs doplněná o bavlněná mletá vlákna. Následně jsem na plochu cedrové latě, udávající její tloušťku, nanesl tekutou epoxidovou pryskyřici. Poté jsem vzal další cedrovou lat' a na identickou plochu jsem také nanesl tekutou epoxidovou pryskyřici. Jakmile dřevo z obou latí nasálo epoxidovou pryskyřici, potřel jsem obě plochy latí zahuštěnou epoxidovou pryskyřicí.



*Obr. 64. Nanášení zahuštěné pryskyřice na lat'*

Poté jsem obě latě přitisknul dlaněmi k sobě a opět jsem polohu druhé latě zajistil pomocí hřebů.





*Obr. 65. Přitisknuté cedrové latě*

Po spojení latě a žeber jsem v prostoru mezi žebry kontroloval výšky hran každé latě. Jakmile jsem výšky hran dlaněmi srovnal, stáhnul jsem obě latě pomocí truhlářských svěrek k sobě. Svěrky jsem umisťoval do prostoru mezi žebry.



*Obr. 66. Stažení cedrových latí svěrkami*

Tímto způsobem jsem přidával jednotlivé latě až do doby, kdy šířka slepené desky byla větší než možná délka posunutí truhlářských svěrek. Od tohoto okamžiku jsem identicky postupoval z opačného konce. Lepení cedrové desky probíhalo při teplotě 25 °C.

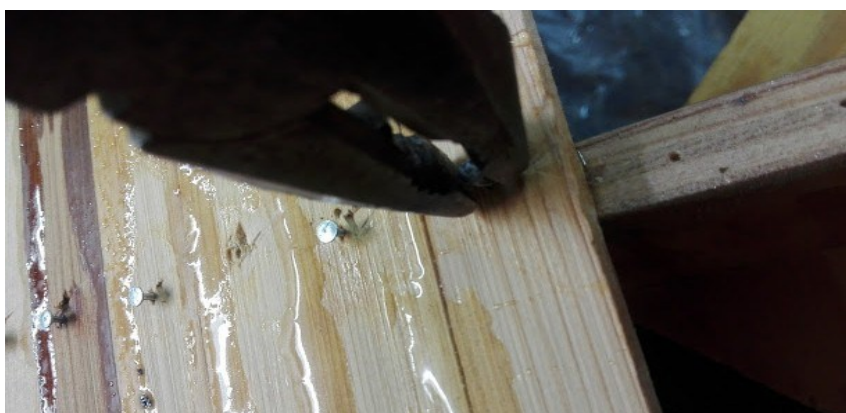


*Obr. 67. Lepení latí z opačného konce*



*Obr. 68. Cedrová deska*

Po zaschnutí zahuštěné epoxidové pryskyřice byly všechny hřeby spojující jednotlivé cedrové latě a žebra odstraněny pomocí šroubováku a kleští.



*Obr. 69. Odstranění hřebíků pomocí kleští*

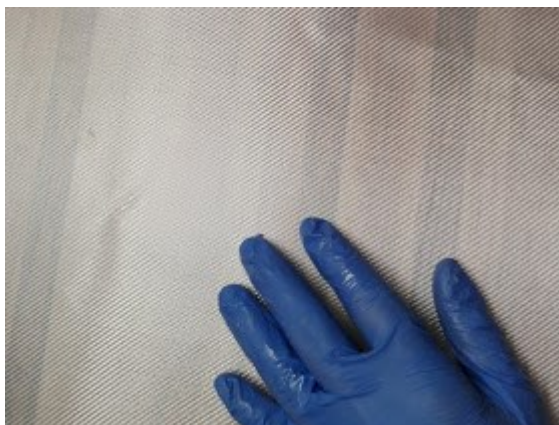
Pomocí pásové brusky jsem cedrovou desku obrousil z obou stran. Kvůli silné zpětné reakci od pásové brusky jsem cedrovou desku opět připevnil k žebrovému bednění, ale už jen

ve čtyřech krajních bodech. Celá deska se pak lépe držela a broušení bylo pak snazší. Poté jsem ještě z obou stran desku ručně obrousil brusným papírem ze zrnitosti 120.



*Obr. 70. Broušení cedrové desky pomocí  
pásové brusky*

Po obroušení jsem desku vyfoukal kompresorem. Poté jsem z role skelné tkaniny vystříhl kus skelné tkaniny o rozměrech větších než cedrová deska. Rozměry jsem volil takové, aby skelná tkanina přesahovala všechny okraje desky. Následně jsem vystříženou tkaninu položil na cedrovou desku. Jakékoliv záhyby a zduření na tkanině jsem se snažil rukou zahladit. Jakmile byla tkanina rovnoměrně rozložená po cedrové desce, tak jsem si připravil do plastového kelímku směs epoxidové pryskyřice LH 210 a tužidla H10 v poměru 100: 45-50. Po důkladném promíchání směsi jsem mohl začít s laminováním. Laminování jsem prováděl pomocí technologie ruční laminace. Pomocí štětce jsem roztíral epoxidovou pryskyřici po skelné tkanině. Tkanina velice dobře prosakovala a prakticky ihned po nanesení pryskyřice se začala objevovat malba dřeva. Vzduchové bubliny se, až na pár malých výjimek, v podstatě neobjevovaly. Cedrová deska byla polaminována z každé strany jednou vrstvou  $170 \text{ g/m}^2$  skelné tkaniny. Laminování proběhlo při teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .



*Obr. 71. Úprava tkaniny před laminací*



*Obr. 72. Laminace cedrové desky*



*Obr. 73. Vyrobená cedrová deska*

## 7.6 Výroba překližkových sendvičových desek

Výroba překližkových sendvičových desek probíhala téměř identicky, jako výroba cedrové sendvičové desky. Jediný rozdíl byl v tom, že překližkové spojované latě jsem kladl na žebrové bednění tak, abych byl schopen vyrobit všechny typy vzorků.

### 7.6.1 Překližková spojovaná sendvičová deska polaminovaná z každé strany jednou vrstvou 163 g/m<sup>2</sup> skelné tkaniny (P1).

Pro vytvoření překližkové spojované sendvičové desky bylo nejdříve potřeba obrousit překližkové spojované latě, a to konkrétně na místech spojů. Ve fázi lepení jednotlivých latí k sobě stačily vybrousit pouze dotykové plochy. Broušení jsem provedl ručně pomocí brusného papíru 80. Poté jsem pokládal jednotlivé spojované a celé překližkové latě na žebrové bednění, přičemž jsem se řídil navrhnutým schématem.



*Obr. 74- Stažení překližkových latí pomocí truhlářských svěrek*



*Obr. 75. Broušení překližkové desky  
pásovou bruskou*



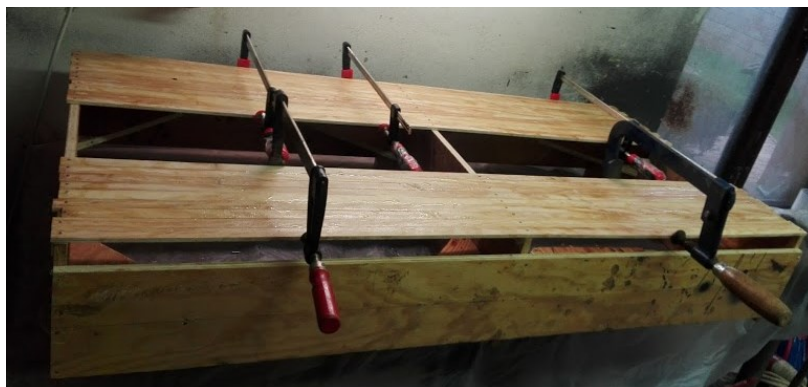
*Obr. 76. Laminace překližkové desky*



*Obr. 77. Hotová překližková deska z celkovými dvěma vrstvami výztuže*

#### **7.6.2 Překližková spojovaná sendvičová deska polaminovaná z každé strany dvěma vrstvami 163 g/m<sup>2</sup> skelné tkaniny (P2).**

Při výrobě spojované překližkové desky vyztužené z každé strany dvěma vrstvami výztuže už šel poznat rozdíl v prosakování pryskyřice skrze dvě vrstvy skelné tkaniny. K prosáknutí dvou vrstev bylo zapotřebí vynaložit větší přítlačnou sílu štětce k povrchu výztuže. Začalo se také objevovat více vzduchových bublin, které jsem pomocí stěrky odstranil. Výrobní postup byl však stále stejný jako v předešlých dvou případech.



*Obr. 78. Stažení překližkových latí pomocí truhlářských svěrek desky 2*



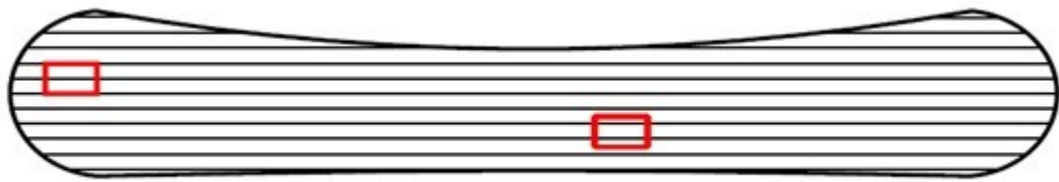
*Obr. 79. Hotová překližková deska s celkovými čtyřmi vrstvy výztuže*

## **7.7 Řezání a značení sendvičových desek na jednotlivé vzorky**

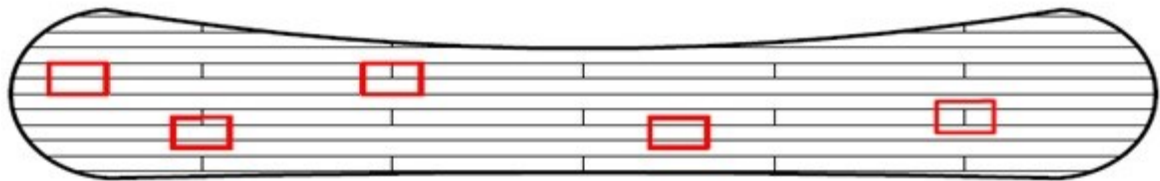
Vyrobené sendvičové desky byly pomocí úhlové brusky nařezány na jednotlivé vzorky. Pro ohybovou zkoušku měly vzorky rozměry 40 x 200 mm. Vzorky použité pro padovou zkoušku byly o rozměrech 100 x 100 mm.

### **7.7.1 Vzorky pro ohybové zkoušky**

Z referenční desky byly nařezány dva typy vzorků, z každého typu bylo zhotoveno pět identických vzorků. Ze dvou sendvičových desek s navrhnoutou skladbou materiálu bylo z každé desky nařezáno pět druhů vzorků a z každého druhu vzorku dalších pět stejných vzorků. Dohromady pro tříbodovou ohybovou zkoušku bylo tedy nařezáno 60 vzorků.

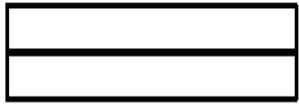
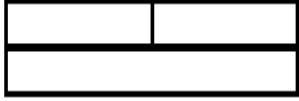
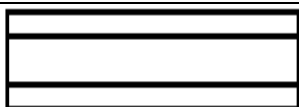

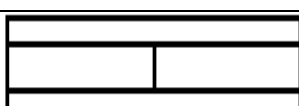


Obr. 80. Vzorky řezané z originálního materiálového složení



Obr. 81. Jednotlivé vzorky řezané z navrhnuté materiálové skladby

Tab. 10. Značení navrhnutých vzorků

| Značení vzorku | Typ vzorku   |
|----------------|--|
| A              |  |
| B              |  |
| C              |  |
| D              |  |
| E              |  |



Tab. 11. Značení referenčních vzorků

| Značení vzorku | Typ vzorku |
|----------------|------------|
| <b>F</b>       |            |
| <b>G</b>       |            |

### 7.7.2 Vzorky pro padovou zkoušku

Pro padovou zkoušku bylo z referenční desky nařezáno pět vzorků. Z každé sendvičové desky s navrhnutou skladbou materiálu bylo nařezáno deset vzorků, pět se spojem a pět bez spoje. Dohromady pro padovou zkoušku bylo tedy nařezáno 25 vzorků.

Tab. 12. Vzorky pro padovou zkoušku

| Značení vzorků         | Typ vzorku |
|------------------------|------------|
| <b>H</b>               |            |
| <b>I</b>               |            |
| <b>J (ref. vzorek)</b> |            |

## 8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDNÝCH HODNOT OHYBOVÝCH ZKOUŠEK

V této kapitole jsou zpracovány výsledky měření jednotlivých typů vzorků při ohybových zkouškách a také poruchy a deformace nejčastěji se vyskytující v jednotlivých sériích. Naměřené hodnoty referenčních vzorků a všech vzorků s navrženou skladbou materiálu jsou pro lepší srovnání vloženy do společné tabulky. Naměřená data byla vyhodnocena ve statistickém programu Minitab 17.

### 8.1 Definice statistických pojmů

- **Aritmetický průměr**

Aritmetický průměr ( $\bar{x}$ ) se vypočítá jako součet všech hodnot proměnných ( $x_i$ ) vydělený jejich počtem ( $n$ ). Popisuje soubor mnoha hodnot a je náchylný na vzdálené hodnoty [6]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

- **Minimum a maximum**

Statistické parametry minimum a maximum určují minimální (min) a maximální (max) hodnoty v celém souboru měření [6]

- **Směrodatná odchylka**

Směrodatná odchylka je definována jako druhá odmocnina rozptylu. Vypočítá se jako poměr součinu kvadratických odchylek naměřených hodnot z aritmetického průměru a celkovým počtem proměnných snížený o jedna. [6]

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

- **Dolní kvartil**

Dolní kvartil (Q1) rozděluje datový soubor tak, že 25 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek tj. 75 % je větších nebo rovných tomuto kvartilu. [6]

- **Medián**

Medián neboli střední kvartil rozděluje datový soubor tak, že polovina hodnot je menších než medián a polovina hodnot je větších, nebo rovno. [6]

- **Horní kvartil**

Horní kvartil (Q2) rozděluje datový soubor tak, že 75 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek tj. 25 % je větších nebo rovných. [6]

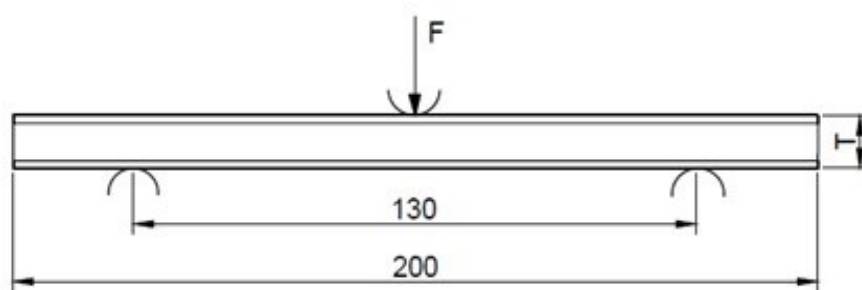
- **Interkvartilové rozpětí**

Tato statistická hodnota (IQR) je mírou variability souboru a je definována jako vzdálenost mezi horním a dolním kvantilem. [6]

$$IQR = x_{0,75} - x_{0,25} \quad (3)$$

## 8.2 Zkouška třibodovým ohybem

Zkouška třibodovým ohybem byla provedena na univerzálním zkušebním stroji ZWIC 1456. Měření dat bylo provedeno pomocí softwarového programu TestExpert II, který měřená data statisticky vyhodnotil a také graficky zaznamenal. Mezi zaznamenávané hodnoty ohybové zkoušky patřili modul pružnosti, mez pevnosti a deformační práce. Vzdálenost mezi podpěrami, na kterých ležely jednotlivé zkušební vzorky, byla 130 mm. Uprostřed této vzdálenosti působila zatěžující síla.



Obr. 82. Rozměry zatěžovaného vzorku

Tab. 13. Technické parametry zkušebního stroje ZWICK [6]

| Technické parametry       |         |
|---------------------------|---------|
| Max. zkušební síla        | 20 kN   |
| Celková výška             | 2012 mm |
| Celková šířka             | 630 mm  |
| Výška stroje              | 1284 mm |
| Šířka pracovního prostoru | 420 mm  |
| Hmotnost                  | 150 Kg  |



Obr. 83. Univerzální zkušební stroj  
zwick 1456

Tab. 14. Modul pružnosti v ohybu testovaných vzorků v [Mpa]

| Referenční vzorky                      |           |      |      |      |      |        |      |      |
|--|-----------|------|------|------|------|--------|------|------|
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s    | Min  | Max  | Q1   | Medián | Q3   | IQR  |
| f                                      | 6360      | 539  | 5880 | 7200 | 5905 | 6270   | 6865 | 960  |
| g                                      | 6470      | 964  | 5180 | 7400 | 5465 | 6810   | 7305 | 1840 |
| Vzorky s navrhnutou skladbou materiálu |           |      |      |      |      |        |      |      |
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s    | Min  | Max  | Q1   | Medián | Q3   | IQR  |
| a1                                     | 6460      | 382  | 5920 | 6910 | 6130 | 6390   | 6820 | 690  |
| b1                                     | 5780      | 556  | 5180 | 6500 | 5240 | 5800   | 6320 | 1080 |
| c1                                     | 6260      | 715  | 5440 | 7240 | 5565 | 6400   | 6895 | 1330 |
| d1                                     | 6180      | 655  | 5420 | 7040 | 5530 | 6350   | 6745 | 1215 |
| e1                                     | 5730      | 852  | 4690 | 6730 | 4895 | 5750   | 6560 | 1665 |
| a2                                     | 7160      | 612  | 6450 | 8120 | 6675 | 7100   | 7665 | 990  |
| b2                                     | 5760      | 887  | 5090 | 7260 | 5160 | 5360   | 6540 | 1380 |
| c2                                     | 6930      | 642  | 5930 | 7660 | 6360 | 7060   | 7430 | 1070 |
| d2                                     | 6920      | 1200 | 4880 | 7880 | 5890 | 7380   | 7715 | 1825 |
| e2                                     | 6740      | 221  | 6440 | 6950 | 6520 | 6780   | 6945 | 425  |

Tab. 15. Mez pevnosti v ohybu testovaných vzorků v [Mpa]

| Referenční vzorky                      |           |       |       |       |        |        |        |        |
|--|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s     | Min   | Max   | Q1     | Medián | Q3     | IQR    |
| f                                      | 81,95     | 5,284 | 76,08 | 88,14 | 76,415 | 84,29  | 86,305 | 9,89   |
| g                                      | 80,26     | 3,812 | 74,53 | 83,39 | 76,385 | 81,93  | 83,29  | 6,905  |
| Vzorky s navrhnutou skladbou materiálu |           |       |       |       |        |        |        |        |
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s     | Min   | Max   | Q1     | Medián | Q3     | IQR    |
| a1                                     | 79,73     | 6,326 | 72,3  | 86,55 | 73,495 | 79,65  | 86,015 | 12,52  |
| b1                                     | 73,57     | 2,247 | 70,84 | 76,25 | 71,25  | 74,44  | 75,45  | 4,2    |
| c1                                     | 80,32     | 8,536 | 70,23 | 93,06 | 72,96  | 79,91  | 87,895 | 14,935 |
| d1                                     | 80,79     | 9,127 | 70,61 | 95,57 | 74,18  | 79,44  | 88,085 | 13,905 |
| e1                                     | 76,66     | 5,018 | 71,34 | 82,45 | 71,695 | 76,61  | 81,655 | 9,96   |
| a2                                     | 92,06     | 8,302 | 84,1  | 105,4 | 85,74  | 89,19  | 99,815 | 14,075 |
| b2                                     | 81,7      | 13,3  | 65,62 | 101   | 70,33  | 79,76  | 94,05  | 23,72  |
| c2                                     | 84,98     | 6,54  | 78,92 | 93    | 79,065 | 83,06  | 91,865 | 12,08  |
| d2                                     | 89,02     | 9,776 | 73,96 | 100,4 | 80,305 | 90,85  | 96,83  | 16,525 |
| e2                                     | 88,66     | 6,334 | 81,61 | 94,86 | 81,89  | 91,03  | 94,24  | 12,35  |

Tab. 16. Deformační práce ohybu testovaných vzorků v [Nmm]

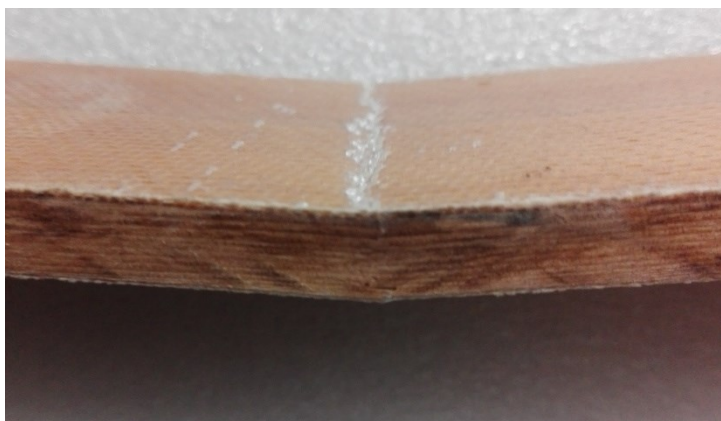
| Referenční vzorky                      |           |         |         |          |          |         |          |          |
|--|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s       | Min     | Max      | Q1       | Medián  | Q3       | IQR      |
| f                                      | 3291,99   | 698,27  | 2338,49 | 4054,58  | 2586,03  | 3477,67 | 3905,13  | 1319,1   |
| g                                      | 3291,64   | 563,97  | 2689,39 | 4004,78  | 2739,8   | 3295,48 | 3841,565 | 1101,76  |
| Vzorky s navrhnutou skladbou materiálu |           |         |         |          |          |         |          |          |
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s       | Min     | Max      | Q1       | Medián  | Q3       | IQR      |
| a1                                     | 3395,81   | 581,8   | 2643,73 | 4078,51  | 2886,31  | 3252,13 | 3977,15  | 1090,8   |
| b1                                     | 3319,27   | 963,77  | 2139,78 | 4479,2   | 2423,15  | 3186,31 | 4281,865 | 1858,715 |
| c1                                     | 3052,36   | 494,12  | 2652,26 | 3901,99  | 2709,91  | 2968,4  | 3436,805 | 726,895  |
| d1                                     | 3752,53   | 365,68  | 3425,55 | 4299,56  | 3436,83  | 3667,29 | 4110,87  | 674,04   |
| e1                                     | 3351,67   | 467,81  | 2798,61 | 3960,48  | 2888,05  | 3447,07 | 3767,595 | 879,55   |
| a2                                     | 6406,17   | 1546,55 | 4583,74 | 8248,38  | 5122,71  | 5759,72 | 8012,86  | 2890,15  |
| b2                                     | 7207,11   | 1462,99 | 5657,68 | 8935,41  | 5717,32  | 7417,17 | 8591,865 | 2874,55  |
| c2                                     | 6091,32   | 1323,78 | 4504,19 | 7484,16  | 4691,125 | 6585,22 | 7244,56  | 2553,44  |
| d2                                     | 7462,02   | 2030,66 | 5378,0  | 9922,67  | 5580,395 | 7011,46 | 9568,93  | 3988,54  |
| e2                                     | 6442,24   | 2149,91 | 4631,17 | 10126,74 | 4976,39  | 5849,36 | 8204,54  | 3228,15  |

### 8.2.1 Poruchy vzorků řezaných z jednotlivých sendvičových desek

V této části jsou popsány a zobrazeny nejčastější poruchy vzorků řezaných z jednotlivých sendvičových desek. Mezi nejčastější poruchy všech vzorků patřilo lokální poškození v místě styku se zatěžovanou podpěrou. U sendvičových desek s překližkovým jádrem se velmi často objevovala kombinace normálového a smykového porušení jádra. Smykové porušení u všech typů vzorků mívalo velmi krátké vzdálenosti a vyskytovalo se převážně blíže k tahovým stranám jednotlivých vzorků. V této části bakalářské práce jsou také ukázány a zobrazeny jediné tři vzorky obsahující spoje, na kterých se vyskytla porucha.

### 8.2.2 Poruchy vzorků řezaných z referenční sendvičové desky R

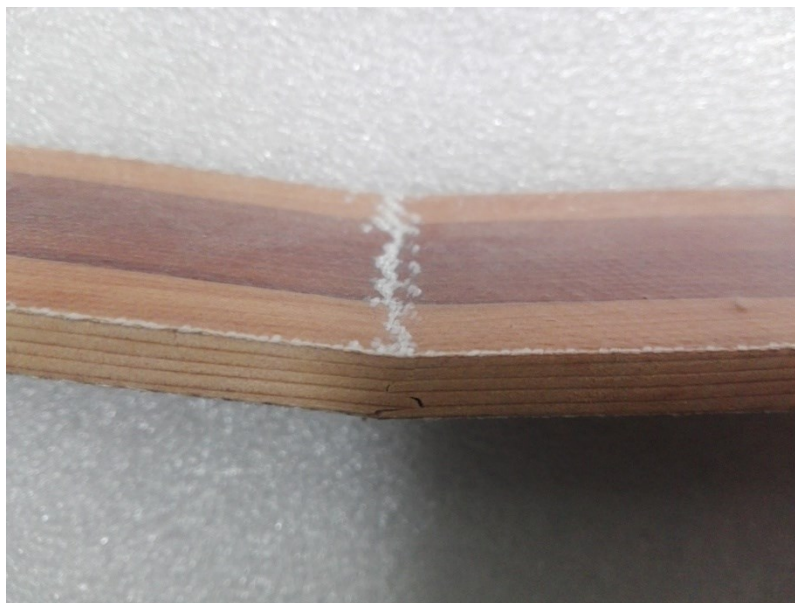
Mezi nejčastější poškození jednotlivých referenčních vzorků patřilo lokální poškození. Lokální poškození se nacházelo v místech styku s podpěrou, na kterou působila zatěžovací síla. Na některých vzorcích se také vyskytlo mírné smykové porušení jádra, které se ve velmi malé vzdálenosti šířilo podél vláken



*Obr. 84. Lokální porušení vzorku bez smykového poškození (vzorek f)*



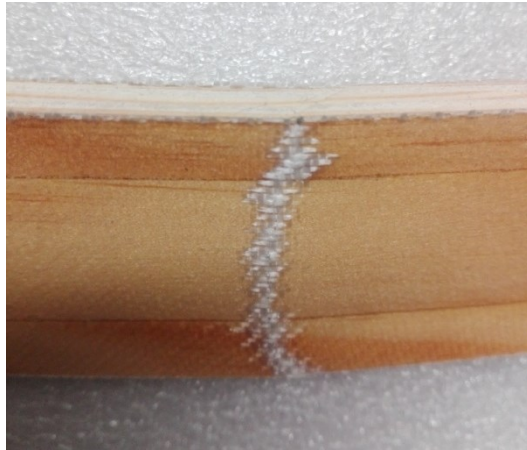
*Obr. 85. Mírné smykové poškození vzorku f*



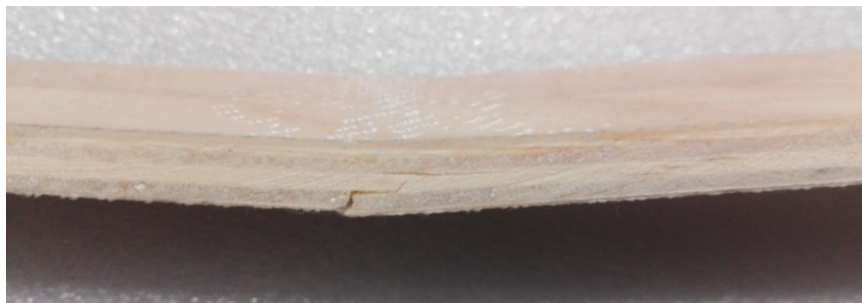
*Obr. 86. Lokální poškození jádra s mírnou smykovou deformací*

### **8.2.3 Poruchy vzorků řezaných ze sendvičové desky P1**

Poruchy jednotlivých vzorků řezaných ze sendvičové desky P1 vykazovaly nejčastěji lokální poškození v místě zatěžování a kombinaci normálových a smykových poruch, kde šíření trhliny probíhalo na tahové straně vzorku v poměrně krátké vzdálenosti od místa styku zatěžující podpěry. Normálová trhlina byla obvykle přes dvě vnější dýhy na tahové straně vzorku a dále se v malé vzdálenosti šířila podél rozhraní dýhových vrstev. V průběhu ohybového zatěžování z celkových patnácti vzorků sendvičové desky P1, které obsahovaly spoje různých kombinací, prasknul pouze jeden. Konkrétním vzorkem porušeným v místě spoje byl vzorek d1. Toto porušení si vysvětluji tím, že na konec spoje byla buď nanesena velmi slabá vrstva zahuštěné pryskyřice, nebo tam žádná nebyla, neboť jsem v místě poruchy nezaregistroval náznaky žádné výrobní vady jako například vzduchové bubliny, suky, apod.



*Obr. 87. Lokální deformace vzorku c1*



*Obr. 88. Smykové a normálové poškození vzorku a1*



*Obr. 89. Šíření trhliny mimo rovinu spoje (vzorek b1)*



*Obr. 90. Jediné porušení v rovině spoje u vzorku d1*



#### 8.2.4 Poruchy vzorků řezaných ze sendvičové desky P2

Nejčastější poruchy vzorků řezaných ze sendvičové desky P2 byly naprosto identické jako poruchy vzorků řezaných ze sendvičové desky P1, čili nejčastěji vyskytující se poruchou bylo lokální poškození v místě styku zatěžující síly doplněné o kombinaci normálových a smykových poruch. Stejně jako u vzorků řezaných ze sendvičové desky P1, i zde se smykové poškození šířilo v malé vzdálenosti od místa styku zatěžující síly. Z testovaných vzorků obsahujících spoje praskly dva vzorky a to vzorky b2 a d2. Příčinou poruchy v rovinách obou spojů bylo přílišné zbroušení vnějších dých před laminací, které bylo dáno necitlivým tlačáním pásové brusky k povrchu překližkové desky.



*Obr. 91. Nejčastěji vyskytující se porucha (lokální poškození bez poruchy spoje)*



*Obr. 92. Porušení v rovině spoje (vzorek b2)*



*Obr. 93. Porušení v rovině spoje (vzorek d2)*

## 9 DISKUZE VÝSLEDKŮ Z TŘÍBODOVÝCH OHYBOVÝCH ZKOUŠEK

Následující podkapitoly se postupně věnují podrobnému popisu vyhodnocení statistických výsledků měření a to vždy pro konkrétní sérii testovaných vzorků. Obecně u všech sledovaných hodnot v jednotlivých sériích této bakalářské práce se vyskytoval poměrně velký rozptyl hodnot. Tento rozptyl v jednotlivých sériích byl způsoben několika faktory. Mezi tyto faktory patří:

- Zvolená technologie laminování (ruční laminace)
- Výskyt materiálových vad (suky u překližkových panelů)
- Nestejnorodé vybroušení sendvičových jader (díky malým zkušenostem pracovníka)
- Výskyt spojů (u překližkových jader)

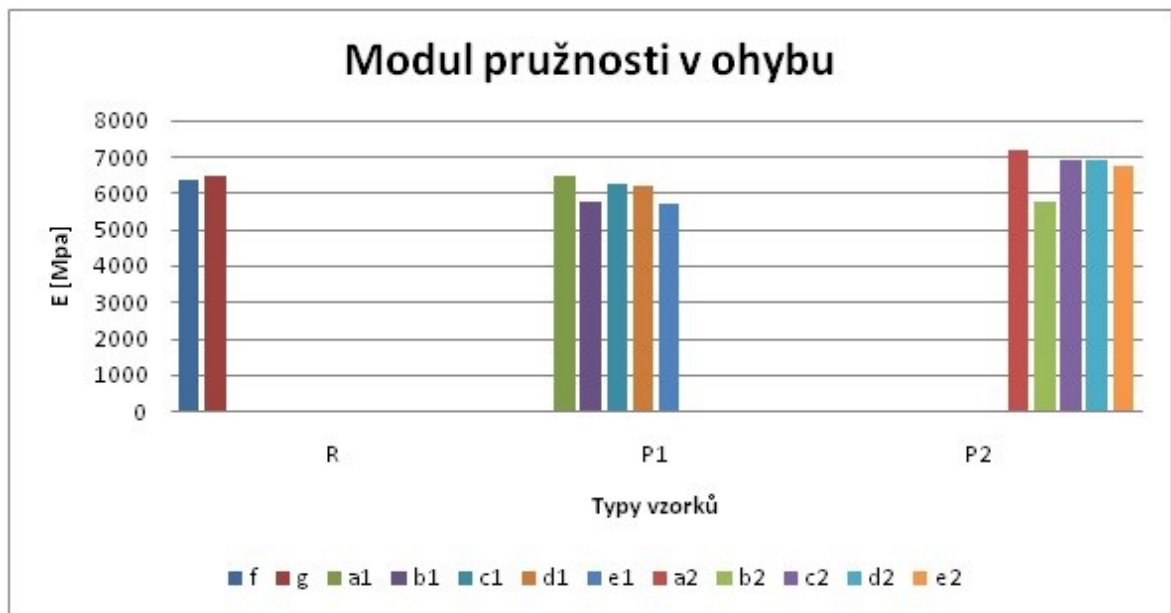
### 9.1.1 Modul pružnosti v ohybu

Naměřené průměrné hodnoty modulů pružnosti referenčních vzorků byly u vzorku f a g 6360 Mpa a 6470 Mpa

Ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 vykazoval nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vzorek a1  $E_{a1} = 6460$  Mpa tato hodnota je přibližně stejná jako nejvyšší hodnota modulu pružnosti u referenčního vzorku. Naopak nejnižší naměřenou průměrnou hodnotu modulu pružnosti u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 měl vzorek e1  $E_{e1} = 5730$  Mpa tato hodnota je o 9 % nižší než nejnižší průměrná hodnota modulu pružnosti referenčního vzorku.

Nejvyšší průměrnou hodnotu modulu pružnosti ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek a2  $E_{a2} = 7160$  Mpa tato hodnota je o 10,7 % vyšší než nejvyšší naměřená průměrná hodnota modulu pružnosti referenčního vzorku. Nejnižší naměřenou průměrnou hodnotu modulu pružnosti u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek b2  $E_{b2} = 5760$  Mpa. Tato hodnota je o 9,4 % nižší než nejnižší naměřená hodnota modulu pružnosti referenčního vzorku. Tato hodnota je výrazně nižší než ostatní průměrné hodnoty modulů pružnosti jednotlivých vzorků řezaných z desky P2. Tuto průměrnou hodnotu také ovlivnila porucha jednoho vzorku b2 v rovině spoje. Hodnota modulu pružnosti tohoto chybného vzorku byla 5090 Mpa.

Jak můžeme vidět na obr. 91, nejvyšší maximální průměrnou naměřenou hodnotu modulu pružnosti ze všech měřených vzorků měl vzorek a2  $E_{\max} = 7160$  Mpa. Tato hodnota je o 10,7 % vyšší než nejvyšší naměřená průměrná hodnota modulu pružnosti referenčního vzorku, naopak nejnižší byla u vzorku e1  $E_{\min} = 5730$  Mpa, která je o 9 % nižší než nejnižší naměřená průměrná hodnota referenčního vzorku.



Obr. 94. Průměrné naměřené hodnoty modulů pružnosti všech měřených vzorků

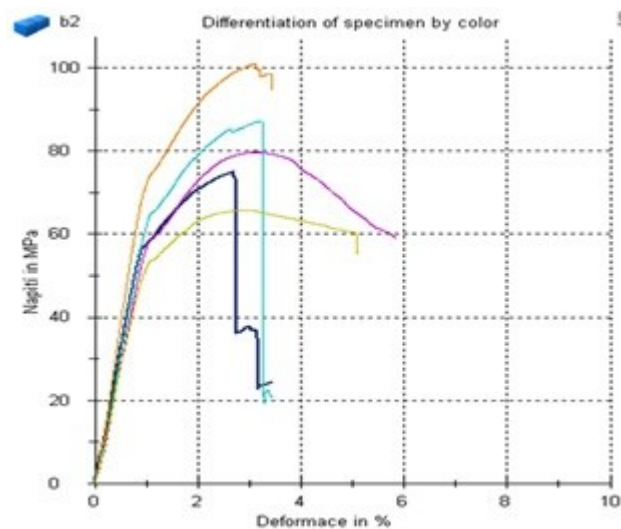
### 9.1.2 Mez pevnosti v ohybu

Naměřené průměrné hodnoty meze pevnosti referenčních vzorků byly u vzorku f a g 81,95 Mpa a 80,26 Mpa.

Ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 vykazoval nejvyšší hodnotu meze pevnosti ( $\sigma_{md1} = 80,79$  Mpa) vzorek d1. Jeho hodnota je přibližně stejná jako nejvyšší hodnota modulu pružnosti u referenčního vzorku. Naopak nejnižší naměřenou průměrnou hodnotu modulu pružnosti u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 měl vzorek b1 -  $\sigma_{mb1} = 73,57$  Mpa. Tato hodnota je o 8,3 % nižší než nejnižší průměrná hodnota modulu pružnosti referenčního vzorku.

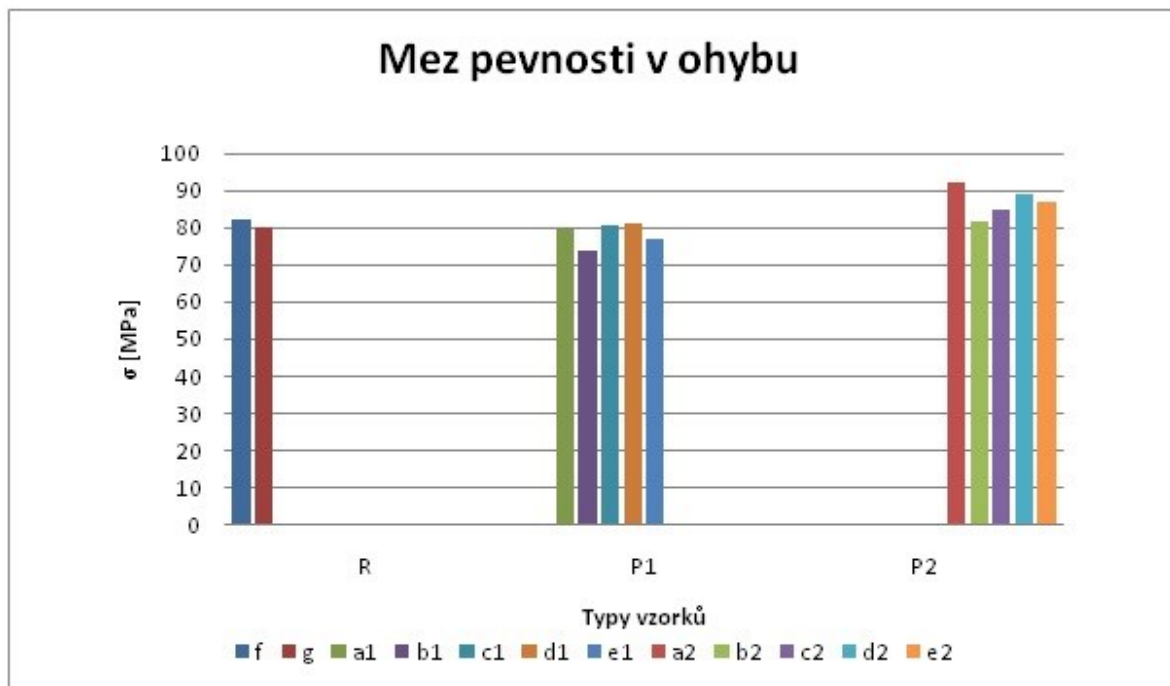
Nejvyšší průměrnou hodnotu meze pevnosti ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek a2 -  $\sigma_{ma2} = 92,06$  Mpa. Tato hodnota je o 12,3 % vyšší, než nejvyšší naměřená průměrná hodnota meze pevnosti referenčního vzorku. Nejnižší naměřenou průměrnou hodnotu meze pevnosti u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek b2 -  $\sigma_{mb2} = 81,7$  Mpa. Tato hodnota je přibližně stejná jako nejvyšší naměřená průměrná hodnota

meze pevnosti referenčního vzorku. Tato hodnota je výrazně nižší než ostatní průměrné hodnoty mezí pevnosti jednotlivých vzorků řezaných z desky P2. Tuto průměrnou hodnotu také ovlivnila porucha jednoho vzorku b2 v rovině spoje. Hodnota meze pevnosti tohoto chybného vzorku byla 65,62 Mpa. Vzorky b2 měly také největší směrodatnou odchylku meze pevnosti ze všech měřených vzorků. Bylo to dané zřejmě tím, že úsek na sendvičové desce b2, ze kterého jsem řezal jednotlivé vzorky b2, jsem až příliš nerovnoměrně vybrousil, ale v dýchách za vnějšími dýhami mohla být také vysoká koncentrace materiálových vad v podobě suků.



Obr. 95. Rozptyl hodnot vzorku b2

Jak můžeme vidět na obr. 93, nejvyšší maximální průměrnou naměřenou hodnotou meze pevnosti ze všech měřených vzorků měl vzorek a2 -  $\sigma_{m \max} = 92,06$  Mpa, tato hodnota je o 12,3 % vyšší, než nejvyšší naměřená průměrná hodnota meze pevnosti referenčního vzorku naopak nejnižší byla u vzorku b1 -  $\sigma_{m \min} = 73,57$  Mpa, která je o 8,3 % nižší než nejnižší naměřená průměrná hodnota referenčního vzorku.



Obr. 96. Průměrné naměřené hodnoty mezí pevnosti všech měřených vzorků

### 9.1.3 Deformační práce

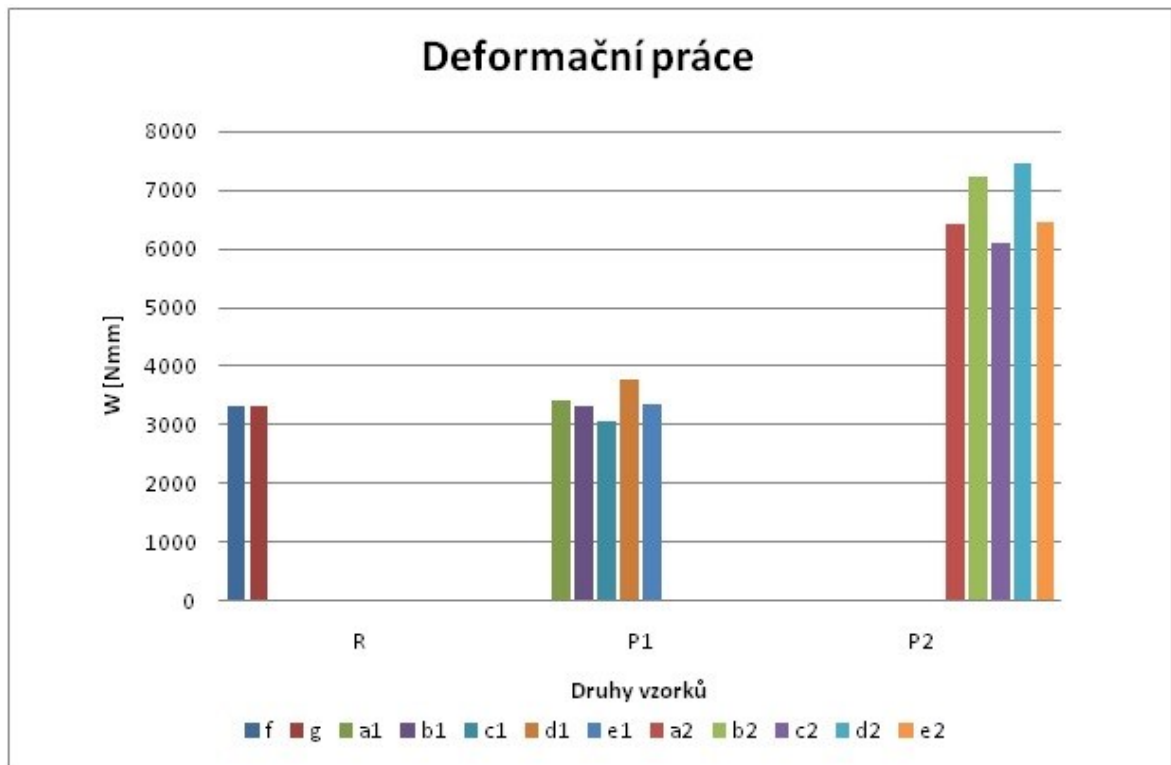
Naměřené průměrné hodnoty deformační práce referenčních vzorků byly u vzorku f a g 3291,99 Mpa a 3291,64 Mpa

Ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 vykazoval nejvyšší průměrnou hodnotu deformační práce vzorek d1 -  $w_{d1} = 3752,53$  Nmm. Tato hodnota je o 14 % vyšší než nejvyšší naměřená průměrná hodnota deformační práce referenčního vzorku. Naopak nejnižší naměřenou průměrnou hodnotou deformační práce u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 měl vzorek c1 -  $w_{c1} = 3052,36$  Nmm, tato hodnota je o 7,3 % nižší než nejnižší průměrná hodnota deformační práce referenčního vzorku.

Nejvyšší průměrnou hodnotu deformační práce ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek d2 -  $w_{d2} = 7462,02$  Nmm. Tato hodnota je o 126,7 % vyšší než nejvyšší naměřená průměrná hodnota deformační práce referenčního vzorku. Nejnižší naměřenou průměrnou hodnotou deformační práce u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek c2 -  $w_{c2} = 6091,32$  Nmm. Tato hodnota je o 185 % vyšší než nejnižší naměřená průměrná hodnota deformační práce referenčního vzorku.

Jak můžeme vidět na obr. X nejvyšší maximální průměrnou naměřenou hodnotu deformační práce ze všech měřených vzorků měl vzorek d2 -  $w_{max} = 7462,02$  Nmm, tato hodno-

ta je o 126,7% vyšší než nejvyšší naměřená průměrná hodnota deformační práce referenčního vzorku, naopak nejnižší byla u vzorku b1 -  $w_{\min} = 6091,32 \text{ Nmm}$ , která je o 185 % vyšší než nejnižší naměřená průměrná hodnota referenčního vzorku.



Obr. 97. Průměrné naměřené hodnoty deformační práce všech měřených vzorků

## 10 VYHODNOCENÍ VÝSLEDNÝCH HODNOT PADOVÉ ZKOUŠKY

V této kapitole jsou v tabulkách zpracovány výsledky měření jednotlivých typů vzorků vyrobených pro padovou zkoušku. Sledovanými hodnotami byly maximální síla, energie při proražení a konečná energie. Jsou zde také ukázány nejčastěji se vyskytující poruchy po proražení.

### 10.1 Padová zkouška

Padová zkouška byla provedena na padostroji Zwick Roell HIT230F. Padostroj je propojený přes elektronický převodník s počítačem, ve kterém je nainstalovaný program TestExpert2, pomocí kterého se naměřená data statisticky a graficky vyhodnotila a nastavily se parametry zkoušky. Pro další statistické vyhodnocení byl použit program Minitab 17.



*Obr. 98. Padostroj Zwick Roell HIT230F*

Tab. 17. Maximální síla testovaných vzorků v [N]

| Referenční vzorek                      |           |        |         |         |         |         |         |        |
|--|-----------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s      | Min     | Max     | Q1      | Medián  | Q3      | IQR    |
| J                                      | 3283,44   | 274,36 | 2993,38 | 3669,62 | 3069,34 | 3149,78 | 3564,38 | 495,04 |
| Vzorky s navrhnutou skladbou materiálu |           |        |         |         |         |         |         |        |
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s      | Min     | Max     | Q1      | Medián  | Q3      | IQR    |
| h1                                     | 3249,03   | 80,84  | 3160,8  | 3374,73 | 3185,61 | 3226,51 | 3323,70 | 138,09 |
| i1                                     | 3293,03   | 474,57 | 2694,25 | 3994,98 | 2892,08 | 3302,11 | 3689,44 | 797,36 |
| h2                                     | 5587,70   | 538,52 | 4977,82 | 6304,06 | 5157,50 | 5342,1  | 6140,7  | 983,2  |
| i2                                     | 5701,44   | 515,29 | 5073,95 | 6482,93 | 5307,09 | 5579,33 | 6156,85 | 849,76 |

Tab. 18. Energie při proražení testovaných vzorků v [J]

| Referenční vzorek                      |           |      |       |       |       |        |       |      |
|--|-----------|------|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s    | Min   | Max   | Q1    | Medián | Q3    | IQR  |
| J                                      | 21,75     | 3,9  | 16,58 | 26,96 | 18,09 | 22,52  | 25,02 | 6,93 |
| Vzorky s navrhnutou skladbou materiálu |           |      |       |       |       |        |       |      |
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s    | Min   | Max   | Q1    | Medián | Q3    | IQR  |
| h1                                     | 13,98     | 0,36 | 13,42 | 14,32 | 13,65 | 14,0   | 14,3  | 0,65 |
| i1                                     | 13,53     | 2,38 | 10,09 | 16,38 | 11,31 | 13,81  | 15,61 | 4,3  |
| h2                                     | 24,43     | 2,05 | 21,9  | 26,41 | 22,31 | 24,79  | 26,35 | 4,04 |
| i2                                     | 27,22     | 3,87 | 22,75 | 31,66 | 23,88 | 25,81  | 31,27 | 7,39 |

Tab. 19. Konečná energie testovaných vzorků v [J]

| Referenční vzorek                      |           |      |       |       |       |        |       |      |
|--|-----------|------|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s    | Min   | Max   | Q1    | Medián | Q3    | IQR  |
| J                                      | 40,32     | 1,87 | 38,33 | 42,16 | 38,34 | 40,87  | 42,02 | 3,68 |
| Vzorky s navrhnutou skladbou materiálu |           |      |       |       |       |        |       |      |
| Vzorek                                 | $\bar{x}$ | s    | Min   | Max   | Q1    | Medián | Q3    | IQR  |
| h1                                     | 30,11     | 2,93 | 25,24 | 32,69 | 27,51 | 30,92  | 32,31 | 4,8  |
| i1                                     | 33,08     | 3,95 | 28,43 | 38,06 | 29,08 | 34,27  | 36,49 | 7,41 |
| h2                                     | 45,81     | 4,05 | 43,18 | 52,98 | 43,58 | 44,11  | 48,88 | 5,3  |
| i2                                     | 46,48     | 3,01 | 42,96 | 50,07 | 43,6  | 46,18  | 49,50 | 5,9  |



## 10.2 Nejčastěji vyskytující se poruchy zkoušených vzorků

Poruchy vzorků s překližkovým jádrem, na kterých se vyskytovali spoje, byly v podstatě totožné s poruchy vzorků, na kterých se spoje nevyskytovaly. Zvýšený počet výztužných vrstev vzorků i2 a h2 se také nijak výrazně nezasloužil o jinak vypadající poruchu. Rovněž poruchy referenčního vzorku se ničím nelišily od poruch vzorků s překližkovým jádrem. Lze tedy říct, že poruchy všech typů vzorků určených pro padovou zkoušku se vizuálně ničím nelišili. Společným rysem všech poruch bylo ve většině případů rozštěpení jádra na čtyři kusy v místě nárazu.



Obr. 99. Porucha referenčního vzorku j



Obr. 100. Porucha vzorku h1

## 11 DISKUZE VÝSLEDKŮ PADOVÉ ZKOUŠKY

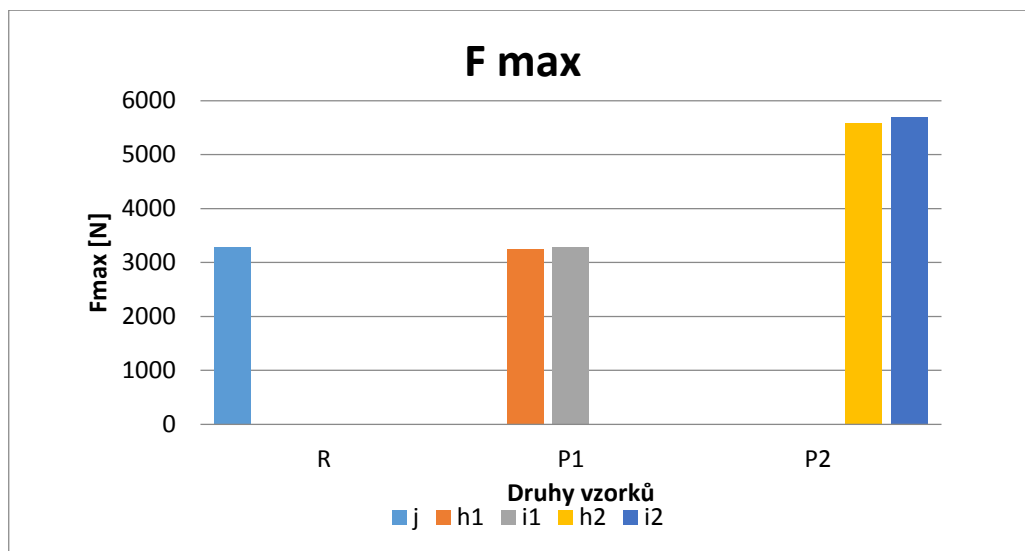
V této kapitole jsou procentuálně porovnány jednotlivé sledované průměrné hodnoty vzorků s navrhnutou skladbou materiálu s průměrnými sledovanými hodnotami referenčního vzorku.

### 11.1 Maximální síla

Naměřenou průměrnou hodnotou maximální síly jediného referenčního vzorku  $j$  u padové zkoušky byla hodnota  $F_{maxj} = 3283,44$  N

Oba vzorky  $h1$  a  $i1$  nařezané ze sendvičové desky P1 měli po změření téměř totožnou průměrnou hodnotu maximální síly, jakou měl referenční vzorek. Konkrétní hodnoty maximální síly byly  $F_{maxh1} = 3249,03$  N a  $F_{maxi1} = 3293,03$  N

Vzorky  $h2$  a  $i2$  nařezané ze sendvičové desky P2 měli vzájemně velmi podobné průměrné hodnoty maximální síly. Jednotlivé hodnoty byly  $F_{maxh2} = 5587,7$  N a  $F_{maxi2} = 5701,44$  N. Průměrné hodnoty maximální síly vzorků  $h2$  a  $i2$  byly přibližně o 70 % vyšší než průměrná hodnota maximální síly jediného referenčního vzorku  $j$ .



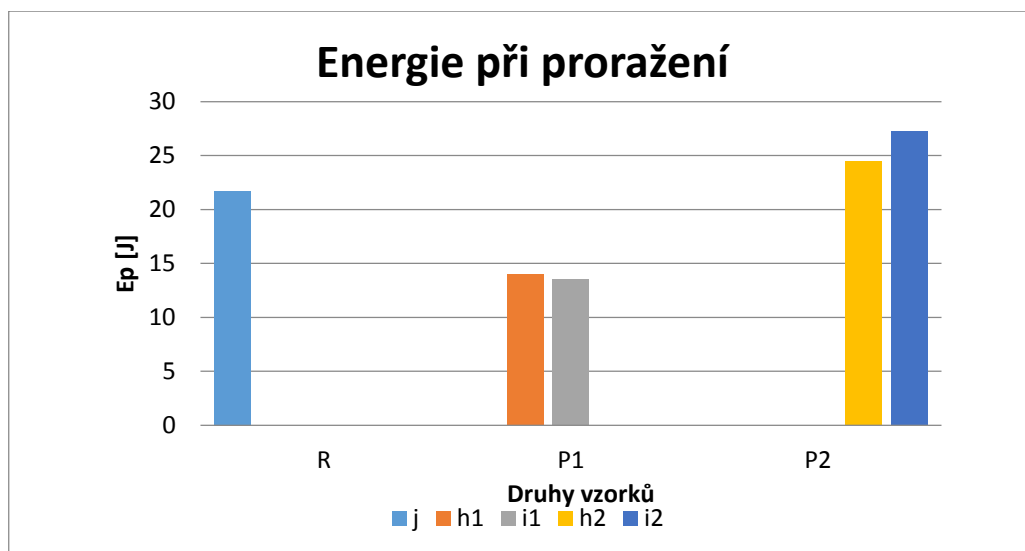
Obr. 101. Průměrné naměřené hodnoty maximální síly všech měřených vzorků

### 11.2 Energie při proražení

Naměřenou průměrnou hodnotou energie při proražení referenčního vzorku  $j$  byla hodnota  $E_p = 21,75$  J N.

Oba vzorky h1 a i1 nařezané ze sendvičové desky P1 měli po změření vzájemně velmi blízké hodnoty, konkrétními průměrnými hodnotami energie při proražení byly hodnoty  $E_{p_{h1}} = 13,98 \text{ J}$  a  $E_{p_{i1}} = 13,53 \text{ J}$ . Průměrné hodnoty energie při proražení vzorků h2 a i2 byly přibližně o 37 % nižší, než průměrná hodnota energie při proražení referenčního vzorku j.

Nejvyšší průměrnou hodnotu energie při proražení ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek i2  $E_{p_{i2}} = 27,22 \text{ J}$ . Tato hodnota je o 25 % vyšší než nejvyšší naměřená průměrná hodnota energie při proražení referenčního vzorku. Nejnižší naměřenou průměrnou hodnotu energie při proražení u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek h2  $E_{p_{h2}} = 24,43 \text{ J}$ . Tato hodnota je o 12 % vyšší než nejnižší naměřená průměrná hodnota energie při proražení referenčního vzorku.



Obr. 102. Průměrné naměřené hodnoty energie při proražení všech měřených vzorků

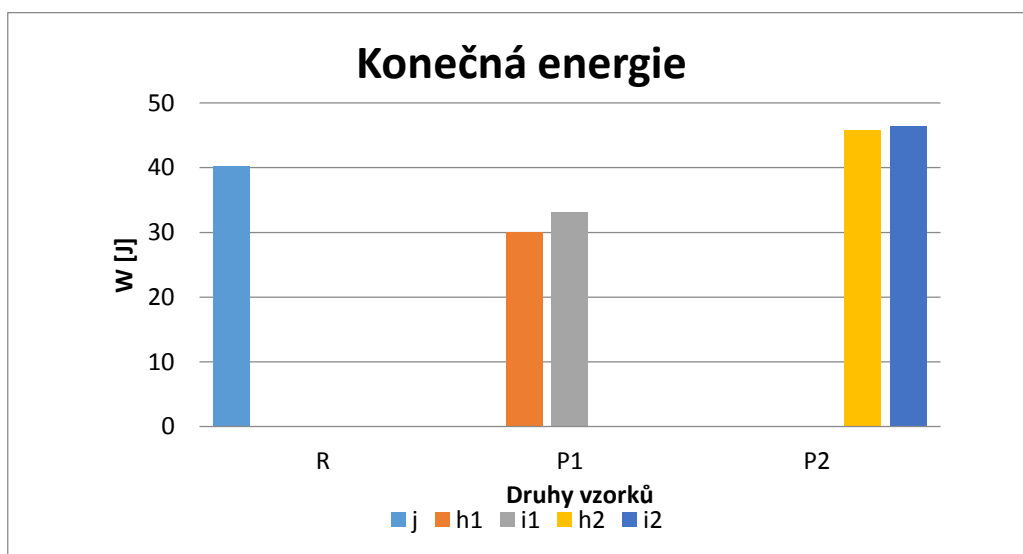
### 11.3 Konečná energie

Naměřenou průměrnou hodnotou konečné energie referenčního vzorku j byla hodnota  $w_j = 40,32 \text{ J}$

Ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 vykazoval nejvyšší průměrnou hodnotu konečné energie vzorek i1  $w_{i1} = 33,08 \text{ J}$ . Tato hodnota je o 18 % nižší než naměřená průměrná hodnota konečné energie referenčního vzorku j. Naopak nejnižší naměřenou průměrnou hodnotu konečné energie u vzorků nařezaných ze sendvičové desky P1 měl vzorek

h1  $w_{h1} = 30,11$  J. Tato hodnota je o 25 % nižší než průměrná hodnota konečné energie referenčního vzorku.

Nejvyšší průměrnou hodnotu konečné energie ze vzorků nařezaných ze sendvičové desky P2 měl vzorek i2  $w_{i2} = 46,48$  J. Tato hodnota je o 15,3 % vyšší než naměřená průměrná hodnota referenčního vzorku. Naopak nejnižší naměřenou průměrnou hodnotu konečné energie ze dvou typů vzorků nařezaných z této sendvičové desky měl vzorek h2  $w_{h2} = 45,81$  J. Tato hodnota byla o 13,6 % vyšší než naměřená průměrná hodnota referenčního vzorku



Obr. 103. Průměrné naměřené hodnoty konečné energie všech měřených vzorků

## 12 CENOVÁ A HMOTNOSTNÍ KALKULACE KÁNOÍ VYROBENÝCH Z CEDROVÉHO A Z PŘEKLIŽKOVÉHO SENDVIČE

V této kapitole je uvedeno cenové a hmotnostní srovnání mezi kánoí vyrobenou podle doporučené materiálové skladby a kánoí vyrobenou podle navrhnutého materiálového složení. Potřebné údaje o kánoi jsou vzaty z kánoe stavěné pod záštitou Lawrence Technological University. Uvedené ceny jednotlivých položek jsou včetně DPH.

### 12.1 Cenová kalkulace kánoe vyrobené z cedrového sendviče

- **Epoxidová pryskyřice LH 210/H 10**

Parametry cedrové kánoe vyrobené pod záštitou Lawrence Technological University jsou:

- Délka 7,2 m
- Šířka 1,35 m
- Celková délka spotřebovaných cedrových latí byla 1000 m. [22]

Odhadovaná plocha této kánoe je 10 m<sup>2</sup>.

Při výrobě referenční desky byla spotřeba epoxidové pryskyřice LH 210 přibližně 1 kg na m<sup>2</sup>. Spotřeba tužidla H10 byla 0,5 kg na m<sup>2</sup>. Spotřeba epoxidové pryskyřice LH 210 a tužidla H10 na výrobu kánoe je tedy 10 kg a 5 kg.

Cena LH 210 je 247 Kč/kg. [52]

Cena H10 je 442,5 Kč/kg. [53]

Celková cena laminačního systému LH 210/H10 pro výrobu cedrové kánoe by tedy byla 4682 Kč.

- **Bavlněná mletá vlákna**

Pro výrobu všech tří sendvičových desek jsem spotřeboval minimální množství bavlněných vláken. Pro výrobu kánoe stačí zakoupit nejmenší balení na trhu.

Nejmenší prodávané balení bavlněných mletých vláken ve firmě Havel Composites je 0,5 kg. Cena za 0,5 kg je 156 Kč. [54]

Celková cena bavlněných mletých vláken pro výrobu cedrové kánoe by byla 156 Kč.

- **skelná tkanina 163 g/m<sup>2</sup> AEROGLASS kepr 2/2**

Jestliže odhadovaná plocha kánoe je 10 m<sup>2</sup> a doporučené množství vrstev skelné výztuže je jedna vrstva z každé strany, tak pro výrobu cedrové kánoe budeme potřebovat 20 m<sup>2</sup> skelné tkaniny.

Balení o rozměrech 10 m<sup>2</sup> této skelné tkaniny stojí 374 Kč. [55]

Celková cena skelné tkaniny pro výrobu cedrové kánoe je tedy 749 Kč.

- **Cedr**

Pro výpočet celkového objemu cedrového dřeva (jádra) potřebného pro stavbu kánoe vyrobenou pod záštitou Lawrence Technological University byl použit vzorec:

$$V_{\text{cedru kánoe}} = a \cdot b \cdot c \quad (4)$$

Kde:

a - šířka cedrové latě

b - tloušťka cedrové latě

c - celková délka použitých cedrových latí

Po dosazení:

$$V_{\text{cedru kánoe}} = 0,02 \cdot 0,0064 \cdot 1000 = 0,128 \text{ m}^3$$

Cena západního červeného cedru se pohybuje od 60 000 Kč/m<sup>3</sup> s DPH. [45]

Celková cena cedru pro výrobu kánoe je tedy 7680 Kč

Tato celková cena cedrového jádra nemusí být konečná, ale může se ještě znatelně zvýšit pro toho, kdo nevlastní tloušťkovací frézku. Hodinová mzda truhlářů se ve větších městech pohybuje od 250 Kč/hod. Po sečtení jednotlivých položek potřebných pro vyrobení kánoe z cedrového sendviče dostáváme:

$$\Sigma = 4682 + 156 + 749 + 7680 = 13\,267 \text{ Kč}$$

Celková cena kánoe vyrobená z cedrového sendviče by tedy byla **13 267 Kč**.

## 12.2 Cenová kalkulace kánoe vyrobené ze spojované sendvičové desky P1

Jediným rozdílem v ceně mezi kánoí vyrobenou z cedrového sendviče a kánoí vyrobenou ze sendvičové desky P1 je jiná cena použitého jádra a také fakt, že tloušťku překližkových latí není třeba upravovat.

Cena borovicového překližkového panelu o rozměrech 6 x 610 x 1220 mm zakoupeného v Hornbachu byla 179 Kč. [56]

Tloušťka řezu okružní pily byla 2 mm. Z jednoho borovicového překližkového panelu bylo nařezáno 27 latí o celkové délce 32,94 m.

Na výrobu kánoe vyráběnou pod záštitou Lawrence Technological University bylo potřeba cedrových latí o celkové délce 1000 m. [22]

Pro výpočet celkového množství překližkových panelů potřebných pro stavbu kánoe z překližkového sendviče byl použit vzorec:

$$d = \frac{e}{f} \quad (5)$$

Kde:

d – počet překližkových panelů pro výrobu kánoe

e – celková délka použitých cedrových latí kánoe vyrobené pod záštitou Lawrence Technological University

f – celková délka překližkových latí nařezaných z jednoho překližkového panelu

Po dosazení:

$$d = \frac{1000}{32,94} = 30,3 \doteq 31$$

Celková cena překližkových panelů pro výrobu kánoe je tedy **5 580 Kč**

Po sečtení jednotlivých položek dostáváme:

$$\Sigma = 4682 + 156,5 + 749 + 5580 = 11\,167 \text{ Kč}$$

Celková cena kánoe vyrobené ze spojovaného překližkového jádra olaminovaného z každé strany jednou vrstvou skelné tkaniny je 11 167 Kč.

### 12.3 Cenová kalkulace kánoe vyrobené ze spojované sendvičové desky P2

Jediným rozdílem v ceně mezi kánoí vyrobenou ze sendvičové desky P1 a sendvičové desky P2 je spotřeba epoxidové pryskyřice a tužidla. Při výrobě sendvičové desky P2 byla spotřeba epoxidové pryskyřice 1,7 kg/m<sup>2</sup>. Jestliže uvažujeme plochu kánoe 10 m<sup>2</sup>, tak spotřeba epoxidové pryskyřice LH 210 pro výrobu kánoe by byla 17 kg. Spotřeba tužidla by pak byla 8,5 kg.

Celková cena epoxidové pryskyřice a tužidla je tedy 7960 Kč. Po sečtení jednotlivých položek dostáváme:

$$\Sigma = 5580 + 156,5 + 749 + 7960 = 14\,445 \text{ Kč}$$

Celková cena kánoe vyrobené ze spojované borovicové překližky z každé strany olaminované dvěma vrstvami skelné výztuže je 14 445 Kč.

## 12.4 Celková hmotnost kánoe vyrobené z cedrového sendviče

Pro určení hmotnosti kánoe vyrobené z cedrového jádra, jsem zvážil pět vzorků f původně určených k ohybovým zkouškám. Z těchto pěti zvážených vzorků jsem získal průměrnou hodnotu, která byla  $\bar{m}_f = 0,026 \text{ kg}$ .

Pro výrobu kánoe z cedrového sendviče vyráběnou pod záštitou Lawrence Technological University bylo použito cedrových latí o rozměrech (20 x 6,4) mm o celkové délce 1000 m. [22]

Rozměry latí použitých pro výrobu referenčních vzorků byly tedy stejné jako rozměry latí pro výrobu zmiňované kánoe. Celková délka cedrových latí v jednom referenčním vzorku byla 0,4 m. Po dosazení do rovnice:

$$g = \frac{h}{i} \quad (6)$$

Kde:

g – počet vzorků v kánoi

h – celková délka cedrových latí v kánoi

i – celková délka cedrových latí v jednom vzorku

Po dosazení:

$$g = \frac{1000}{0,4} = 2500$$

Hmotnost cedrové kánoe jsem vypočítal podle vztahu:

$$m_{\text{kánoe}} = g \cdot \bar{m}_f \quad (7)$$

Po dosazení:

$$m_{\text{kánoe}} = 2500 \cdot 0,026 = 65 \text{ kg}$$

Celková hmotnost kánoe vyrobená z cedrového sendviče je 65 kg.



Je také nutno dodat, že tato hodnota je pouze orientační, jelikož obecně hmotnost lodí vyrobených ze dřeva závisí na vlhkosti použitého dřeva.

### 12.5 Hmotnost kánoe vyrobené ze sendvičové desky P1

Vzhledem k tomu, že vzorky  $f$  a  $a_1$  byly geometricky identické, byl k určení hmotnosti kánoe vyrobené ze spojované borovicové překližky polaminované z každé strany jednou vrstvou skelné výztuže použit stejný postup jako pro určení hmotnosti kánoe vyrobené z cedrového jádra. Průměrná hmotnost vzorku  $a_1$  byla  $\bar{m}_{a_1} = 0,034$  kg.

Celková hmotnost kánoe, vyrobené ze spojované borovicové překližky polaminované z každé strany jednou vrstvou skelné výztuže je 85 kg.

### 12.6 Hmotnost kánoe vyrobená ze sendvičové desky P2

Průměrná hmotnost vzorku  $a_2$  byla  $\bar{m}_{a_2} = 0,04$  kg.

Vzhledem k tomu, že vzorek  $a_2$  byl také geometricky identický jako předchozí vzorky, byl použit opět stejný postup. Průměrná hmotnost vzorku  $a_2$  byla  $\bar{m}_{a_2} = 0,04$  kg po dosazení do předchozích vztahů vyplývá, že celková hmotnost kánoe vyrobené ze spojované borovicové překližky polaminované z každé strany dvěma vrstvami skelné výztuže je **100 kg**.

## ZÁVĚR

Z výsledků mechanických zkoušek vyplynulo, že spoje v borovicové sendvičové konstrukci neměly prakticky vliv na celkovou pevnost konstrukce. Z celkových 30 vzorků se spojem praskly tři vzorky v rovině spoje. Jako příčina defektu v rovině spoje se ukázala chyba ve výrobě.

Z výsledků ohybové zkoušky vyplynulo, že mez pevnosti kánoí vyrobených ze spojovaných 6 mm tlustých borovicových překližek, polaminovaných z každé strany jednou nebo dvěma vrstvami 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny, by byla o 3,6 % menší a 7,7 % větší než mez pevnosti kánoe vyrobené z 6,4 mm tlustého cedrového jádra, polaminovaného z každé strany jednou vrstvou 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny.

Z výsledků padové zkoušky vyplynulo, že konečná energie potřebná pro proražení kánoí vyrobených ze spojovaných 6 mm tlustých borovicových překližek polaminovaných z každé strany jednou a dvěma vrstvami 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny by byla o 21,6 % menší a 14,3 % větší než konečná energie potřebná pro proražení kánoe vyrobené z 6,4 mm tlustého cedrového jádra, polaminovaného z každé strany jednou vrstvou 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny.

Z hmotnostního srovnání vyšlo, že kánoe vyrobené ze spojovaných 6 mm tlustých borovicových překližek, polaminovaných z každé strany jednou a dvěma vrstvami 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny, by byly o 30,7 % těžší a 53,8 % těžší než kánoe vyrobené z 6,4 mm tlustého cedrového jádra, polaminovaného z každé strany jednou vrstvou 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny.

Z finančního srovnání vyplynulo, že kánoe vyrobené ze spojovaných 6 mm tlustých borovicových překližek, polaminovaných z každé strany jednou a dvěma vrstvami 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny, by byly o 15,8 % levnější a 8,9 % dražší než kánoe vyrobené z 6,4 mm tlustého cedrového jádra, polaminovaného z každé strany jednou vrstvou 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny.

Po sepsání daných závěrů založených na změřených faktech je z mého subjektivního hlediska lepší postavit kánoi z ověřeného cedrového sendviče, přestože kánoe vyrobená ze spojované 6 mm tlusté borovicové překližky je o 15,8 % levnější (v případě, že vlastníme tloušťkovací frézku, v opačném případě by byl cenový rozdíl ještě větší) a mez pevnosti je přibližně srovnatelná. Konečná energie potřebná k proražení je totiž o 21,6 % nižší a

hmotnost je poměrně o dost vyšší a to o 30,7 %. V případě kánoe vyrobené ze spojované 6 mm tlusté borovicové překližky polaminované z každé strany dvěma vrstvami 163 g/ m<sup>2</sup> skelné keprové tkaniny mi přijde daný pevnostně hmotnostní poměr dosti nevýhodný.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1]RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Přednášky z předmětu Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. Zlín, 2011.
- [2] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich využití*. Liberec:Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009.ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] Král, Pavel. *Dýhy, překližky a lepené materiály*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011. ISBN 978-80-7375-552-2.
- [5] AGARWAL, D., Bhagwan, Lawrence J. BROUTMAN, Lubomír SODOMKA, Richard BAREŠ, Jan JAVORNICKÝ a Jaroslava ZEMÁNKOVÁ. *Vláknové kompozity*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [6] PAVELKA, Lukáš. *Vliv materiálového složení a tvaru na mechanické chování sendvičové konstrukce*[online]. Zlín, 2015 [cit. 2018-01-07]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/33633>
- [7] METELA, Petr. *Výzkum únavového chování kompozitních sendvičových struktur v dopravním průmyslu* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2018-01-05]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24519/metela\\_2013\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24519/metela_2013_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [8] HORSÁK, Marek. *Návrh stavebnicového systému řešení sendvičových konstrukcí* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2017-12-08]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24108/hors%C3%A1k\\_2013\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24108/hors%C3%A1k_2013_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [9] JANČÁR, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: VUT, 2013. ISBN 80-214-2443-5
- [20] KITTFORT. Iniciátor. *Kittfort.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://www.kittfort.cz/produkty/polyesterove-a-epoxidove-pryskyrice/iniciator/>

- [31] KITTFORT. Tvrdidlo. *Kittfort.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://www.kittfort.cz/produkty/polyesterove-a-epoxidove-pryskyrice/tvrdidlo/>
- [42] BAMBUCH, Martin. *Výzkum infuzních procesů zpracování kompozitních materiálů a jejich optimalizace* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2017-11-23]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/39655>
- [53] GOGA, Vladimír. Bunkovételesá. *Posterus: portál pre odborné publikovanie*[online]. 2010 [cit. 2017-12-12]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7861>
- [64] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. ©2016 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [75] BLACK, Sara. Back-country boating: Carbon fiber ultra-lightens Adirondack pack canoe. In: *Composites World*. [online]. 2015 [ cit. 2018-01-04 ] Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/back-country-boating-carbon-fiber-ultra-lightens-adirondack-pack-canoe>
- [86] BIBLIS, Evangelos J. a Honorio F. CARINO. Flexural properties of southern pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic. *Forest Products Journal* [online]. 2000, **50**(4), 34-36 [cit. 2017-11-28] Dostupné z: <https://search.proquest.com/openview/7f8df5ce0b73e65ef9d6872efb0dea7d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=25222>
- [97] Tap into the Strength and Flexibility of Engineering Composites. In: *Engineering360*[online]. 2017 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://insights.globalspec.com/article/4770/tap-into-the-strength-and-flexibility-of-engineering-composites>
- [108] WOOD, Geoff. Quasi-isotropic braid reduces cost in large composite tooling. *JEC Composites Magazine*. 2009, **46**(53), 46-47. Dostupné také z: <http://www.braider.com/pdf/Papers-Articles/Quasi-Isotropic-Braid-Reduces-Cost-in-Large-Composite-Tooling.pdf>
- [119] A&P Technology. High Tech Hockey Stick. *A&P Technology* [online]. 2017 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://www.braider.com/Case-Studies/High-Tech-Hockey-Stick.aspx>

- [20] HAVEL COMPOSITES. Technologie výroby kompozitů. *Havel composites* [online]. 2005 [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-%20Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [21] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Přednášky z předmětu Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. Zlín, 2016.
- [22] GERHART, Andrew a Donald CARPENTER. Innovative Learning Experience: Detroit To Pittsburgh Canoe Expedition. *ASEE Peer: Papers on Engineering Education Repository* [online]. Paper presented at 2006 Annual Conference & Exposition, Chicago, Illinois. American Society for Engineering Education, 2006 [cit. 2017-12-05]. Ke stažení dostupné z: <https://peer.asee.org/598>
- [23] WATSON, James R. How Tough Are They? In: MOORES, Ted. *Kayak Craft: Fine Woodstrip Kayak Construction* [online]. Brooklin: Wooden Boat Publications, 2001, s. 5 – 6 [cit. 2017-12-02]. ISBN 0-937822-56-6. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=KlbM8d1S19AC&oi=fnd&pg=PA1&dq=glued%20lap%20construction%20boat&ots=Rtlt\\_n1EOg&sig=-g-QifcFHmvOeR-sSdVjZZHJ9jE&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=KlbM8d1S19AC&oi=fnd&pg=PA1&dq=glued%20lap%20construction%20boat&ots=Rtlt_n1EOg&sig=-g-QifcFHmvOeR-sSdVjZZHJ9jE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [24] PŘIKRYL, Lubor. Síly na C2 podrobně. In: *Ano pro canoe* [online]. 2010 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <http://www.kanoe.cz/clanky/skola-kanoistiky/dodatky/sily/sily.html>
- [25] VARMAN, Rishi. Ship stresses. In: *SlideShare* [online]. 2014 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/rishivrmn/ship-stresses>
- [26] HAVEL COMPOSITES. Polyuretanové pěny. *Havel composites* [online]. 2017 [cit. 2017-12-30]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/391-Polyuretanove-peny/0-list.html>
- [27] JANUŠ, Radek. *Experimentální studium vakuové infuze* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2017-11-05]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24795/janu%C5%A1\\_2013\\_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24795/janu%C5%A1_2013_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [28] CHARLES COMPOSITE PRODUCTION. Materiálové verze Kanoe- Polo lodí. *Charles composite production* [online]. 2012 [cit. 2017-12-19]. Dostupné z:

[http://www.charles.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=19%3Amateriverze-kanoe-polo-lod&catid=38%3Aostatn&Itemid=128&lang=cz](http://www.charles.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=19%3Amateriverze-kanoe-polo-lod&catid=38%3Aostatn&Itemid=128&lang=cz)

[29] 3MB. The use of composite materials in nautical applications. In: *3MB Co.* [online]. 2014 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://www.3mb.asia/the-use-of-composite-materials-in-nautical-applications/>

[30] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály: Definice a složení* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defroz.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defroz.pdf)

[312] CHOVANČÍK, Tomáš. *Návrh konstrukce a technologie výroby součástí pro automotive* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2017-11-08]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40784/chovan%C4%8D%C3%ADk\\_2017\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40784/chovan%C4%8D%C3%ADk_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[32] *Microlab Gallery* [online]. MicrolabNW, 2007 [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: <http://www.microlabgallery.com/gallery/Sample3fullXPols.aspx>

[33] HANÁK, Václav. *Analýza polymerních kompozitních materiálů při definovaných podmínkách* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2017-11-26]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40793/han%C3%A1k\\_2017\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40793/han%C3%A1k_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[34] EASTON HOCKEY. Synergy GX 30. *Easton hockey* [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://eastonhockey.com/gear/sticks/synergy-gx-30/>

[35] EASY COMPOSITES. Lightweight Braided Carbon Sleeve. *Easy Composites* [online]. 2015 [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: [http://www.easycomposites.co.uk/?\\_escaped\\_fragment\\_=/fabric-and-reinforcement/carbon-fibre-reinforcement/carbon-fibre-braided-sleeve/carbon-fibre-braided-sleeve-40mm.html](http://www.easycomposites.co.uk/?_escaped_fragment_=/fabric-and-reinforcement/carbon-fibre-reinforcement/carbon-fibre-braided-sleeve/carbon-fibre-braided-sleeve-40mm.html)

[36] CLEM, Jim. This is how to build a DIY cedar strip canoe. In: *BDN Outdoors* [online]. 2016 [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <https://bangordailynews.com/2016/07/21/outdoors/this-is-how-to-build-a-diy-cedar-strip-canoe/?ref=relatedBoxApps>

[37] SIGMUND, Ota. *Výzkum matric pro pre-preg aplikace*[online]. Zlín, 2017[cit. 2018-01-21]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z:

[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40666/sigmund\\_2017\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40666/sigmund_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[38] BODLÁK, Lukáš. *Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů*[online]. Zlín, 2016[cit. 2018-01-23]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z:

[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37987/bodl%C3%A1k\\_2016\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37987/bodl%C3%A1k_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[39] BEAR MOUNTAIN BOATS. Material + Kits. *Bear Mountain BOATS* [online]. 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.bearmountainboats.com/pages/materials-kits>

[40] Pawlak, Tom. An easy – to- build clipboard. *Epoxyworks* [online]. 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://epoxyworks.com/index.php/start-off-simple/>

[41] BEAR MOUNTAIN BOATS. Canoe Strips. *Bear Mountain BOATS* [online]. 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.bearmountainboats.com/collections/canoe-kits-and-building-materials/products/canoe-strips>

[42] North West Canoe. Better to Bead & Cove ?. *North West Canoe*[online]. 2018[cit. 2018-05-1]. Dostupné z: <http://www.northwestcanoe.com/bmc-strip.html>

[43] PECHAR. Západní červený Cedr. *Pechar.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.pechar.cz/zapadni-cervený-cedr>

[44] ČERVENÝ CEDR. PŘEDNOSTI ZÁPADNÍHO ČERVENÉHO CEDRU. *Cervený-cedr.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://cervený-cedr.cz/homepage-0/prednosti/>

[45] WOOD STORE. Exotické řezivo. *Wood store* [online]. 2018 [cit. 2018-05-11]. Ke stažení dostupné z: <http://www.palubky-rezivo.eu/ceniky.htm>

[46] BEAR MOUNTAIN BOATS. Fiberglass Cloth – 60" Wide x 6 oz. (rolled and boxed). *Bear Mountain BOATS* [online]. 2018 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.bearmountainboats.com/collections/canoe-kits-and-building-materials/products/fiberglass-cloth-60>



- [47] Moores, Ted. Strip Planking SPARKS. *Epoxyworks* [online]. 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z : <http://epoxyworks.com/index.php/strip-planking-sparks/>
- [48] MICHNEBOAT. Working With Short Strips. Michneboat [online]. 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.michneboat.com/Working%20With%20Short%20Strips.htm>
- [49] Litomysky. Kompozity obecně. *Litomysky.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.litomysky.cz/mat/c.htm>
- [50] Šedivý, Petr. *Korek jako výplňový materiál v kompozitních sendvičových konstrukcích* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2018-05-11]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/24543>
- [51] Bucňák, Ondřej. *Analýza sendvičových struktur metodou konečných prvků* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-05-10]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/33511/BUCNAK\\_BP\\_2014.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/33511/BUCNAK_BP_2014.pdf?sequence=1)
- [52] HAVEL COMPOSITES. Epoxidová pryskyřice LH 210. *Havel composites* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/68-Epoxydy-HAVEL/1449-Epoxydova-pryskyrice-LH-210-extremne-pruzracna-a-bez-toxinu.html?pls=0>
- [53] HAVEL COMPOSITES. Tužidlo H10. *Havel composites* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/69-HAVEL-TU%C5%BDIDLA/1448-Tuzidlo-H-10---extra-cire-a-UV-stabilni-zprac-15-25-min.html?pls=0>
- [54] HAVEL COMPOSITES. Bavlněná vlákna mletá. *Havel composites* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/31-Plniva-do-pryskyric/540-Bavlnena-vlakna-mleta---05-mm.html?pls=0>
- [55] HAVEL COMPOSITES. Skelná tkanina AEROGLOSS 163g/m<sup>2</sup> kepr 2/2. *Havel composites* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/36-Prizove/2507-Skelnatkanina-AEROGLOSS-163gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan-kepr-22---vysokopevnostni-12x12cm.html?pls=0>

[56] HORNBACH. Překližka truhlářská. *hornbach* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://www.hornbach.cz/shop/Preklizka-truhlarska-B-BB-6-x-610-x-1220-mm-borovice/5195961/artikl.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| Obr.                           | obrázek               |
| nm                             | nanometr              |
| GPa                            | gigapascal            |
| kg                             | kilogram              |
| m <sup>3</sup>                 | metr krychlový        |
| %                              | procenta              |
| hm.                            | hmotnost              |
| °C                             | stupně celsia         |
| E                              | Youngův modul         |
| μm                             | mikrometr             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | oxid hlinitý          |
| HS                             | high strength         |
| HM                             | high modulus          |
| x                              | krát                  |
| PET                            | polyethylentereftalát |
| PVC                            | polyvinylchlorid      |
| SAN                            | styrén akrylonitril   |
| PA                             | polyamid              |
| PE                             | polyethylen           |
| PTFE                           | polytetrafluorethylen |
| PES                            | polyester             |
| QISO                           | quasi-isotropic       |
| °                              | úhlový stupeň         |
| cm                             | centimetr             |

km kilometr

m metr

Tab. tabulka

Dyn. dynamické

MOE modulus of elasticity

MOR modulus of rupture

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 1</i> Možné aplikace kompozitních materiálů[29] .....                     | 13 |
| <i>Obr. 2</i> Synergický efekt [30] .....   | 13 |
| <i>Obr. 3.</i> Rozdělení vláknových kompozitů[31] .....                           | 15 |
| <i>Obr. 4</i> Řez vláknovým kompozitem [32] .....                                 | 15 |
| <i>Obr. 5</i> Konstrukce sendviče[7] .....  | 16 |
| <i>Obr. 6</i> Vliv tloušťky jádra na vlastnostech sendvičového materiálu[6] ..... | 17 |
| <i>Obr. 7.</i> Rozdělení částicových kompozitů [31] .....                         | 17 |
| <i>Obr. 8.</i> Druhy tkanin [38].....   | 20 |
| <i>Obr. 9</i> Skelná tkanina[8] .....   | 21 |
| <i>Obr. 10</i> Uhlíkové vlákno[38] .....  | 21 |
| <i>Obr. 11</i> Aramidová tkanina[33] .....  | 22 |
| <i>Obr. 12.</i> Kombinace různých druhů vláken[6] .....                           | 22 |
| <i>Obr. 13.</i> Panel z voštinového jádra[1] .....                                | 23 |
| <i>Obr. 14.</i> PET pěny[1] .....   | 24 |
| <i>Obr. 15.</i> Překližka[1] .....  | 25 |
| <i>Obr. 16</i> Balzové bloky[1] .....   | 25 |
| <i>Obr. 17</i> Korek [50] .....   | 26 |
| <i>Obr. 18</i> Sendvič se syntatickým jádrem [51] .....                           | 26 |
| <i>Obr. 19.</i> Vakuová infuze[21] .....  | 28 |
| <i>Obr. 20</i> Ruční laminování[21] .....   | 29 |
| <i>Obr. 21.</i> Kompozity v letectví[17] .....                                    | 31 |
| <i>Obr. 22.</i> Větrná turbína[12] .....  | 32 |
| <i>Obr. 23.</i> Hokejka Easton[34] .....  | 32 |
| <i>Obr. 24.</i> Uhlíková punčocha[35] .....                                       | 33 |
| <i>Obr. 25</i> Adirondack pack kanoe[15] .....                                    | 33 |
| <i>Obr. 26.</i> Plátování trupu kanoe[36] .....                                   | 35 |
| <i>Obr. 27.</i> Laminace trupu[22] .....  | 35 |
| <i>Obr. 28.</i> Rozložení sil na kánoi a pádlu[24].....                           | 39 |
| <i>Obr. 29.</i> Namáhání – podélný ohyb směrem nahoru[25] .....                   | 40 |
| <i>Obr. 30</i> Porovnání výztuží [37] .....                                       | 41 |
| <i>Obr. 31.</i> Namáhání – podélný ohyb směrem dolů [25] .....                    | 41 |
| <i>Obr. 32.</i> Namáhání – deformace na příčných sekcích lodi [25] .....          | 42 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 33. Namáhání na krut[25]</i> .....                                 | 42 |
| <i>Obr. 34. Namáhání v důsledku změn tlaku vody [25]</i> .....             | 43 |
| <i>Obr. 35. Namáhání tlakem vody[25]</i> .....                             | 43 |
| <i>Obr. 36. Lokální zatížení[25]</i> .....                                 | 44 |
| <i>Obr. 37. Cedrová fasádní palubka</i> .....                              | 47 |
| <i>Obr. 38. Použitá skelná tkanina keprové vazby</i> .....                 | 49 |
| <i>Obr. 39. Epoxidová pryskyřice LH 210</i> .....                          | 50 |
| <i>Obr. 40. Tužidlo H 10</i> .....   | 50 |
| <i>Obr. 41. Bavlněná mletá vlákna</i> .....                                | 51 |
| <i>Obr. 42. Borovicový překližkový panel</i> .....                         | 52 |
| <i>Obr. 43. Úprava tloušťky palubky</i> .....                              | 53 |
| <i>Obr. 44. Výroba cedrových latí</i> .....                                | 54 |
| <i>Obr. 45. Řezání překližkových latí</i> .....                            | 54 |
| <i>Obr. 46. Pomocná žebra originální kanadské kánoe [36]</i> .....         | 55 |
| <i>Obr. 47. Výroba žebrového bednění</i> .....                             | 56 |
| <i>Obr. 48. Vyrobené žebrové bednění</i> .....                             | 56 |
| <i>Obr. 49. Výroba speciálního úhломěru</i> .....                          | 57 |
| <i>Obr. 50. Speciální úhломěr</i> .....                                    | 58 |
| <i>Obr. 51. Zarovnání rysek</i> .....                                      | 58 |
| <i>Obr. 52. Seříznutí překližkové latě</i> .....                           | 59 |
| <i>Obr. 53. Detail provedeného řezu</i> .....                              | 59 |
| <i>Obr. 54. Seříznutá překližková lať podle navrhnutého schématu</i> ..... | 59 |
| <i>Obr. 55. Směs epoxidové pryskyřice a tužidla</i> .....                  | 60 |
| <i>Obr. 56. Zahuštění epoxidové směsi</i> .....                            | 60 |
| <i>Obr. 57. Vzniklé lepidlo</i> .....                                      | 61 |
| <i>Obr. 58. Nanášení tekuté epoxidové pryskyřice</i> .....                 | 61 |
| <i>Obr. 59. Nanášení zahuštěné epoxidové</i> .....                         | 62 |
| <i>Obr. 60. Spojení obou lepených ploch</i> .....                          | 62 |
| <i>Obr. 61. Utažení překližkového spoje</i> .....                          | 63 |
| <i>Obr. 62. Srovnání spojované překližkové latě</i> .....                  | 63 |
| <i>Obr. 63. Zarovnání první cedrové latě</i> .....                         | 64 |
| <i>Obr. 64. Nanášení zahuštěné pryskyřice na lať</i> .....                 | 64 |
| <i>Obr. 65. Přitisknuté cedrové latě</i> .....                             | 65 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 66. Stažení cedrových latí svěrkami</i> .....   | 65 |
| <i>Obr. 67. Lepení latí z opačného konce</i> .....  | 66 |
| <i>Obr. 68. Cedrová deska</i> .....   | 66 |
| <i>Obr. 69. Odstranění hřebíků pomocí kleští</i> .....  | 66 |
| <i>Obr. 70. Broušení cedrové desky pomocí pásové brusky</i> .....                             | 67 |
| <i>Obr. 71. Úprava tkaniny před laminací</i> .....  | 68 |
| <i>Obr. 72. Laminace cedrové desky</i> .....  | 68 |
| <i>Obr. 73. Vyrobená cedrová deska</i> .....  | 68 |
| <i>Obr. 74- Stažení překližkových latí pomocí truhlářských svěrek</i> .....                   | 69 |
| <i>Obr. 75. Broušení překližkové desky pásovou bruskou</i> .....                              | 69 |
| <i>Obr. 76. Laminace překližkové desky</i> .....  | 70 |
| <i>Obr. 77. Hotová překližková deska z celkovými dvěma vrstvami výztuže</i> .....             | 70 |
| <i>Obr. 78. Stažení překližkových latí pomocí truhlářských svěrek desky 2</i> .....           | 71 |
| <i>Obr. 79. Hotová překližková deska s celkovými čtyřmi vrstvy výztuže</i> .....              | 71 |
| <i>Obr. 80. Vzorky řezané z originálního materiálového složení</i> .....                      | 72 |
| <i>Obr. 81. Jednotlivé vzorky řezané z navrhnuté materiálové skladby</i> .....                | 72 |
| <i>Obr. 82. Rozměry zatěžovaného vzorku</i> .....   | 75 |
| <i>Obr. 83. Univerzální zkušební stroj zwick 1456</i> .....                                   | 76 |
| <i>Obr. 84. Lokální porušení vzorku bez smykového poškození (vzorek f)</i> .....              | 78 |
| <i>Obr. 85. Mírné smykové poškození vzorku f</i> .....  | 78 |
| <i>Obr. 86. Lokální poškození jádra s mírnou smykovou deformací</i> .....                     | 79 |
| <i>Obr. 87. Lokální deformace vzorku c1</i> .....   | 80 |
| <i>Obr. 88. Smykové a normálové poškození vzorku a1</i> .....                                 | 80 |
| <i>Obr. 89. Šíření trhliny mimo rovinu spoje (vzorek b1)</i> .....                            | 80 |
| <i>Obr. 90. Jediné porušení v rovině spoje u vzorku d1</i> .....                              | 80 |
| <i>Obr. 91. Nejčastěji vyskytující se porucha (lokální poškození bez poruchy spoje)</i> ..... | 81 |
| <i>Obr. 92. Porušení v rovině spoje (vzorek b2)</i> .....                                     | 81 |
| <i>Obr. 93. Porušení v rovině spoje (vzorek d2)</i> .....                                     | 81 |
| <i>Obr. 94. Průměrné naměřené hodnoty modulů pružnosti všech měřených vzorků</i> .....        | 83 |
| <i>Obr. 95. Rozptyl hodnot vzorku b2</i> .....  | 84 |
| <i>Obr. 96. Průměrné naměřené hodnoty mezí pevnosti všech měřených vzorků</i> .....           | 85 |
| <i>Obr. 97. Průměrné naměřené hodnoty deformační práce všech měřených vzorků</i> .....        | 86 |
| <i>Obr. 98. Padostroj Zwick Roell HIT230F</i> .....   | 87 |

---

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 99. Porucha referenčního vzorku j .....</i>  | 89 |
| <i>Obr. 100. Porucha vzorku h1 .....</i>   | 89 |
| <i>Obr. 101. Průměrné naměřené hodnoty maximální síly všech měřených vzorků .....</i>        | 90 |
| <i>Obr. 102. Průměrné naměřené hodnoty energie při proražení všech měřených vzorků .....</i> | 91 |
| <i>Obr. 103. Průměrné naměřené hodnoty konečné energie všech měřených vzorků .....</i>       | 92 |



**SEZNAM TABULEK**

|   |    |
|---|----|
| <i>Tab. 1. Účinek pádlových sil na posun a otáčení kánoe[24]</i> .....      | 38 |
| <i>Tab. 2. Účinek statické a dynamické síly působící na kánoi[24]</i> ..... | 38 |
| <i>Tab. 3. Působící síly na kánoi a pádlo[24]</i> .....                     | 39 |
| <i>Tab. 4. Mechanické vlastnosti vybraných vláken[37]</i> .....             | 40 |
| <i>Tab. 5. Mechanické vlastnosti cedru</i> .....                            | 48 |
| <i>Tab. 6. Vlastnosti použité skelné tkaniny</i> .....                      | 48 |
| <i>Tab. 7. Technické parametry použité epoxidové pryskyřice</i> .....       | 49 |
| <i>Tab. 8. Mechanické a fyzikální vlastnosti vláken</i> .....               | 51 |
| <i>Tab. 9. Vlastnosti 4-8 mm borovicových překližek</i> .....               | 52 |
| <i>Tab. 10. Značení navrhnutých vzorků</i> .....                            | 72 |
| <i>Tab. 11. Značení referenčních vzorků</i> .....                           | 73 |
| <i>Tab. 12. Vzorky pro padovou zkoušku</i> .....                            | 73 |
| <i>Tab. 13. Technické parametry zkušebního stroje ZWICK [6]</i> .....       | 75 |
| <i>Tab. 14. Modul pružnosti v ohybu testovaných vzorků v [Mpa]</i> .....    | 76 |
| <i>Tab. 15. Mez pevnosti v ohybu testovaných vzorků v [Mpa]</i> .....       | 77 |
| <i>Tab. 16. Deformační práce ohybu testovaných vzorků v [Nmm]</i> .....     | 77 |
| <i>Tab. 17. Maximální síla testovaných vzorků v [N]</i> .....               | 88 |
| <i>Tab. 18. Energie při proražení testovaných vzorků v [J]</i> .....        | 88 |
| <i>Tab. 19. Konečná energie testovaných vzorků v [J]</i> .....              | 88 |

## SEZNAM PŘÍLOH

Seznam příloh této bakalářské práce tvoří dva druhy technických listů. Jedním druhem jsou technické listy originálních materiálů používaných pro stavbu kanadské kánoe (přílohy PI až PIV) a druhým druhem jsou technické listy adekvátně nahrazených materiálů (kromě překližky). Tyto technické listy, které jsou uloženy na CD-ROM byly nedílnou součástí bakalářské práce.

|               |  |
|---------------|--|
| PŘÍLOHA P I   | Technický list cedru   |
| PŘÍLOHA P II  | Technický list skelné tkaniny 163 g /m <sup>2</sup> AEROGLOSS kepr 2/2 |
| PŘÍLOHA P III | Technický list epoxidové pryskyřice 105/207                            |
| PŘÍLOHA P IV  | Technický list plniva 403 Microfibers                                  |
| PŘÍLOHA P V   | Technický list epoxidové pryskyřice LH 210/H10                         |
| PŘÍLOHA P VI  | Technický list bavlněných mletých vláken – 0,5 mm                      |
| PŘÍLOHA P VII | Technický list truhlářské borovicové překližky                         |