

# Návrh materiálů pro longboard

Tu Nguyen Huu

---

Bakalářská práce  
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tu Nguyen Huu**  
Osobní číslo: **T17781**  
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**  
Forma studia: **Kombinovaná**  
Téma práce: **Návrh materiálů pro longboard**

### Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši se zaměřením na materiály vhodné pro návrh laminátového loangboardu z polymerního kompozitu.
2. Pomocí materiálové databáze CES EduPack navrhnete a optimalizujete polymerní kompozitní materiály vhodné pro návrh loangboardu se zaměřením na mechanické vlastnosti a toxicitu.
3. Při optimalizaci se zaměřte na ohybovou tuhost, průhyb a cenu.
4. Literatura

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

**Seznam doporučené literatury:**

1. Ehrenstein Gottfried W.: Polymerní kompozitní materiály. 1.vyd. V ČR, ISBN: 978-80-86960-29-6, 2009.
2. ŠUBA, Oldřich: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, skripta.
3. Michael F. Ashby: Materials Selection in Mechanical Design 5th Edition, Butterworth-Heinemann, 2017, ISBN-10: 0081005997, ISBN-13: 978-0081005996, <http://www.elsevier.com>

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jarmila Vilčáková, Ph.D.**  
Centrum polymerních materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

**doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.**  
ředitel ústavu

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- Pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vhodným výběrem materiálů pro návrh longboardu jako sendvičového prvku. V teoretické části jsou shrnuty základní informace o kompozitních materiálech, typech vláken (geometrii), jejich modifikace, chování na rozhraní vlákno-matrice, typech sendvičových jader, selhání sendvičových prvků a také o zpracovatelské technologii. Je zde také vysvětlen obecný princip výběru materiálu a historie longboardu. Předmětem praktické část bakalářské práce je výběr vhodného materiálu pro sendvičový prvek s využitím softwaru CES EduPack (Granta, Univerzita Cambridge, UK). Cílem práce je optimalizovat návrh sendvičového prvku s ohledem na ohybovou tuhost, průhyb a cenu longboardu.

Klíčová slova: longboard, sendvičový prvek, kompozitní materiál, průhyb, tuhost

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the suitable selection of materials for the design of a longboard as a sandwich element. The theoretical part summarizes basic information about composite materials, types of fibres (geometry), their modifications, behaviour at the fiber-matrix interface, types of sandwich cores, failures of sandwich elements and also about processing technology. The subject of the practical part of the bachelor thesis is the selection of a suitable material for a sandwich element using CES EduPack software (Grant, University of Cambridge, UK). The aim of the work is to optimize the design of a sandwich element with regard to bending stiffness, deflection and the price of a longboard.

Keywords: longboard, sandwich element, composite material, deflection, stiffness

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Jarmile Vilčákové, Ph.D. za její čas, odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytovala při realizaci této práce.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁL</b> .....	<b>10</b>
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	11
1.2 KOMPOZITY S POLYMERNÍ MATRICI.....	12
1.2.1 REAKTOPLASTICKÉ PRYSKYŘICE .....	13
1.2.2 TERMOPLASTY.....	17
1.2.3 PŘÍSAKY DO MATRIC.....	19
1.2.4 ROZHRANÍ VLÁKNO - MATRICE.....	24
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITU DLE TVARU.....	26
1.3.1 KONSTRUKČNÍ PRVKY SENDVIČOVÉHO PANELU .....	28
1.3.2 TECHNOLOGICKÉ PROCESY.....	33
1.3.3 MOŽNÉ SELHANÍ SENDVIČOVÉHO PANELU .....	35
1.3.4 VLOŽKY SENDVIČOVÉHO PANELU.....	38
<b>2 NÁVRH A VOLBA MATERIÁLU PRO LONGBOARD</b> .....	<b>39</b>
2.1 VOLBA MATERIÁLU .....	39
2.2 DIGITÁLNÍ KNIHOVNY MATERIÁLU A JEJICH ÚLOHY V MATERIÁLOVÉM INŽENÝRSTVÍ .....	40
2.3 LONGBOARD .....	41
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>43</b>
<b>3 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>44</b>
<b>4 VOLBA MATERIÁLU</b> .....	<b>45</b>
4.1 LONGBOARD (DESKA) .....	45
4.2 VÝPOČET.....	55
4.2.1 SÍLA POTŘEBNÁ K PŘERUŠENÍ.....	55
4.2.2 VÝPOČET PRŮHYBU .....	56
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>60</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>61</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>63</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>64</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>65</b>

## ÚVOD

Kompozitní materiály obecně vykazují lepší mechanické vlastnosti než klasické materiály z kovu, keramiky či plastu. Mají však vyšší nároky na znalost jednotlivých složek kompozitních materiálů. Vývoj jednotlivých produktů z kompozitních materiálů klade vyšší nároky na technologické postupy jejich výroby. Použitím kompozitních materiálů s mechanickými vlastnosti nedosažitelnými klasickými materiály může být však zásadní konkurenční výhodou.

Nárůst výkonu počítačové techniky a vývojem simulačních software dává konstruktérům v ruce nástroj, jak mít představu o chování vyvíjeného produktu na bázi kompozitního materiálu. Digitální databáze materiálů poskytuje konstruktérům možnost rychlého a přehledného porovnání charakteristik materiálů a usnadňuje tak proces výběru.

Aplikace kompozitních materiálů se osvědčila v různých průmyslových oborech, neboť nabízí dobré mechanické vlastnosti vhodné i pro sportovní aplikace, přes tenisové rakety i jako prkno pro snowboard a surfboard.

Longboard vyrobený ze syntetických např. kompozitních materiálů není příliš rozšířený na trhu, což může být způsobeno vysokou cenou. Mezi i jiné nepříznivé vlastnosti patří např. i dynamické, což může být důvodem proč výrobci upřednostňují přírodní materiály. Na tuto otázku se pokusím najít nalézt odpověď v praktické části mé bakalářské práce.



# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁL

Obecně je kompozitní materiál definován jako materiál skládající se z dvou nebo více komponent nebo fází, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Za určité kombinace těchto komponent, lze dosáhnout synergického účinku k dosažení lepších materiálových vlastností. Kompozit se skládá z vláknové výztuže a plastického pojiva zvané matrice. Samotné komponenty vlákna nebo pojiva mají odlišné specifické vlastnosti oproti kompozitu. Nízká hustota, dobrá zpracovatelnost a stabilita proti vlivu prostředí a chemikálií je u pojiva znevýhodněn nízkou hodnotou modulu pružnosti, nízkou pevností, křehkostí a malou creepovou odolností. Naproti tomu vlákna mají požadovanou tuhost a pevnost, ale jinak jsou křehká a náchylná k poškození v některých agresivních prostředích. Obtíže působí tlakové složky napětí, vlákna se dají obtížně nanést v požadovaném prostorovém uspořádání. V případě, že vyrobíme kompozitní materiál ve vhodném umístění - skleněná, uhlíková nebo organická vlákna v pojivu, dále obecně nazývaným pojivem nebo matricí, získáme tím materiál s vlastnostmi, které jsou u jednotlivých komponent nedosažitelné [3].

Nejčastější kombinace kompozitu jsou kombinace kov-kov, kov-keramika, kov-polymer, keramika-polymer, keramika-keramika nebo polymer-polymer. Mezi polymerní matrice patří kopolymery (A), směsí polymeru (B). Polymerní kompozit vyztužený vlákny (C) a nebo přísadou (D) [5].

### Kombinace polymer (A) - polymer(B) [5]:

#### A. Kopolymery

-A-A-A-B-B-B-A-A-A-B-B-B

#### B. Polymerní směsi

A-A-A-A-A  
-B-B-B-B-B

#### C. Kompozity

F-A-A-A  
C-A-A-A

F - Vlákna

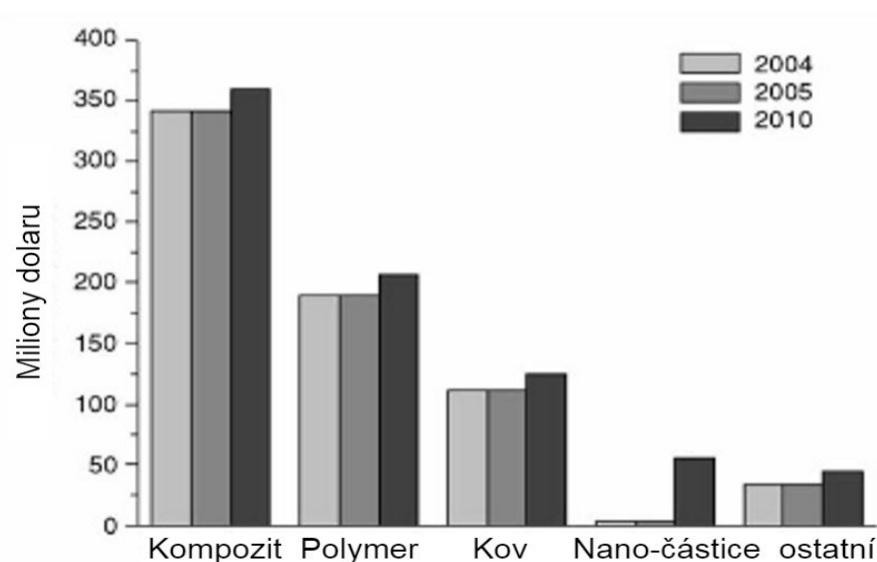
C - Vytvrzovací činidlo

D-B-B-B  
-B-B-B

D - Přísady

## Kompozitní materiály ve sportovním odvětví

Objem kompozitních materiálů ve sportovním odvětví každoročně roste, níže lze vidět objem prodeje sportovního vybavení z různých materiálů v amerických dolarech v letech 2004, 2005, 2010.



Obrázek 1. Porovnání objemu materiálů prodeje v USA [25].

### 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Dle typu matice se kompozitní materiál dělí na:

- A) Kompozity s kovovou matricí.
- B) Kompozity s keramickou matricí.
- C) Kompozity s uhlíkovou matricí.
- D) Kompozity s polymerní matricí se dělí na matrici s reaktoplasty nebo s termoplasty.

**Matrice ovlivňuje v kompozitu tyto vlastnosti:**

- Elastický moduly
- Mez kluzu a mez pevnosti v tahu
- Křehkost
- Odolnost proti lomu [5]

## **Kompozity s polymerním matricí**

Nejužívanějším materiálem pro přípravu kompozitů jsou polymery. Obecné nepříznivé mechanické vlastnosti samotné polymery vylučuje jejich použití v některých aplikacích z důvodů menší pevnosti a tuhosti v porovnání s kovem a keramikou. Použití kompozitních materiálu obsahující plniva v polymerní matrici vykazuje lepší mechanické vlastnosti. Jedním z důležitých parametrů v procesu výroby jsou energetické nároky, kompozity s polymerní matricí, vyžadují mnohem menší tlak i tepelné zdroje, které se odráží ve výsledné ceně [6].

### **Obecné role matrice v kompozitech**

Matrice udržuje vlákna pohromadě v požadovaném směru napětí. Napětí je přenášeno od kompozitu ke vláknem přes matrici. Synergické účinky vlákna a matrice proti namáhání v tlaku, v ohybu nebo vůči smykovým silám jsou závislé hlavně na adhezi fáze matrice-vlákno. Dobrou adhezi kompozitu na fázovém rozhraní matrice-vlákno vyžaduje výběr takové matrice, která poskytuje vhodné viskozity, povrchové napětí pro vlákna. Dalším úkolem matrice je izolace vlákna od sebe, tím se zajistí vlastnost vláknité struktury, zvýšení houževnatosti a zabrání se šíření trhliny při poruše kompozitu. Matrice poskytuje vláknům ochranu před působením vnějších vlivů prostředí, vnik vody, působení chemikálií [2, 5].

### **Přehled úlohy matrici v kompozitech**

1. Zaručení stálého geometrického tvaru.
2. Převedení namáhání z vlákna na vlákno.
3. Ochrana vlákna před vlivy okolí [6].

## **1.2 Kompozity s polymerní matricí**

Polymerní matrice může být buď reaktoplastická nebo termoplastická. Hlavní charakteristika jejich chování je daná visko-elastickou reakcí. Viskoelastické chování polymerních kompozitů v případě lineární visko-elasticity popisuje Volterra rovnice a v případě nelineární visko-elasticity popisuje model založený na Scharperovy rovnici [9]. Přednost reaktivních pryskyřic oproti termoplastům je jejich nižší viskozita při teplotě zpracování a to až o 3 řády, proto se reaktoplasty snadněji zpracovávají, snadněji se smáčejí a lépe prosycují. Zpracovatelské teploty termoplastu jsou vysoké ve srovnání s reaktoplasty,

navíc jsou omezeny teplotou rozkladu, vyšší zpracovatelské teploty znamenají také vyšší energetické nároky [2]. Zpracovatelské technologie pro termoplastické polymery typicky umožňují prosycovat kratší vlákna do 3 mm ve vstřikovacím stroji, delší vlákna se volí při prosycení v reaktoplastické nízko viskózní pryskyřici [7].

Reaktoplastické pryskyřice vyžadují přísady ve formě katalyzátoru a urychlovačů, dosahují vysokého E-modulu a díky trojrozměrnému tvaru zesíťování dosahují vysokých hodnot pevnosti. Kromě vyššího E-modulu mají reaktoplastické pryskyřice obecně lepší creepovou odolnost ve srovnání s termoplasty, obvykle snesou vyšší provozní teplotu a mají větší odolnost proti chemickým vlivům. Přednost termoplastické pryskyřice činí její houževnatost, opakem je velmi malá houževnatost u reaktoplastických pryskyřic, řešením je přidání modifikačních přísad, které rovněž může zvýšit hodnoty tažnosti, která se jinak u reaktoplastů pohybuje v pouhých procentech [2, 8].

V průběhu zpracování na termoplastické pryskyřice působí teplotně fyzikální procesy, snáze se udržuje jakost výrobku a nedochází k ohrožení životního prostředí chemickým procesem [2].

### 1.2.1 Reaktoplastické pryskyřice

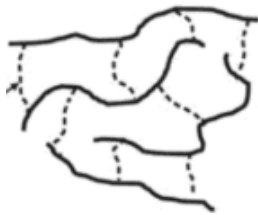
Prvotním materiálem pro výrobu reaktoplastických pryskyřic bývají nízko viskózní nízkomolekulární organické polymery v kapalné formě. V kapalném stavu mají polymerní prekurzory krátkou délku řetězce, mezi nimi nejsou chemické vazby. Působením katalyzátorů a jiných reaktivních molekul proběhne proces vytvrzování, po kterém polymerní prekurzory přecházejí z lineárního viskózního stavu do trojrozměrných sítí chemických vazeb [7].



Obrázek 2. Polymerní prekurzory.



Obrázek 3. Volné molekuly.



Obrázek 4. Zesíťované polymery.

**Nejdůležitější reaktoplastické pryskyřice :**

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)
- Vinyl esterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice (EP-R)
- Fenolické pryskyřice
- Metakrylátové pryskyřice (MA-R)
- Izokyanátové pryskyřice

**Typy polymerace reaktoplastu**

- A) Kondenzační - chemická reakce probíhá za vzniku vedlejších produktu jako je voda, methanol, HCN, kyselina octová
- B) Adiční - vznik stabilní reaktoplasty bez vedlejších produktu reakce [5].

**Specifické vlastnosti vytvrzování reaktoplastických pryskyřic:****Exotermní reakce**

Proces vytvrzování reaktoplastických pryskyřic je časově a teplotně závislý, při vytvrzování dochází k tvorbě chemických vazeb mezi molekulami výchozích materiálů formou exotermní reakce (vývinu tepla). Na začátku reakce vytvrzování dochází ke zvýšení teploty do doby, kdy se nezačíná vlastní polymerace, pak teplota roste velmi pomalu. Nárůst počtu molekul vstupující do reakce způsobí prudký nárůst teploty nad teplotu vytvrzování, následuje maximum teploty. S ubývajícím počtem molekul v reakci je vytvrzovací reakce

ukončená, reakčního tepla ubývá. V případě, že zůstávají nezreagované vazby, je potřeba k úplnému vytvrzování dodat energie ve formě zahřátí [2, 7].

### **Viskozita**

Existují dva možné průběhy závislosti viskozity na čase podle toho zda vytvrzování probíhá izotermní nebo neizotermní reakcí. Při izotermní reakci stoupá teplota exponenciálně, pokud není reakční teplo dostatečně rychle odváděno, vliv zahřátí na zvýšení viskozity předčí vliv zesíťování. Průmyslově lze tuto vlastnost využít při technologii ručního kladení, při míchání je možnost nechat uniknout vzduchové bubliny a snadnější prosycování pojiv. Měření izotermní reakce průběhu viskozity je u epoxidové pryskyřice popsáno v normě ASTM D 2471 (ČSN EN ISO 2535) [2].

### **Bod a doba želatinace (gelace)**

Boda želatinace je definována jako doba, kdy se vytvrzením kapalná pryskyřice přechází do stavu, při kterém vznikají první molekuly s nekonečně vysokou molekulární hmotností. Překročením bodu želatinace již není možné kvůli konzistenci materiálu dále zpracovat jako tekutou hmotu, nelze již pryskyřici rozpouštět v rozpouštědlech.

Doba želatinace je v praxi čas, kdy dochází k bodu gelace, je to mezní čas, kdy je možné provádět míchání pryskyřic ve formě. Před dosažením limitní doby musí být síť kompletní. Pro technické kontroly, kdy byla dosažena doba želatinace se určuje čas, kdy již nelze vytáhnout kontrolní tyčinku z reagující pryskyřice [2, 7]

### **TTTdiagram (Time-Temperature-Transition)**

Stupeň vytvrzení charakterizuje dígram závislosti času na teplotě, ukazuje přehledně při jaké teplotě a čase probíhá daný stupeň vytvrzení.

### **Stupeň vytvrzování**

Pryskyřice je vytvrzena pokud zreagují všechny reaktivní skupiny, v praxi nelze stav 100 % vytvrzení určit, nikdy se nesejdou všechny potřebné složky k zesíťování.

Neexistuje přímá metoda, jak určit počet a rozdělení míst, kde dochází efektivně k zesíťování. Metody jako je DSC zkoumají teplotní toky, z toho lze vyvozovat pouze stupně konverze.

Pro praxi je příhodnější využít údaj o chování materiálu za zvýšené teploty při chemickém či mechanickém namáhání [2].

Existuje několik přístupů ke kvantifikaci stupeň úplného vytvrzení, pracují s údaji jako je nejvyšší teplota skelného přechodu, nejvyšší počtem zesílení, stav ukončení dalších reakcí [2].

#### **Přehled metod ke kvantifikaci stupeň vytvrzení:**

**Metoda DSC** - porovnává tepelný tok mezi vzorkem a referenční látkou, stanoví reakční teplo a entalpii.

**Metoda DMA** - přesnější metoda než DSC, měření vzorků jako funkce teploty nebo frekvence, materiál je materiál deformován vlivem periodické síly nebo posunu.

**Metoda plynové chromatografie (GC)** - Metoda využívá princip rozdělování složek mezi dvě fáze, fází pohyblivou a fází nepohyblivou, rozdělením složek se extrahuje monomer ze vzorku zkoušené hmoty, určeno ke stanovení látek v plynné fázi, vyhovující měření pro typy nenasyčené polyesterové (UP-R) a vinylesterové (VE-R) pryskyřice.

**Metoda založená na zkouškách vodivosti a použití dielektrických senzorů** - Molekuly vody ve vzorcích.

Ke stavování stupně vytvrzení můžeme použít metodu porovnání mechanické hodnoty měřeného vzorku se známými hodnotami vzorku  $E_{100\%}$  s úplným vytvrzením, dostaneme normovaný E-modul ( $E_{norm}$ ) [2].

$$E_{norm} = \frac{E_{vzorku}}{E_{100\%}}$$

**Úplné vytvrzení**  $E_{100\%}$  lze pokládat za stav, kdy sledované hodnoty pomocí DSC nebo měření teploty skelného přechodu  $T_g$  zůstává neměnné i po dalším dodání energie do systému pro dotvrzení a to ani při nejvyšší teplotě typické pro dané pryskyřice [2].

Tvrdoost povrchu roste s hustotou zesílení v pryskyřici, v návaznosti na hustotu zesílení, lze vyvodit lokální stupeň vytvrzení, v praxi se používá zkouška tvrdosti podle Barcoly [2].



Další mechanická metoda pro určení stupně vytvrzení je zkouška namáhání ohybem na 3 bodech v časovém úseku 24h, měří se po 1h hodnoty průhybu vzorku, ze smykových napětí lze stanovit vlastnosti pojiva a stupeň vytvrzení.

### 1.2.2 Termoplasty

Termoplasty jako matrice se vyznačují nízkými výrobní náklady, vzhledem k faktorům jako je rychlý výrobní cyklus, snadná kontrola kvality, stabilita materiálu před procesem výroby [5].

Termoplasty mají vysoké molekulární hmotnosti, lineární nebo slabě rozvětvené struktury. Většina pryskyřic pro kompozitní aplikace je syntetizovaná kondenzací. Termoplasty mají vysoký nárok na čistotu během výrobního procesu, je dál potřeba zajistit, aby probíhala bez vedlejších reakcí a v přesném stechiometrickém poměru [5].

V technologickém procesu se používají technologie typu lisování a vstřikování. Vlastnosti, které je třeba sledovat jsou stupně krystalizace, krystalické struktury a jejich orientace [5].

Termoplasty jsou dodány pro průmyslové použití ve formě granulátů. V násypce se promíchají krátká vlákna od délce od 1-3 mm a polymerní granule, následuje plastikace v plastikáční jednotce. Během vstřikovacího procesu se vlákna navážou v plastické tavenině. Viskozita taveniny je nejdůležitější vlastnost při procesech vytlačování a vstřikování, ovlivní jak snadno vlákna prostoupí taveninou.

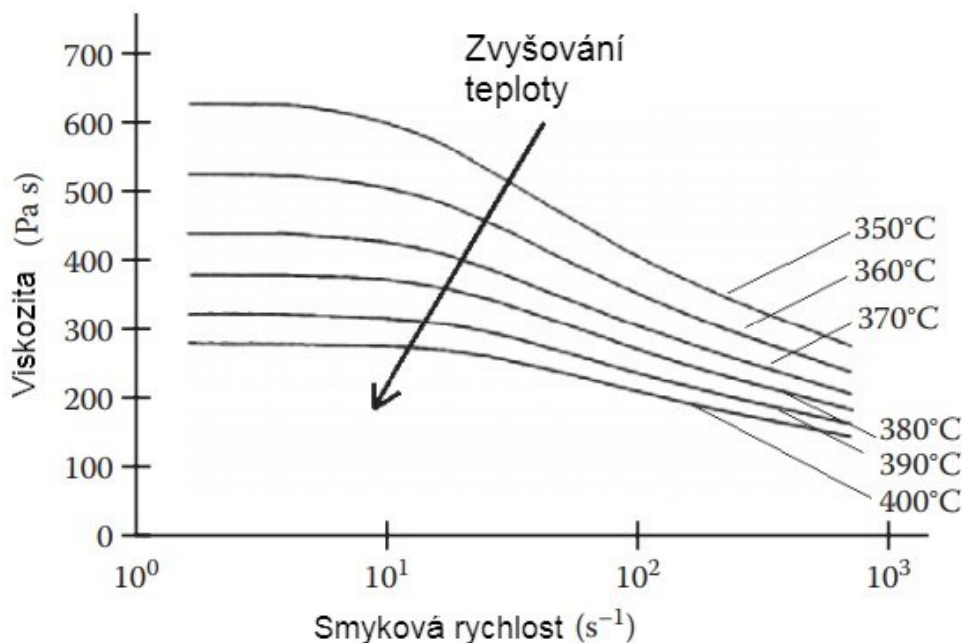
Polymerní matrice s kontinuální vlákny je těžší produkovat, z důvodu obtíženého navázání vlákna na vysoce viskózní termoplastickou taveninu [7].

#### **Nejdůležitější termoplasty jako matrice:**

- Polyeterketon (PEEK)
- Polyfenylsulfid (PPS)
- Polybenzimidazol (PBI)
- Polyeterimid (PEI)
- Polyamidimid (PAI)
- Polypropylen (PP)
- Polyamid-6 (PA-6)

### Viskozita termoplastu

Termoplast se při nízké smykové rychlosti chová jako newtonská kapalina, při nízké smykové rychlosti deformace se jeví jako by měl konstantní viskozitu. Viskozita klesá, když začne stoupat rychlost smykové deformace a přestává se chovat jako newtonská kapalina. Při velmi vysoké rychlosti smykové deformace se polymer začne chovat jako newtonská kapalina [7].



Obrázek 5. Závislost viskozity termoplastu na smykové rychlosti [7].

### Přehled faktorů, který ovlivňují viskozitu termoplastických polymerů.

Viskozita klesá s rostoucí teplotou, smykové rychlosti.

Viskozita roste s rostoucím tlakem, molekulární hmotností a množstvím vláken.

### Metody kontroly defektu

**Ultrazvukem** - Ultrazvuková sonda vysílá frekvenci 1 do 5 MHz a vytváří na mechanickém předmětu kmitání částic, projevuje se jako šíření zvukové vlny.

**Radiologické metody** - metoda využívá gama záření pro kontrolu tenčí vrstvy a pro větší vrstvy záření rentgenové [7].

### 1.2.3 Přísady do matric

Jsou to změkčovadla, antistatika, iniciátory, další typy přísad fungují jako retardéry hoření. Přísady s největší důležitosti jsou plniva, dělí se na výztužné a nevýztužné [7]

#### 1.2.3.1 Typy plniva matric

##### A) Částicové

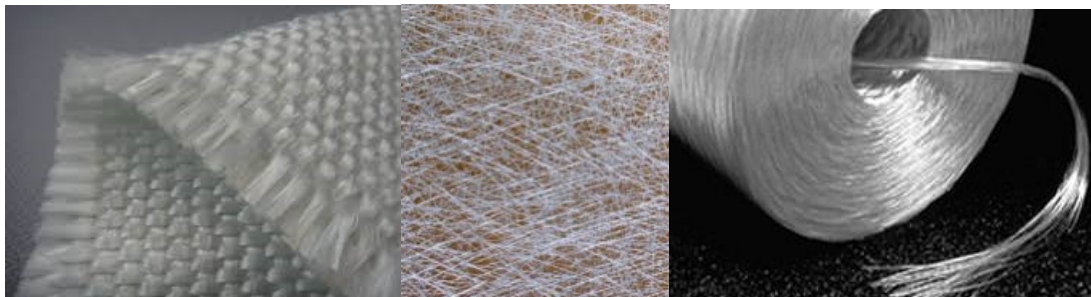
Jsou ve formě částic malých rozměru (kuličky) nebo v podobě prášku. Plniva se přidávají do kompozitu ke snížení cen, k řízení smršťování a to obvykle v kapalně fázi reaktoplastických pryskyřic. U termoplastu se taví společně v plastikáční jednotce. Obecně přidáním plniva dojde k zvýšení viskozity kapalného polymeru [7].

##### B) Vlákenné

Účel vlákna v kompozitech je zvýšit některé mechanické hodnoty takové jako pevnost, tuhost nebo tepelná stabilita. Mechanické vlastnosti vlákna jsou charakterizovány morfologií polymerní matrice jako jsou stupně krystalizace a molekulární orientace, dále fyzické parametry jako jsou průměr a délka vláken. Vlákna jsou rovněž základní stavební strukturou tkaniny [10].

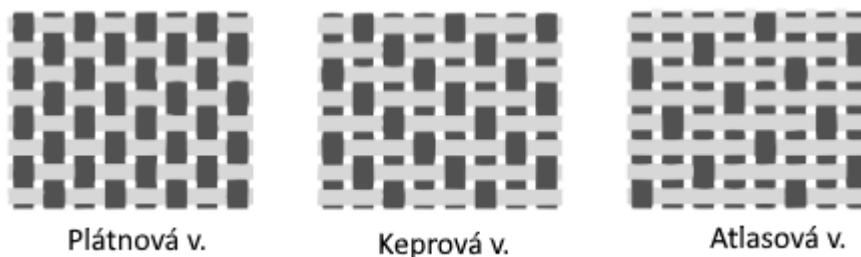
### Tkanina

Vlákna jako samotná stavební jednotka se málo vyskytuje, ve většině případu se ze zpracovatelských důvodů používají vlákna propojené do různé struktury a vazeb, jmenovitě tkanina, rohož a pramenec [7].



Obrázek 6. Tkanina [27] rohož [28] a pramenec [29].

### Typy vazeb tkaniny



Obrázek 7. Vazby tkaniny [30].

#### **Plátnová vazba**

Nejjednodušší typy vazby tkaniny, osnovní vlákna a útkové vlákna jsou v poměru 1:1, rozměrová stálost, čisté řezy bez otřepu, vhodné pro prostorové složité prvky.

#### **Keprová vazba**

Hladší povrch v porovnání s plátnovou vazbou, je to z důvodů menšího vlnění vláken, který má vliv na vyšší pevnost a tuhost.

#### **Atlasová vazba**

Charakteristickým hladkým povrchem a lesklým vzhledem, vhodné pro geometricky složité prvky [2].

### *1.2.3.2 Typy vláken*

#### **Skleněná vlákna**

Vyrábí se tažením z roztavené skloviny, kruhový průřez vlákna, průměr 3,5 až 24  $\mu\text{m}$ .

Primárním výchozím materiálem je oxid křemičitý. Skleněná vlákna se často dodávají ve formě propojené vlákny podle různých vazeb tkanin. Negativem jsou slabá chemická odolnost v silných kyselinách i alkáliích [2, 12].

Existují dva nejčastější typy skleněných vláken, které se používají v kompozitech, E-glass a S-glass. E-glass má nižší cenu a nižší elektrickou vodivost. S-glass má lepší mechanické vlastnosti, proto je používán pro aplikace v leteckém průmyslu [2, 11].

#### **Aramidová vlákna**

Je typ polymerního vlákna, jsou převážně nízko-hustotní, vyznačuje se pevností, dobrými dynamickými vlastnostmi, vystavením UV zářením ztrácí mechanickou pevnost. Mají vysoký stupeň anizotropie, což vede k tomu, že vlákna mají nízké odolnost v příčném namáhání.

Aramidová vlákna vykazují nejpříznivější hodnoty odolnosti vůči deformačnímu zatížení ve směru výztuže.

Jsou dva základní typy aramidové vlákny:

A) m-aramid - neznámější zástupce (obch. značka Nomex ®)

B) para-aramid - komerční produkt Kevlar ® - nejčastější se v kompozitech používá typ Kevlar-49 [11].

### **Uhlíková vlákna**

K výrobě se používají organická viskózní vlákna (umělé hedvábí) a polyakrylnitril s vysokým obsahem uhlíku. Existují dva základní dva typy vláken, uhlíková vlákna a grafitové vlákna, vyrábějí se stejným procesem, pomocí karbonizace (fyzikálně-chemický děj pyrolýzy). Podstatná je teplota pyrolýzy, při nižší teplotě procesu se získají uhlíková vlákna s nižším obsahem uhlíku. Vysokou teplotou pyrolýzy je možné získat grafitové vlákna s 99% obsahem uhlíku. Nad teplotou 1800 °C se odštěpí všechny prvky kromě uhlíku a je dokončená tvorba grafitové struktury [2, 11].

Uhlíková vlákna se vyznačuje extrémní pevností ale s nízkou tažností a velmi vysokou hodnotou elektrické vodivosti.

Hlavní použití je ve armádním, leteckém, automobilovém, spotřebitelském průmyslu a v medicínských aplikacích [7].

### **Přírodní vlákna**

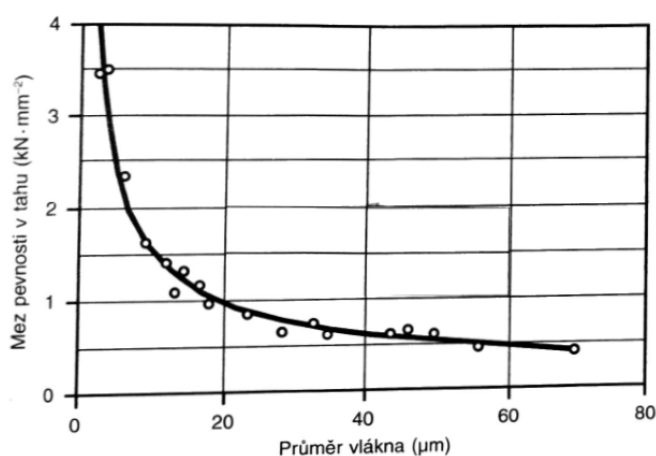
Obecně jsou přírodní vlákna nízko-hustotní a mají horší mechanické vlastnosti než syntetická vlákna.

Vlákna na bázi celulózy, ligninu, kolagenu, hedvábí jsou využívá v širokých aplikacích, kde je nutná možnost recyklace, větší biologický rozklad materiálu. Vzhledem k tomu, že přírodní vlákna jsou hydrofilní a polymerní matrice obecně mají hydrofobní vlastnost, v případě špatné adheze na rozhraní matrice-vlákno vzniká nežádoucí póry [13]. Ceny přírodních vláken jsou velmi nízké, ale mají některé výrazné negativní vlastnosti, které je omezuje v rozsahu použití, např. nasává vlhkost, špatná tepelná stability, citlivost na světlo [14].

### 1.2.3.3 Některé parametry vláken

#### Průměr vláken

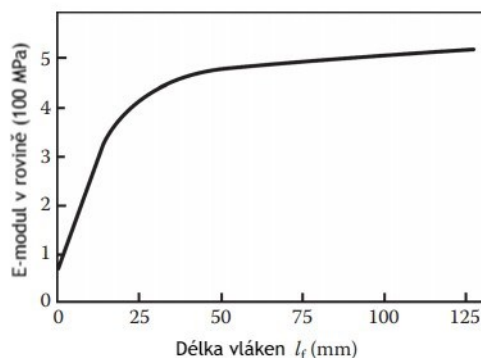
Porovnání pevnosti materiálu v kompaktní formě a ve formě vláken, vychází v prospěchu pro materiály ve formě vláken. Role průřezu vlákna ve vztahu pevnosti skleněného vlákna je zřejmá z Obr.8. Nejčastěji se vlákna vyrábí o průměru 14  $\mu\text{m}$ , není technicky problém vyrobit menší vlákna a získat materiál s větší pevností. Zásadní překážkou je použití vláken o průměru menší než 4  $\mu\text{m}$  u finálního výrobku je možnost ohrožení zdraví. Vlákna o průměru menší než 14  $\mu\text{m}$  se mohou dostat plic a působit jako karcinogenní faktor [2].



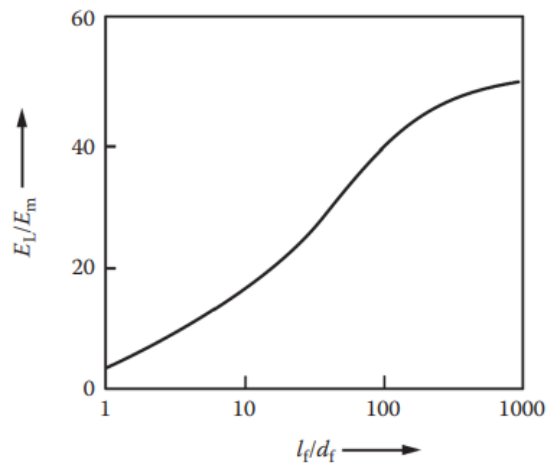
Obrázek 8. Závislost meze pevnosti v tahu na průměru vlákna [7].

#### Délka vláken

Pro krátká vlákna, pevnost nezávisí jen na objemovém podílu vláken, ale taky na délce vláken. Dle Obr. 9 lze pozorovat, že čím je větší délka vláken, tím více roste hodnota E-modulu, ačkoli nad 25 mm E-hodnoty narůstá velmi pozvolna. Dále působí vliv délky a průměru vláken. [7]



Obrázek 9. Závislost E-modulu na délce vlákna [7].



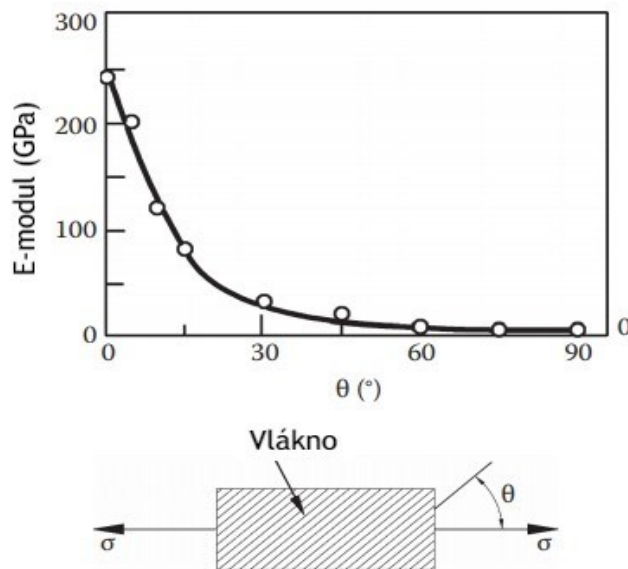
Obrázek 10. Závislost E-modulu na poměru délky a průměru vláken [7].

### Objem vláken

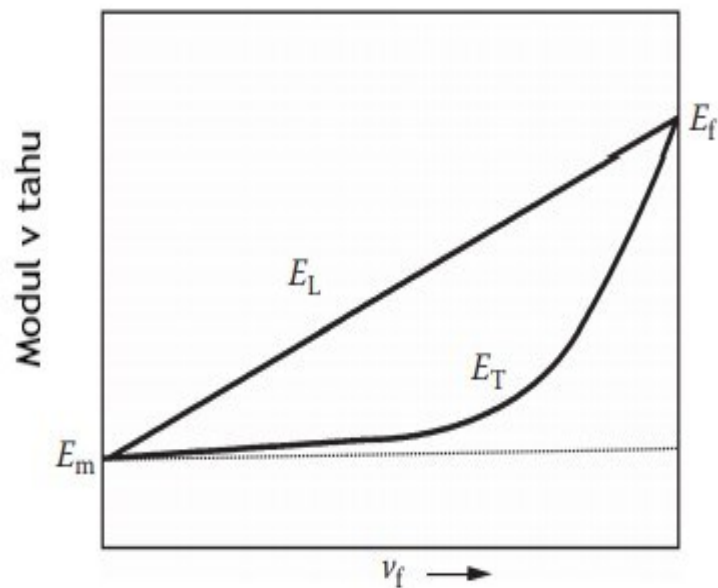
Pro výpočet, který se vztahuje na plochu, napětí, E-modul se používá veličina objemový podíl vláken  $\varphi$  v procentech, vyjadřuje podíl objemu vláken na objem matrice. Objem vláken pro aplikace požadující nejlepší mechanické vlastnosti mívají hodnoty  $\varphi$  mezi 0,5 až 0,65 (tj. 50-65%) [2, 7].

### Orientace vláken a distribuce

Parametry matrice mají větší roli než parametry vláken v případě příčného namáhání. Pokud na vlákno působíme v podélném namáhání, převáží mechanické vlastnosti vláken a homogenita distribuce vláken v matrici.



Obrázek 11. Uhlíková vlákna/epoxidová matrice: Závislost hodnoty E-modulu vláken podle směru zatížení [7].



Obrázek 12. Závislost E-modulu v podélném namáhání ( $E_L$ ) a v příčném namáhání ( $E_T$ ) na objemovém podílu vláken ( $V_f$ ) [7].

### Anizotropie

Se určuje nepřímo jako hodnota pružnosti, tedy poměr mezi E-modul podélně a E-modul napříč. Vysoký modul pružnosti se považuje za větší úroveň anizotropii, izotropní vlastnosti vykazují pouze skelná vlákna [2, 7].

### Další vlastnosti:

V literatuře se uvádí, že schopnost mechanického tlumení je nejvyšší u aramidových kompozitu, chemická odolnost je závislá z většiny na matrici, v případě že, pronikne agresivní medium k vláknu, projevují největší odolnost uhlíková vlákna [2].

#### 1.2.4 Rozhraní vlákno - matrice

Pro vláknové kompozity platí, že zatížení působené na matrice je přenášeno k vláknům přes rozhraní. Pro účinný přenos síly v rozhraní jsou určující silné vazby mezi vlákny a matricí. Pokud aplikace vyžaduje vysoké hodnoty mechanických vlastností je kvalita vazby na rozhraní kritickou oblastí, na kterou je třeba se zaměřit [7].

#### A) Absorpce a smáčivost

Zajistit dostatečnou smáčivost vyžaduje, aby povrchové energie vláken byla vyšší než povrchové energie matrice, neméně důležité je mít nízké hodnoty viskozity polymeru pro zajištění plynulého toku vláken během technologického procesu [15].



### B) Interdifúze

Vyjadřuje míru difuze polymerních molekul do sítě molekul jiného materiálu, tedy jak moc jsou materiály stále rozlišitelné mezi dvěma fázemi. Závisí na konformaci a konstituci molekul, které charakterizují schopnost molekul se pohybovat. Vysoce krystalické polymery mají malou hodnotu interdifúze pod bodem  $T_g$ . Největší pozitivní efekt interdifúze je u porézního plniva [15, 16].



Obrázek 13. Interdifúze [15].

### C) Mechanická vazba

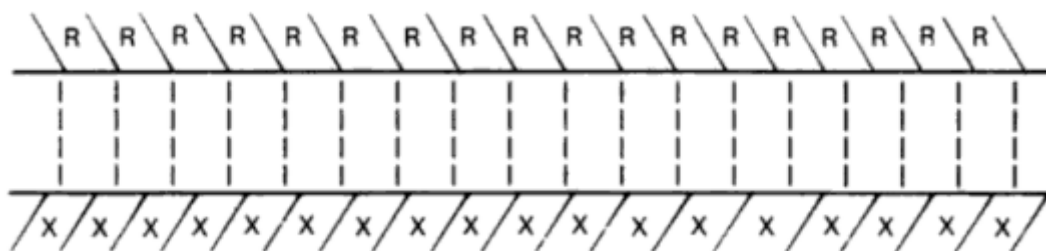
Vznikají během procesu tvorby kompozitu ve fázi chlazení reaktoplastické nebo termoplastické matrice při pokojových teplotách. Geometrický tvar mechanické vazby tvoří zámky mezi rozhraním materiálu, je neúčinnější při působení síly v roviny rozhraní [15, 16].



Obrázek 14. Znázorňuje prorůstání mezi povrchem dvou materiálů [15].

### D) Chemická vazba

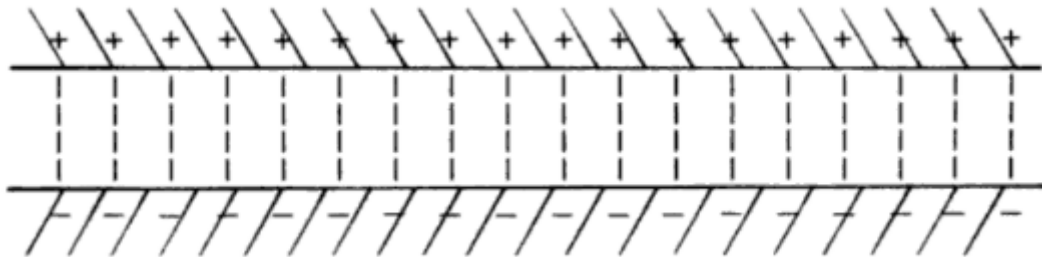
Vazba mezi chemickými skupinami (R, X), kde síla vazby závisí na množství vazeb a typu vazby.



Obrázek 15. R a X představuje chemické skupiny [15].

### E) Elektrostatické

Se vyskytují pokud jsou rozdílné elektrostatické náboje mezi povrchem dvou materiálu. Mezi dvěma náboji vzniká elektrostatická síla, která přitahuje molekuly k sobě, interakce zajišťují iontové a kationtové skupiny na povrchu materiálu. Tyto interakce působí na velmi malé vzdálenosti v atomárním měřítku[15, 16].



Obrázek 16. Elektrostatické vazby [15].

### Modifikace povrchu

Pro zlepšení mechanické a chemické vazby lze využít možnost úpravy povrchu vláken předtím než se použijí v kompozitech, pro skleněná vlákna lze používat skupiny silanů. Je nutno přihlížet ke kompatibilitě chemické skupiny s polymerními matricemi. Pro jiná, uhlíková vlákna lze použít plynné, plasmatické nebo elektrolytické oxidace. Oxidační proces odstraní z uhlíkového vlákna slabší části, tím se minimalizuje přerušování vazby, které jsou vázány na slabší části vláken [7].

## 1.3 Rozdělení kompozitu dle tvaru

**Laminát** - konstrukční prvek kompozitu, základní složky jsou - vlákna a matrice.

### Obecné vlastnosti laminátu

Výhody:

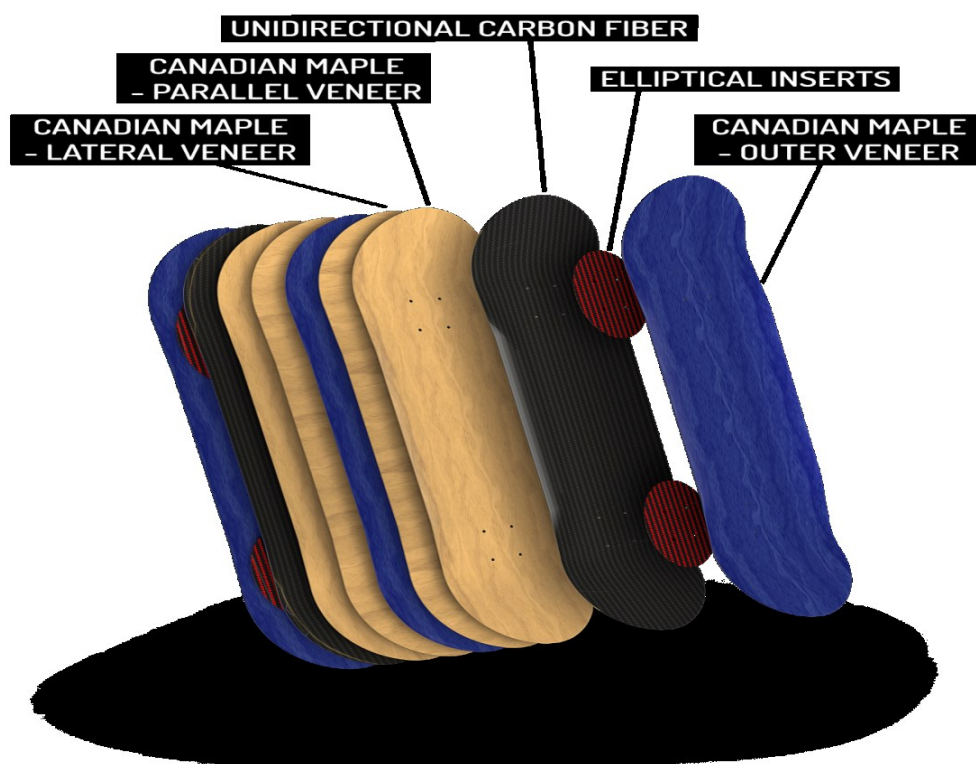
Lamináty mají obecně velkou pružnost při deformaci, s tím souvisí odolnost vůči dynamického namáhání s benefitem vysokého mechanického tlumení. Tvar laminátu je možné široce přizpůsobit designovým požadavkům. Vysoká odolnost proti únavě materiálu. Volba materiálu ze široké základny surovin, příprava materiálu na míru. Možnost přizpůsobit zatížení v tahu orientace vláken při zachování nízké hmotnosti [9].

Nevýhody:

Obtížně stanovení chování materiál, nelze jednoduše sečíst vlastnost jednotlivé části, a odvodit chování jako celek. Laminát má nízké mez pevnosti v tahu k směru orientaci vláken, dále nízká odolnost proti vlhkosti za tepla [9].

### Rozdělení kompozitu dle geometrie

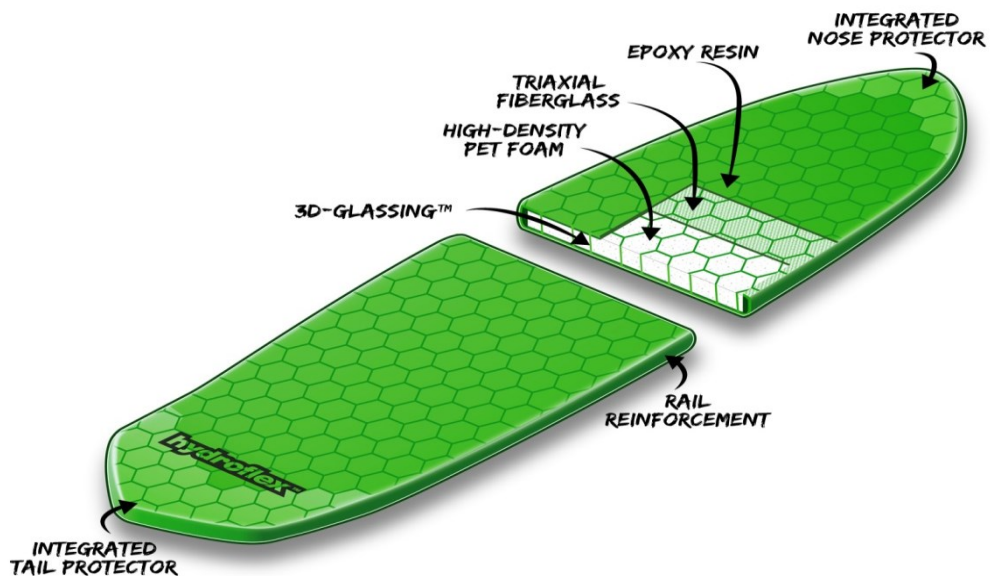
- **Laminátové konstrukce** - kompozit, který se skládá z několika vrstev lamin spojených pojivem.



Obrázek 17. Skateboard s laminatovou konstrukcí ze 7-mi vrstev dřeva a 2-mi vrstvy uhlíkových vláken [31].

Vrstvy laminátu, lze s ohledem na orientaci vlákna poskládat podle směru zatížení. Úhel mezi orientací vlákna a směrem zatížení bývají  $0^\circ$  nebo  $90^\circ$ .  $0^\circ$  lamináty nebo  $0^\circ/90^\circ$  mají jiné elastické vlastnosti v závislost na směru, jinými slovy nejsou izotropní. Typ laminární konstrukce s uspořádání vrstev s  $0^\circ/45^\circ, 45^\circ/90^\circ$  nebo  $0^\circ/60^\circ$  úhly jsou označeny jako kvazi-izotropní, v každém směru v rovině laminátu má stejné elastické vlastnosti. Jinou možností jak zajistit izotropní vlastnosti, je použití náhodně orientovaných vláken jako plniv laminátu [2].

- **Sendvičové konstrukce** - speciální druh vrstveného kompozitu. Povrch kompozitu - potah (face sheet), se skládá ze dvou vnějších vrstev laminátu. Vnitřní mezivrstva se nazývá jádro (core)



Obrázek 18 Skateboard představuje sendvičovou konstrukci s vnitřním jádrem z PET pěny [32].

Sendvičové panely efektivně poskytují vysokou ohybovou tuhost při nízké hmotnosti, vnější vrstva laminátu působí proti ohybovým silám. Vnitřní vrstva zajišťuje pevnost konstrukce proti smykovému napětí. Sendvičové konstrukce přinášejí výrazné zlepšení mechanických vlastností s minimálním navýšením hmotnosti. Literatura uvádí, že při dvojnásobné tloušťce jádra přináší zvýšení pevnosti až 7krát s pouhými 3 procenty navýšení hmotnosti. Je to dosaženo vlivem poměrně velké vzdálenosti mezi vnějšími vrstvami, což zapříčiní, že moment setrvačnosti sendvičového panelu dosahuje velkých hodnot. Poměrně vysoké schopnost mechanického tlumení je daná vlastností jádra sendvičového panelu, plasticita materiálu v jádře umožňuje pohlcení nárazové energie elastickými deformacemi struktury pěny nebo voštiny [1, 17].

### 1.3.1 Konstrukční prvky sendvičového panelu

#### Potah (face sheet)

Zajišťuje ohybovou tuhost sendvičového panelu. Obecně se dělí na kovové a nekovové, z nekovových lze jmenovat polymerní pěny, syntetické kaučuky cement. Mezi kovové patří

ocelové a hliníkové slitiny. Potahy s kovovými slitinami vynikají pevností a tuhostí, negativem je vysoká hustota a obtížnost výroby takového sendvičového panelu. Častějším materiálem pro vnější vrstvu sendvičů bývá na nekovové bázi, oproti kovovým je snadněji zpracovávají při výrobě. Jsou chemicky odolné a vyznačují se dobrými dielektrickými vlastnostmi. Pro některé aplikace, lze s výhodou využít jejich anizotropních vlastností.

#### **Shrnutí vlastností vnější vrstvy:**

- Vysoká pevnost a ohybová tuhost
- Nehořlavost
- Odolnost vůči chemikáliím, vodě, UV
- Nízká cena
- Povrchová úprava

#### **Adheze na rozhrání potah-jádro**

Kvalitní adheze je zásadní pro přenášení působící síly mezi potahem a jádrem, pro tvorbu vazby na rozhraní se používají lepidla ve formě filmu, pasty nebo pomocí svařování. Vazba přenáší tahové a smykové napětí, základní požadavek je, aby vazba na rozhraní měla mez pevnosti a tuhosti minimálně na úrovni materiálu použitého v jádře [21, 22].

#### **Jádro (Core)**

Pro největší efektivitu sendvičové konstrukce je požadavek na materiály jádra s nízkou hustotou, které splňují polymerní pěny, syntetické kaučuky, a další. Obecně snížením hustoty jádra se snižuje odolnost proti únavě materiálu.

Tradičně sendvičové jádro tvoří 2 typy struktur, homogenní pěny z polymerního materiálu nebo nehomogenní voštiny se sítí buněk.

#### **Shrnutí vlastností materiálu na jádro:**

- Vysoká smyková pevnost a tuhost
- Dobrá pevnost v tlaku
- Nízká hmotnost
- Odolnost vysokým teplotám
- Malá nasákavost vody
- Dobré dynamické vlastnosti [18].

## Typy jádra

### Voštiny

Vynikají nízkou hmotností s dobrými mechanickými vlastnostmi. Mají velmi příznivou únavovou křivku: Zmenšováním velikosti buněk dochází ke zvýšení odolnosti k dynamickému namáhání. Volitelnost konfigurace buněk je předností pro aplikace, kde se vyžaduje složitějších tvarů. Mezi konfigurace buněk vhodných pro sendvičové panely tvarovaných do úhlu, patří Flex-core nebo OX-core. Jako další přednost lze uvést velmi dobré strukturální integrity. Značným negativem u tohoto typu jádra - voštiny je, že jsou náchylné k průniku vody a mají sklon k separaci jádra od potahu. Materiály, které tvoří stěny buněk mohou být na přírodní bázi nebo polymerního či kovového typu [21, 22].

### Přehled základních materiálů pro voštiny

#### -Kraftový papír

Poměrně malá pevnost, dobré izolační vlastnosti, nízká cena.

#### -Hliníkové

Nejlepší poměr pevnosti k hmotnosti, dobrá tepelná vodivost, schopnost stínění elektromagnetického záření, hladký povrch stěny buněk.

#### -Aramidové (nomex)

Nízká hořlavost, dobré izolační vlastnosti, patří mezi dobře tvarovatelné materiály.

#### -Skleněná vlákna

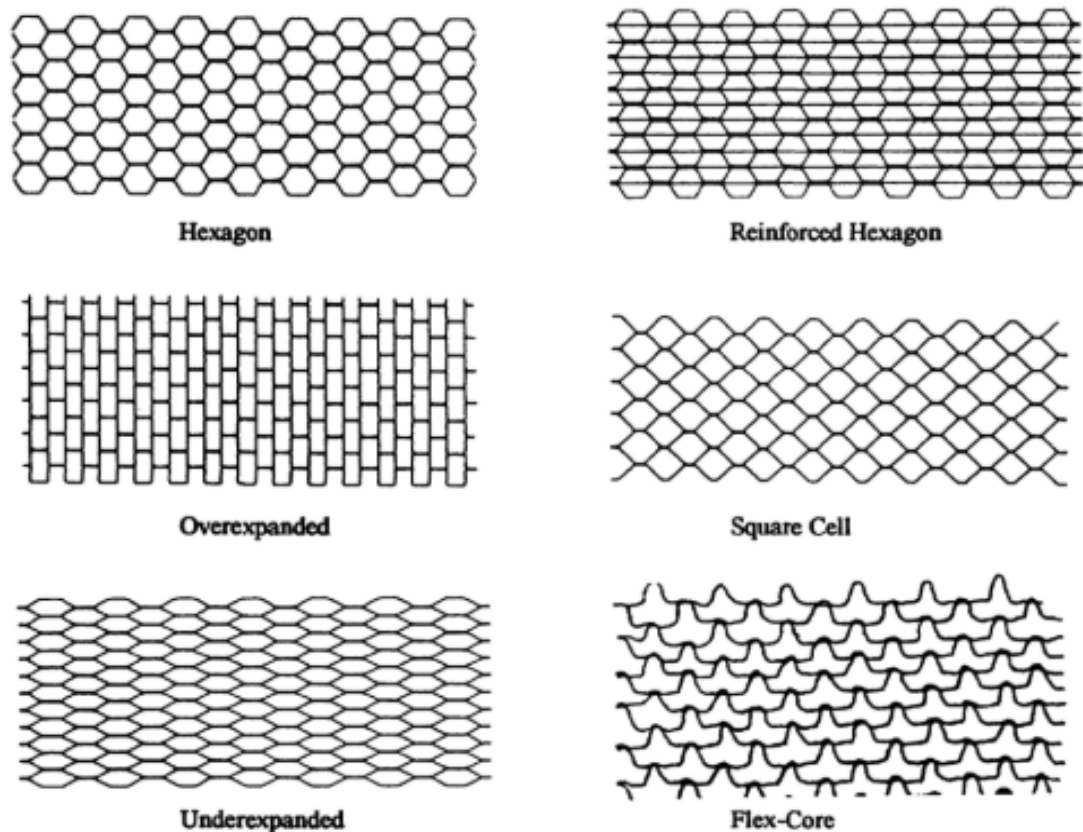
Nízké dielektrické vlastnosti, dobrá tvárnost.

#### -Uhlíkové

Dobrá strukturální stabilita, velmi vysoká pevnost, malý koeficient tepelné roztažnosti, velmi vysoká cena.

#### -Keramické

Odolnost až k extrémním teplotám, dobré izolační vlastnosti. Velmi vysoká cena [23].



Obrázek 19. Typy konfigurace buněk voštinové struktury [20].

### Polymerní pěny

Tvoří skupinu pěny na bázi polymeru, z pohledu kladných vlastností lze uvést nízkou cenu, široký základ surovin na bázi polymeru, dobré dynamické vlastnosti a poměrně dobré akustické tlumení. V přímém porovnání s voštinovým jádrem jsou horší v parametrech jako jsou únavová odolnost a limitovaná pevnost. Možnosti výroby složitějšího tvarovaného sendviče jsou omezené [21].

#### Typy pěny na bázi polymeru:

##### -Polyvinyl chlorid (PVC)

Byl to první dostupný materiál, začal se vyrábět z izokyanátové směsi PVC, stále má ve skupině polymerních pěn největší podíl v komerční aplikaci. Vyznačuje se pevností, tuhostí, je nereaktivní se styrenem, lze tedy PVC použít s polyesterovými a vinyl esterovými pryskyřicemi.

V základu se PVC pěna dělí na zesíťované a lineární. Pro vyšší mechanické nároky je vhodnější zesíťované PVC, proto jeho využití často nachází v námořních aplikacích, kde se

dobře uplatňuje výborná odolnost vůči deformaci. Lineární PVC sice nedosahuje tak dobrých mechanických vlastností, ale stále však poskytuje poměrně dobrou únavovou odolnost. Má o něco menší, ale stále dobrou odolnost k vyšším teplotám a chemikáliím. V průběhu výroby PVC pěny se může pod vysokým tlakem dostat oxid uhličitý do struktury pěny. Oxid uhličitý může unikat k rozhraní mezi potahem a jádrem a způsobit tak separaci vazby a oslabení integrity sendvičové panelu [21].

#### **-Polyethylen tereftalát (PET)**

Na bázi termoplastického polymeru, z toho vyplývá možnost recyklace, která je u PET pěny hojně využívána. Z PET pěny jako semi-krytalické polymer lze pracovat při poměrně vysokých teplotách, a proto je lze využívat se mnoho dostupnými pryskyřici na trhu [21].

#### **-Polymethacrylimid (PMI)**

Ve skupině polymerních pěn má nejlepší mechanické vlastnosti při dané hustotě materiálů, dále nejlepší teplotní odolnost. Při hoření uvolňuje velmi omezené množství plynu. Komerční využití nachází v dopravě, příklad je vysokorychlostní vlaky a dopravní lodě [21].

#### **-Polyeterimid (PEI)**

Termoplastická polymerní pěna, vyznačuje se nízkou absorpcí vlhkosti, malou toxicitou, dobrými dielektrickými vlastnostmi. Materiál se využívá pro hi-tech aplikace, kdy je vyžadován široký rozsah provozní teploty od  $-194^{\circ}\text{C}$  do  $+160^{\circ}\text{C}$ . PEI pěny jsou pro svou vysokou průchodnost pro některé elektromagnetické záření využívány pro radary [21].

#### **-Polyuretany (PUR)**

Široké aplikační využití nachází PUR pěny, od podrážky od bot až v námořnictví. Existují dva typy PUR pěny, které se liší v poměru polyol a methyl-difenyl-diisokynát (MDI).

PUR pěna s vyšším indexem polyol/MDI tvoří větší množství zesíťovaných molekul, což má pozitivní vliv na pevnost pěny, včetně odolnosti proti tlaku. Kromě mechanických vlastností má PUR pěna dobré izolační vlastnosti.

PUR pěna je pro velmi vysoké hodnoty pevnosti a tuhosti využívána v leteckém průmyslu, horní mez provozní teploty je až do  $135^{\circ}\text{C}$ . Pro ještě vyšší tuhost, lze přidat polyesterové deriváty. Únavová odolnost je závislá na hustotě, kdy vyšší hustota PUR pěny má dávat vyšší odolnost vůči únavě materiálu [21].



### **-Polystyren akrylonitril (SAN)**

Termoplastický polymer s lineární strukturou kopolymeru styrenu, mezi jeho přednosti patří vysoký modul pružnosti, příznivé hodnoty hustoty, díky obsahu akrylonitrilové skupiny je odolný i vůči chemickým činidlům.

V návaznosti na chemickou odolnost, lze SAN pěny využít s převážně dostupnými pryskyřici na trhu. Nevýhodou je obtížnost recyklace v porovnání s PET pěny [21].

## **1.3.2 Technologické procesy**

### **Technologie výroby sendvičové panelu**

V základu jsou dva přístupy při výrobě sendvičových struktur. V případě, že je výchozím materiálem pro potah polotvar, je účelem technologického procesu zajistit přilnutí jádra s potahem, což se označuje jako suchá metoda. Pro suchou metodu se využívají výrobní procesy jako lisování vakuovým vakem a kontinuálním lisováním [21].

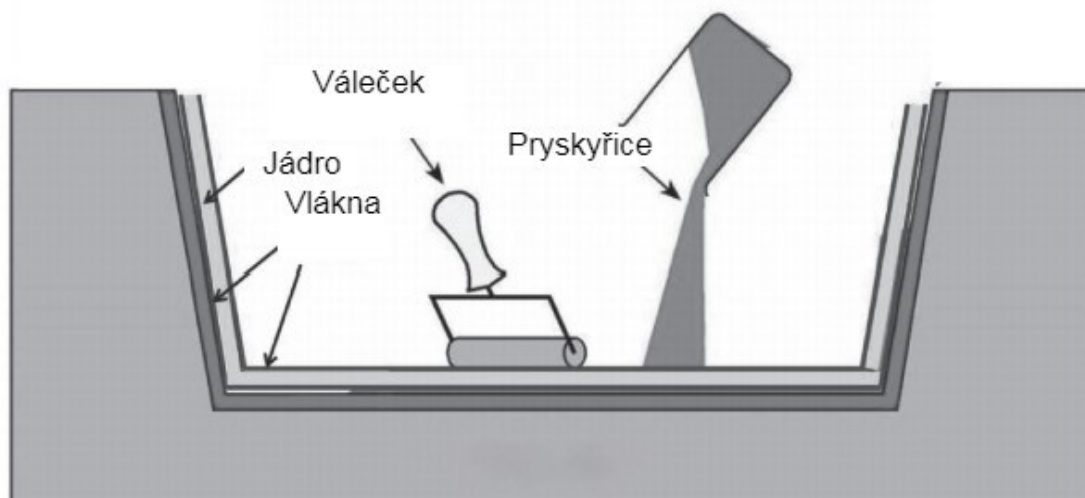
Druhý přístup představuje vznik laminátové vrstvy sendvičového panelu vytvrzením a tvorbou vazby vznikajícího laminátu na jádře. Výchozím materiálem bývají kapalné reaktoplastické pryskyřice, proto se metoda nazývá jako mokrá. Hlavní technologie výroby jsou Lisování v autoklávu, Vysokotlaké vstřikování (RTM), stříkání laminátu, ruční kladení [21].

### **Vakuové lisování**

Polotvar jádra je s laminátem překryto separační folií, forma se utěsní a připojením k čerpadlu se forma vakuuje, atmosférický tlak způsobí zhuštění laminátu, vznikem podtlaku se z laminátu odstraní vzduchové bubliny z povrchu. Přebytná pryskyřice je odvedena žlábkem po obvodu formy [2, 21].

### **Ruční kladení**

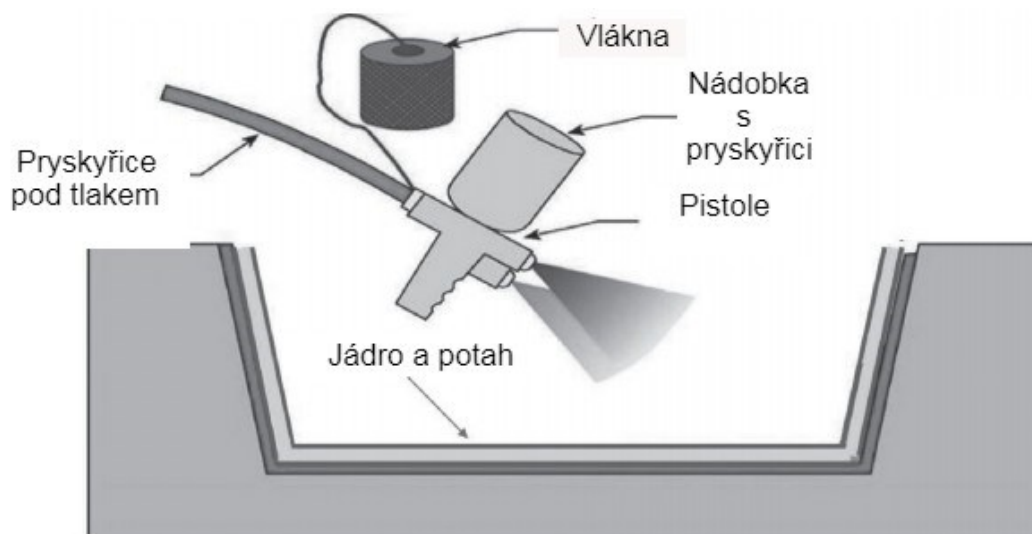
Princip metody je ruční laminace pomocí válečku. Ve formě je předpřipravený polotovar, postupným nanášením pryskyřice a ruční laminací se zajistí rovnoměrné prosycení. Pro lepší výsledek je možné sendvič dodatečně laminovat vakuově ve vaku. Urychlení vytvrzení je možné za zvýšené teploty formy. Ruční kladení je jednodušší způsob výroby sendvičové panelu. Menší oblast využití je kvůli náročnosti i na lidský zdroj, a to jednak z pohledu produktivity, ale i možnosti kolísání kvality výrobku, proto je vhodnější přistoupit k malosériové výrobě nebo k prototypování. Mezi přednosti patří nízký nárok na energetické zdroje a to vzhledem k možnostem dosáhnout vytvrzení za pokojových teplot [21].



Obrázek 20. Technologie ručního kladení [21].

### Stříkání laminátu

Patří mezi ruční výrobní postupy, zařízení se skládá ze dvou nádrží jedna obsahuje pryskyřici a iniciátor a druhá plniva ve formě vláken. Tlakem pomocí vzduchu jsou složky nastříkány na povrch polotvaru, ke zhutňování a odstranění vzduchové bublin je použito stejného nástroje jako při ručním kladení. Pryskyřice pro výrobu laminátu bývá obvykle z polyesteru a polyvinylesteru. Výhodou této metody je možnost jednoduchého nanesení pryskyřice na velké plochy. Obtíže vznikají při použití s polotvaru s vysokým objemovým podílem vláken, a to z důvodu obtížného udržení konstantního objemového podílu vláken, stejně tak jako konstantní tloušťky nosu [21].



Obrázek 21. Technologie stříkání laminátu [21]

### **Lisování v autoklávu**

Využívá se vakuové a tlakové technologie, základem je tlaková nádoba, která umožňuje řízení jednotlivých parametrů jako jsou tlakové a vakuovací cykly. Kombinací přetlaku a teploty se dosáhne účinného hutnění laminátu a rovněž dojde k odstranění vzduchových bublin z povrchu.

Lisování v autoklávu je velmi nákladný proces a dovoluje pouze malosériovou výrobu. Využitím této technologie lze dosáhnout kvalitativně nejlepších výsledků. Oblast kde se tato technologie hlavně používá jsou letectví a kosmonautika [2,21].

### **Vysokotlaké vstřikování (RTM)**

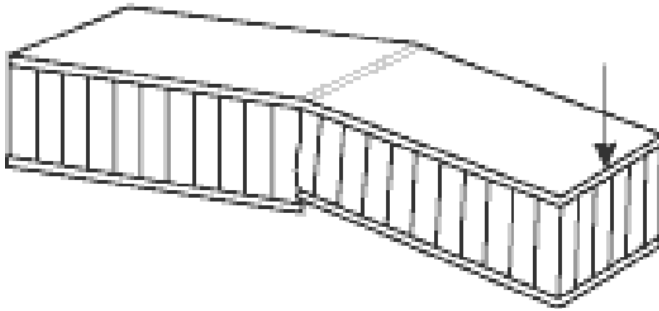
Tento proces kombinuje technologii vstřikování a lisování, na začátku RTM procesu je vložena výztuž do dvoudílné formy a to ve formě skleněné tkaniny a pěny. Pryskyřice se zavádí do formy pod tlakem, následně dochází ke prosycení výztuže. Použitím odsávání se odstraní vzduchových bublin z pryskyřice a snižuje se viskozita pojiva. Proces je možné provádět za pokojové teploty, avšak vytápěním formy se zkracuje čas mezi cykly a zvýší se tak efektivita výroby [2,21].

### **Pultruze (tažení)**

Je kontinuální proces, výroba plochých nekonečných pásů sendvičových panelů s konstantní tloušťkou. Vlákná spolu s jádrem jsou při tomto procesu tažena přes k smáčecí vanu, kde se prosytí pryskyřicí. Dále v průvlaku dochází ve formě k tvarování, vytvrzování, následně je profil odtahován na housenkovém pásu. Kladem této technologie je rychlost, která je daná povahou kontinuálního procesu. Pro co největší efektivitu v tomto směru je potřeba vybrat velmi reaktivní pryskyřičné systémy, aby průchod průvlakem zachoval stálý profil. Nevýhodou tohoto výrobního procesu je vysoká počáteční investice a nároky na prostor k umístění linky [2, 21].

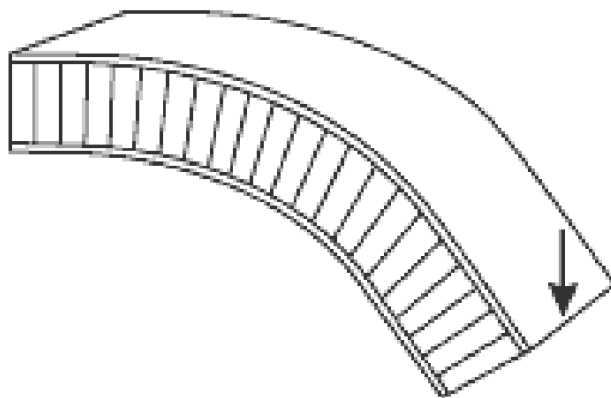
#### **1.3.3 Možné selhání sendvičového panelu**

Při zatížení sendvičové konstrukce v ohybu dochází nejčastěji k selhání potahu při působení tlakové či tahové síly. Smykové síly naproti tomu způsobují selhání jádra. V praxi nejčastěji dochází k selhání v panelu v místech, kde se koncentruje napětí např. v rozích, otvorech a v místech spojů.

**Přehled možného selhání v konstrukci panelu:**

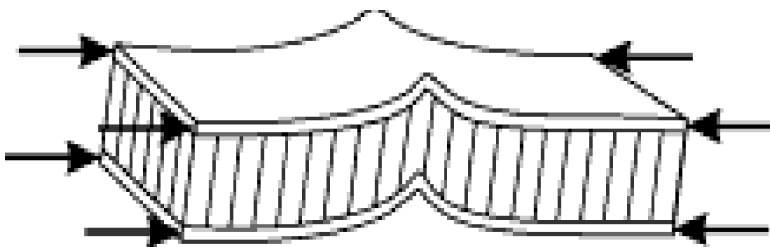
Obrázek 22. Selhání pevnosti sendvičového panelu [24].

Překročení meze pevnosti dochází působením kombinace složky smykového, tlakového nebo tahového napětí. Kolaps pevnosti panelu proběhne v celé tloušťce panelu.



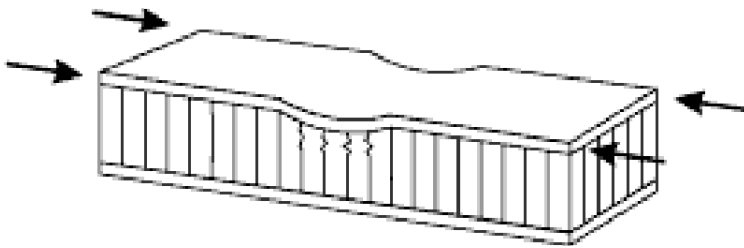
Obrázek 23. Selhání tuhosti sendvičového panelu [24].

Ukázka nedostatečné ohybové tuhosti.



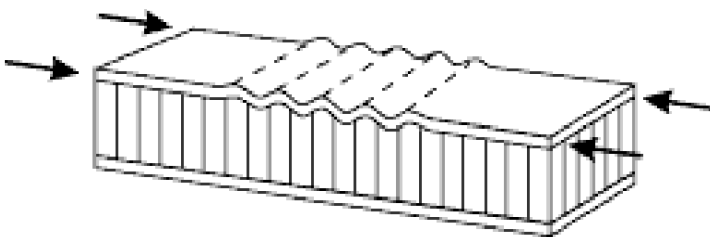
Obrázek 24. Zborcení panelu sendvičového panelu [24].

K selhání dochází, když axiální napětí dosáhne pevnosti panelu v rovině. Větší sklon k selhání tohoto typu mají potahy, které mají nízkou houževnatost. Pro kompozitní materiály je předcházení tohoto typu selhání kritické.



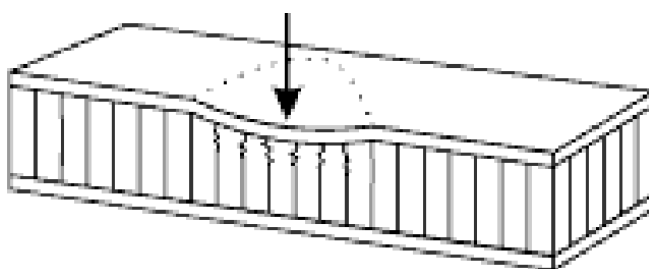
Obrázek 25. Zmačknutí potahu sendvičového panelu [24].

Nastane při borcení jedné z vnější vrstev sendvičového panelu. Potah se bortí do konkávního nebo konvexního tvaru.



Obrázek 26. Zborcení jádra sendvičového panelu [24].

Pro tento typ je typické, že dochází k delaminaci, všechno napětí přenáší vnější vrstva panelu, vazba potahu s jádrem je porušena.

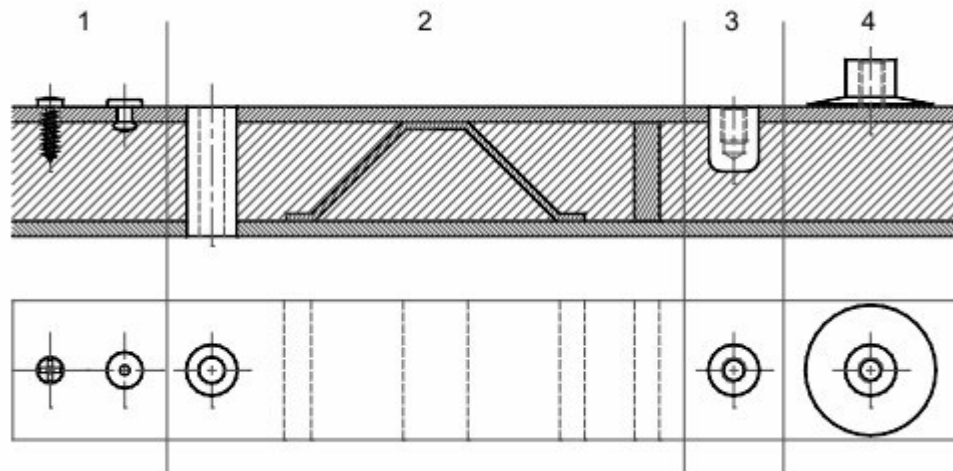


Obrázek 27. Lokální stlačení sendvičového panelu [24].

Je typem selhání, kdy jsou tlakové složky napětí přenášeny na jádro větší, než hodnoty radiálního napětí, které je schopno jádro nést.

### 1.3.4 Vložky sendvičového panelu

Vložky jsou prvky v sendvičovém panelu ve formě otvoru, šroubu, nebo různých spojů na povrchu panelu. Přítomnosti vložek působí lokální změny na mechanických vlastnostech a může mít zásadní vliv na strukturální pevnost celého panelu.



Obrázek 28: Typy vložek a popis: 1. Šroub, nýt; 2. Otvor; 3. Drážka; 4. Spoj pomocí lepidla [19].

Nejčastějším typem vložky, jsou otvory, které jsou vyvrtány skrz sendvičový panel. Tyto nespojitosti v panelu způsobí koncentraci axiálního napětí při zatížení. Voštinová jádra špatně přenášejí napětí v rovině, a proto může vzniknout kolaps buněk v jádře. Lepší distribuci napětí v rovině v celé tloušťce jádra vykazují polymerní pěny [19].

#### Adheze na rozhraní

Špatný výběr materiálových spojů na rozhraní potah a jádra může způsobit porušení jejich vazby, pak rozložení napětí na jádře je minimální a všechno napětí působí na dvou vnějších vrstvách panelu - potahu. Na rozhraní vložky a jádra mohou být vazby tvořeny lepidly. Tyto lepidla by měli být strukturálně součástí vložek, z důvodu toho, že pevnostní charakteristiky vložky bývají lepší než samotného jádra [19].

## 2 NÁVRH A VOLBA MATERIÁLU PRO LONGBOARD

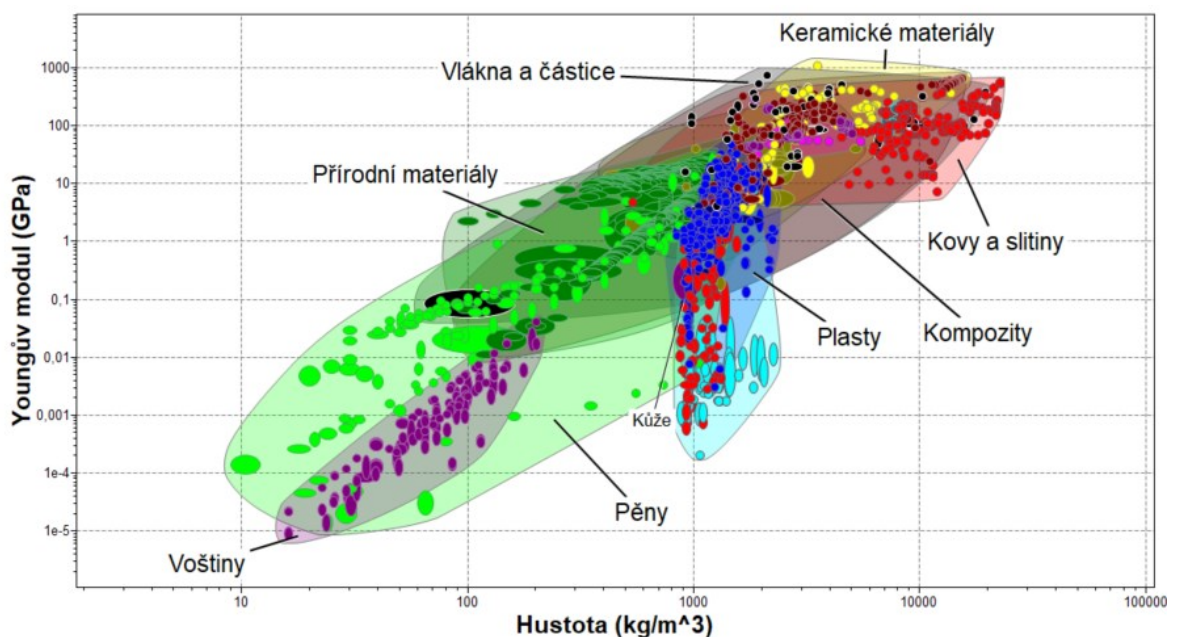
Cílem při konstrukčním návrhu produktu je splnit požadavek na bezpečnost, funkčnost produktu při nízkém nákladu a minimalizaci zdroje. Role volby materiálu při návrhu produktu je maximalizovat výkon ať už z hlediska produkce či materiálové vlastnosti,

### 2.1 Volba materiálu

Je krok v procesu při návrhu daného produktu s cílem dosáhnout požadovaných materiálových vlastností s minimalizací nákladu na materiál. V minulosti se materiály vybíraly na základě dostupných informací o daném materiálu a to nejčastěji v tištěných literaturách. V současnosti jsou dostupné nástroje ve formě software s databází materiálu. Výhodou je možnost průběžně měnit požadavky na vlastnosti materiálů a v reálném čase pozorovat změny v grafech.

#### Strategie výběru materiálu

Definice vstupních požadavků na produkt. To jsou funkce, omezení, cíle a volné proměnné. Selektce materiálu pomocí map, nebo grafů a to zvolením některých základních požadovaných vlastností a zavedením jejich parametru do osy map.



Obrázek 29. Materiálová mapa – přehled skupiny materiálu a jejich závislost Youngova modulu na hustotě.

## **Materiálový index**

Materiálový index mám pro danou geometrii zatížení definuje, který materiál za daných podmínek bude vykazovat např. minimální hmotnost určenou hustotou při maximálním Youngově modulu (tuhosti) [26].

## **Materiálové vlastnosti**

Každý materiál mám kombinací svých vlastností dává informaci o celkové vhodnosti materiálu k aplikaci v daném konstrukční řešení.

## **Fyzikální a mechanické vlastnosti**

### **1. Obecné vlastnosti**

Cena, hustota

### **2. Mechanické**

Elastické moduly

Pevnost

Houževnatost

### **3. Teplotní**

### **4. Magnetické**

### **5. Optické**

### **4. Opotřebení**

### **5. Koroze**

### **6. Oxidace**

### **7. Elektrické**

### **8. Vliv na životní prostředí**

## **2.2 Digitální knihovny materiálu a jejich úlohy v materiálovém inženýrství**

Problematika výběru materiálu a jejich vlastností vzrostla ve 20. století. Počet komerčně dostupných materiálů vlivem vývoje znalosti o polymerech rychle rostl a nyní se toto číslo vyšplhalo až k 160 000. Dostupnost informací o vlastnostech jednotlivých materiálů v klasických učebnicích byla nedostatečná a volně dostupné informace na internetu mohou obsahovat i nesrovnalosti [4].



Mezi obecné požadavky na digitální databáze patří přívětivost uživatelů, snadné použití vstupních funkcí jako vyhledávání, prohlížení, nápověda a také výstupní funkce jako grafy, mapy a tabulky.

### **Digitální knihovny dostupné na trhu**

#### **CES EduPack**

Je aplikace na platformě Windows, primárně určená studentům ale i materiálovým inženýrům k výběrů vhodných materiálů pro jejich aplikace. CES EduPack obsahuje nástroje jako je prohlížeč materiálu, mapy a grafy, syntetizér a ECO audit nástroj. Tento software umožňuje přidávat do databáze nový materiál nebo upravit existující. K rozšíření existují rozsáhlé dokumentace, projekty a učební materiály.

#### **MATWEB**

Tato online webová služba, kde lze najít vlastnosti k 135 000 materiálům, a to kovovým, polymerním, keramickým a jiným technickým materiálům. Přístup k databázi je zdarma a komunita ji stále doplňuje o další materiály.

## **2.3 Longboard**

### **Historie longboardu**

Historie skateboardu, potažmo i longboardu, začala ve slunné jižní Kalifornii v 50. letech minulého století. Surfaři, kteří v období nevhodnému k surfování začali hledat náhradu, vzali kolečka od inline bruslí, namontovali je na dřevěné prkno. Popularita jízdy po čtyřech kolečkách se rozrostla a začala se šířit od jižní Kalifornie až po Brooklyn, Chicago a pak do celého světa. V současnosti je deska z kanadského javoru standard, které výrobci nabízejí na trhu. S rostoucím výpočetním výkonů počítačů, zlepšení procesu ve výrobě a znalosti o kompozitních materiálech se začalo experimentovat s materiály, jako jsou např. uhlíková vlákna, kevlar a sklolamináty [33].

### **Z čeho se longboard skládá**

Základ longboardu jsou deska, truck a kolečka. Kola pro longboardy se nejčastěji vyrábějí z Polyuretanu, který oproti kaučuku je odolné proti protrhnutí, kola mají různé tvrdosti definované podle stupně Shore. Tvrdosti kol dostupných na trhu je od 72A do 100A.

Polyuretan se vyznačuje dobrou schopností pohlcovat vibrace a nárazy. Polyuretanová kolečka jsou umístěná na nápravě nazvané truck. Truck se skládá ze dvou částí, na jedné části jsou umístěná dvě kolečka a druhá část je pomocí spoje v pevném kontaktu s deskou, truck umožňuje náklonu desky a otáčení části trucku s kolečkem do směru náklonu a tím řízení směru jízdy. Existuje několik kategorií prken podle designu desky a návaznosti na primární styl jízdy.

Obecně se prkno dělí na longboard a skateboard se skládá ze stejných mechanických částí, rozdíl je pouze ve velikosti a absence kicktailu u longboardu. Kicktail je konec desky, který se vyznačuje prohnutím a stal se typickým prvkem skateboardu do dnešního dne, umožňuje dělat složité a efektivní triky. Klasický longboard má délku od 85 cm do 105 cm. Dále velmi oblíbené jsou cruiser longboard, bývají o něco kratší než klasický longboard rámcově 80-90 cm, často mají malý kicktail, který umožňuje v omezené míře provádět triky.

Zajímavý typ longboardu je downhill longboard, který vypadá jako klasický longboard, taky má sdílené všechny vlastnosti s klasickým longboardem kromě pevnosti desky. Typ desky pro downhill longboard musí být velmi pevný pro udržení stability jezdce v disciplíně downhill, kdy jezdci sjíždí svahy a často dosahují rychlosti přes 100 km/h. V současné době jsou dále oblíbené elektrické longboardy, ty mají navíc baterie, řídicí jednotka plus elektromotor s převodem pohánějící buď jedno či více koleček. Baterie a řídicí jednotka může být integrována v prostoru samotné desky či připevněna na spodní části desky mezi rozvorem trucku.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem praktické části bakalářské práce je vybrat pomocí program CES EduPack sendvičový materiál pro longboard. Motivacemi jsou osvojení práce s programem Ces EduPack a získat přehled o fyzikálních a obzvláště mechanických vlastnostech nasyntetizovaného sendvičového materiálu a jeho porovnáním s přírodními materiály.

Hlavní body:

1. Stanovení požadavků na longboard.
2. Výběr materiálů pro prvky sendvičového typu se zaměřením na mechanické vlastnosti a toxicitu.
3. Syntéza sendvičového panelu z dat CESu, výpočet ohybové tuhosti a průhybu při daném zatížení panelu v ohybu.
4. Diskuze a závěr.

## 4 VOLBA MATERIÁLU

### 4.1 Longboard (deska)

Základní požadavek při výběru materiálu pro základní desku pro longboard (nebo-li prkno) je dostatečná pevnost, spolehlivost, tlumicí vlastnosti a další vlastnosti, které zajistí jezdcí pohodlí a bezpečnost při jízdě.

#### Požadavky

Funkce: Prkno

---

Omezení:

- a) Délka: 1000 mm
  - b) Šířka: 230 mm
  - c) Minimální hodnoty modul ohybové pružnosti podle referenční desky – 7-mi vrstvý kompozitní laminát z javoru
  - e) Odolnost proti vodě (i slané)
  - d) Netoxické vlastnosti
- 

Cíl: Minimalizace hmotnosti a nákladů (ceny výrobku)

---

Volné proměnné:

- a) Výška
  - b) Volba materiálu pro sendvičový panel
- 

**Z požadavků sestavíme rovnice:**

**Rovnice pro hmotnost**

$$m = b \cdot h \cdot L \cdot \rho \quad (1)$$

kde

$m$  – hmotnost [kg],  $b$  – šířka [m],  $h$  – výška [m],  $L$  – délka [m],  $\rho$  – hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

**Rovnice pro jednotkovou cenu**

$$C_j = \rho \cdot C_m \cdot V \quad (2)$$

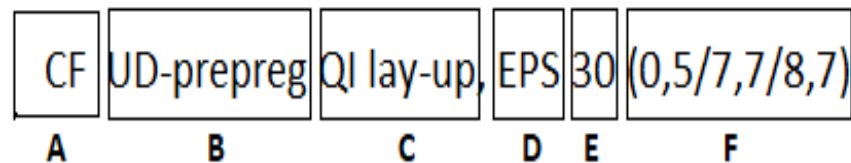
kde

$C_j$  - jednotková cena,  $C_m$  – cena materiálu [CZK/kg],  $\rho$  – hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

$V$  – objem longboardu [ $\text{m}^3$ ],

**Výběr materiálu z databáze CES EduPack**

Různé typy materiálů a jejich uspořádání je shrnuto v následujícím schématickém zobrazení:



kde

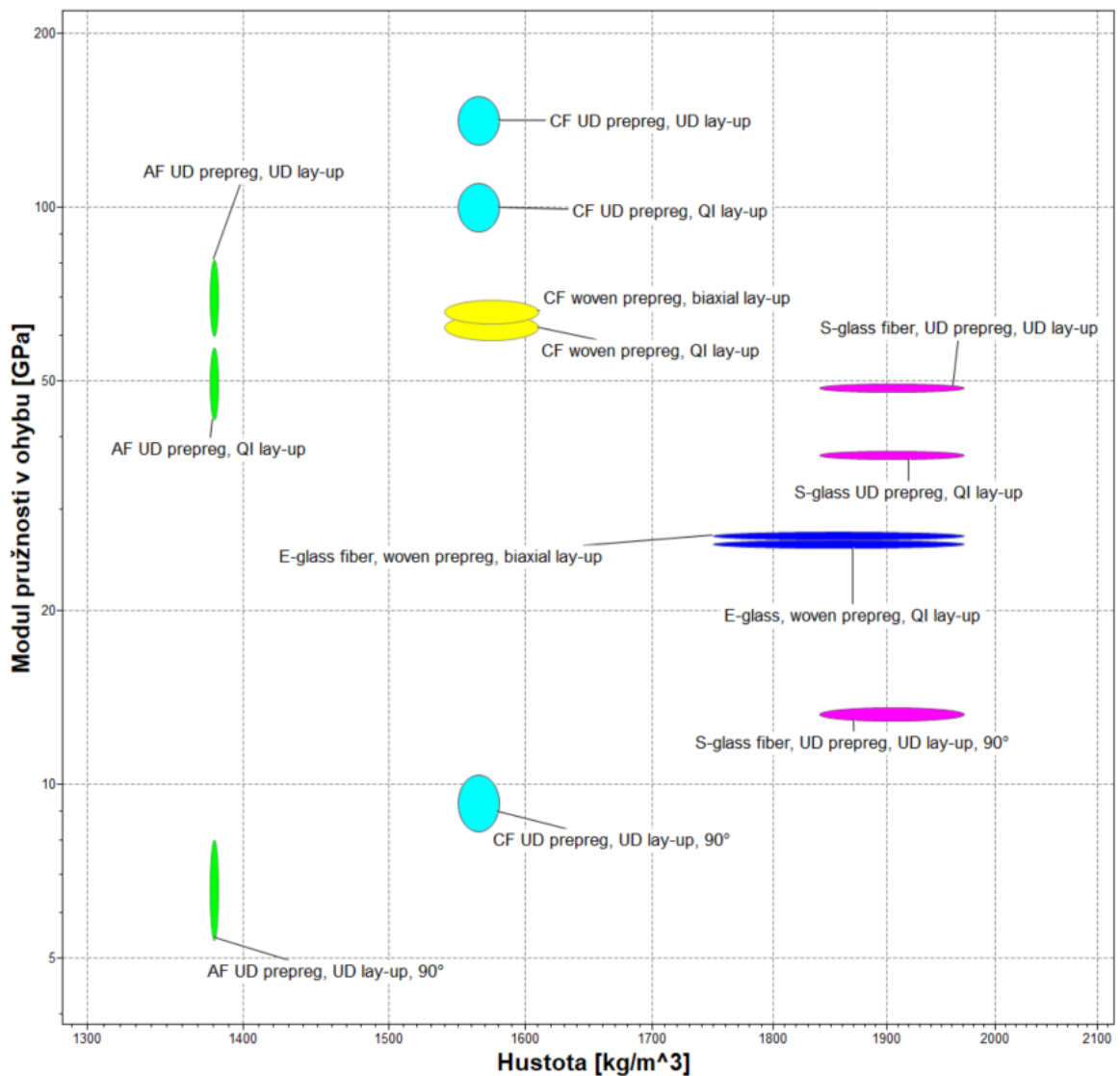
- A) Typ vlákna
- B) Forma laminy
  - UD prepreg – jednosměrně orientovaná vlákna – ve formě pásu
  - QI prepreg – vícesměrné vrstvení vláken
  - Woven prepreg – uspořádání vláken křížové (tkanina)
- C) Metoda nanášení vláken do pryskyřic
  - QI lay-up – QI je laminát o kvaziizotropní struktuře vláken  $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$  symetrický s technologií nástříkem
  - UD lay-up – jednosměrně orientovaná vlákna
- D) Typ pěny
- E) Hustota pěny [ $\text{kg/m}^3$ ]
- F) Tloušťka (potahu/jádra/panelu) v [mm]

Tabulka č.1: materiál potahu.

Materiál	CF UD-prepreg QI lay-up	AF UD-prepreg QI lay-up	E-glass W-prepreg QI lay-up	CF W-prepreg QI lay-up	S-glass UD-prepreg QI lay-up	Javor (acer saccharum)
Matrice	Epoxid	Epoxid	Epoxid	Epoxid	Epoxid	-
Cena [CZK/kg]	875	1400	785	1235	561	37
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1580	1380	1860	1570	1910	710
Poissonova konstanta	0,058	0,337	0,314	0,306	0,307	0,37
Youngův modul [GPa]	65	27,2	21,4	54,9	20	13,9
Modul pruž. v ohybu [GPa]	66	50	26,2	101	37,4	12,6
Pevnost na mezi kluzu [MPa]	769	374	256	671	481	101
Smykový modul [GPa]	3,5	8,85	8,14	21	9,2	1,03
Houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	30,1	0,9	30,6	4,8	0,26	3,05
Únavová pevnost po 10 <sup>7</sup> cyklech [MPa]	461	84,6	41,3	184	29,8	32,6
Mechanický ztrátový koeficient	0,0023	0,018	0,00285	0,00235	0,0029	0,0074
Toxicita	Netoxický	Netoxický	Netoxický	Netoxický	Netoxický	Netoxický
Odolnost vůči vodě (slané)	Excelentní	Excelentní	Excelentní	Excelentní	Excelentní	Litmitovaná

V přehledu kompozitních materiálů v tabulce č.1 si lze všimnout výrazných rozdílů v ceně kompozitních materiálů v porovnání s přírodním materiálem. Poměrně nízká hustota je další výhodou přírodního materiálu - javoru. Lepší hodnoty mechanických vlastností patří kompozitním materiálům. Důležitým parametrem při návrhu prkna longboardu je schopnost pohlcovat vibrace a rázy vznikající při jízdě po vozovce. Je žádoucí materiál s dobrým dynamickým tlumením. Sledováním hodnoty mechanického ztrátového koeficientu, lze stanovit, jaký materiál má lepší předpoklad pro lepší pohlcení vibrací. Odolnost vůči vodě

je zásadní pro parametr při návrhu desky pro longboard, jakož to dopravní prostředek. Uživatelé longboardu předpokládají možnost využití prkna i v dešti. Pro stanovení toxicity v kompozitu je určující materiálem matrice, v našem případě je to epoxidová matrice, která je považovaná za netoxickou (při styku s kůží) v zesíťované formě, která se nachází v kompozitu.



Graf č.1 Závislost ohybového modulu na hustotě kompozitu

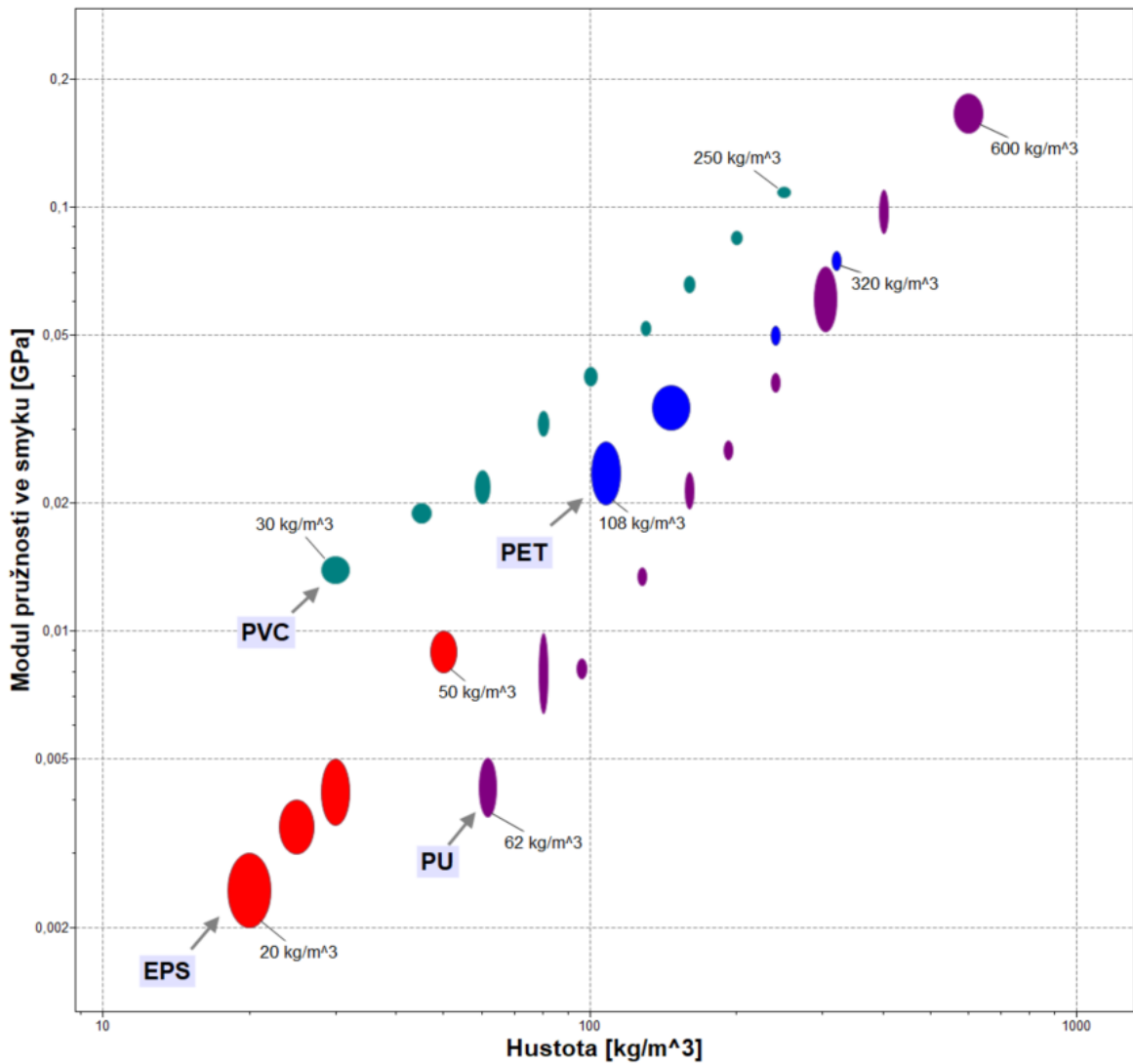
Z grafu č.1 lze pozorovat široký rozsah modulů pružnosti v ohybu v závislosti na hustotě pro daný typ kompozitu. Je zřetelný rozdíl v hodnotách pružnosti podle typu technologie a aplikace pryskyřic na vláknech. Kompozit s aramidovými vlákny má nejpříznivější hodnoty modulu pružnosti v ohybu (5-70 GPa) v závislosti na hustotě (zhruba 1380 kg/m<sup>3</sup>).



Tabulka č.2: Materiály jádra.

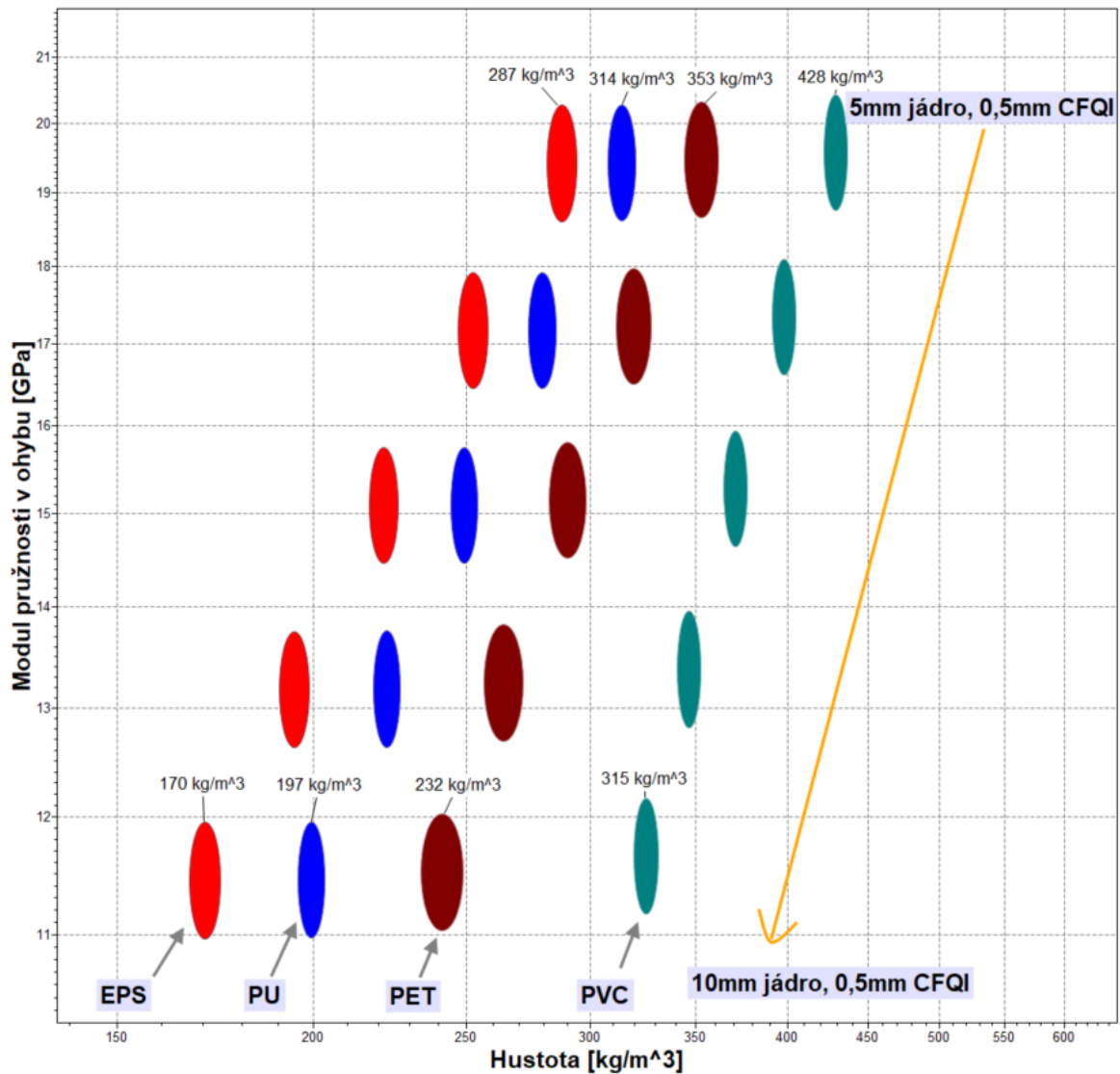
Pěny jádra	EPS 30	PU 62	PET 108	PVC DH 200
Typ	termoplast	reaktoplast	termoplast	termoplast
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	30	62	108	200
Poissonova konstanta	0,275	0,316	0,316	0,32
Youngův modul [GPa]	0,044	0,0146	0,062	0,24
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	0,044	0,011	0,062	0,24
Pevnost na mezi kluzu [MPa]	0,225	0,25	0,6	5,6
Smykový modul [GPa]	0,0043	0,0043	0,024	0,085
Pevnost ve smyku [MPa]	0,17	0,417	0,99	2,2
Absorpce vody [%]	2	0,17	0,16	1,2
Toxicita	Netoxické	Netoxické	Netoxické	Netoxické

Pro svůj návrh jádra jsem vybral jako materiál 4 pěny, které se nejčastěji vyskytují ve sportovních aplikacích. Obecně jsou polymerní pěny netoxické, jejich toxicita se projevuje až při jejich hoření, kdy vznikají toxické plyny.



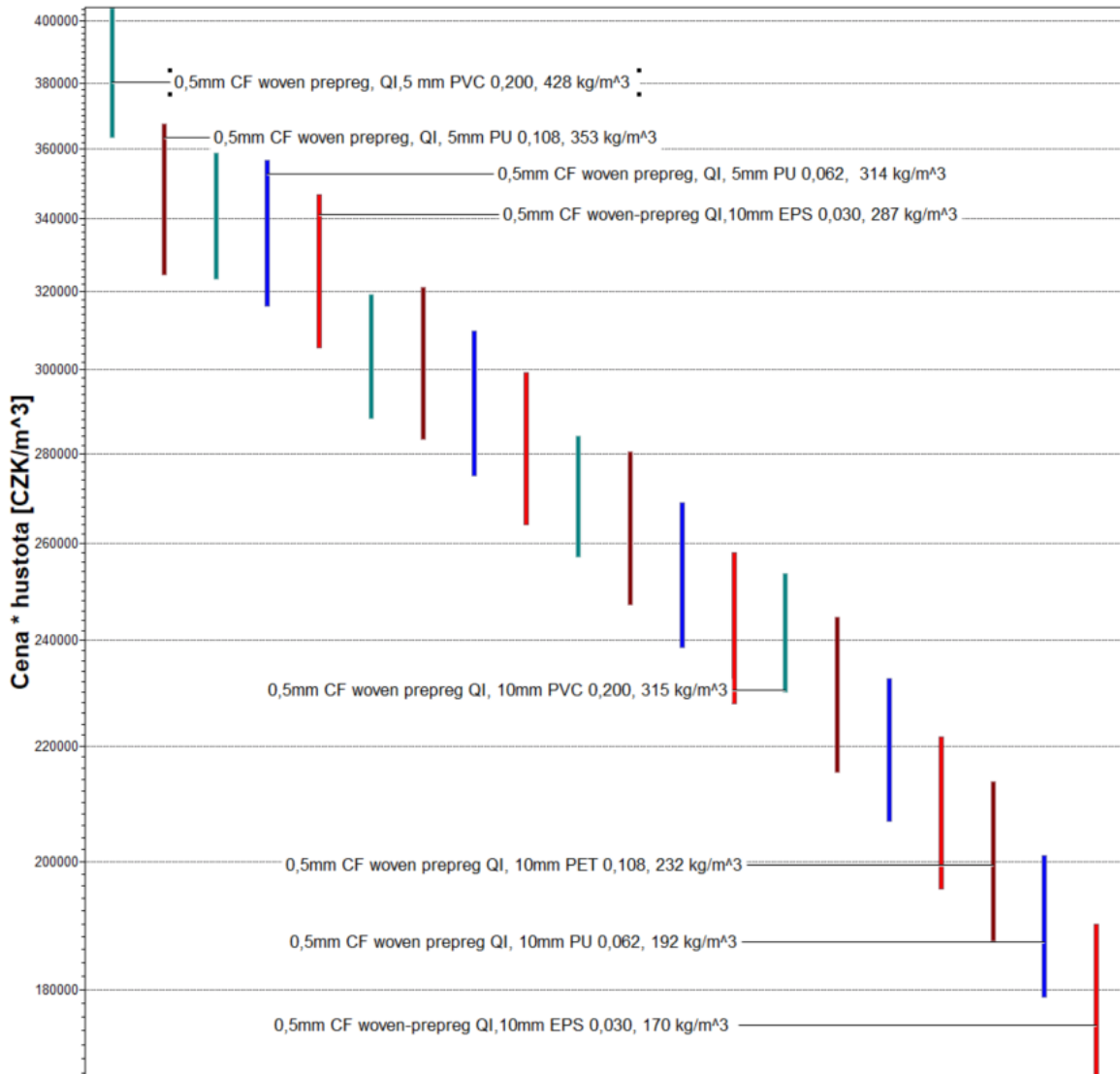
Graf 2. Závislost G-modulu na hustotě pěn z různých typů materiálu.

Z grafu 2 jsou vidět materiály (pěny) s různou hustotou, lze pozorovat, že modul pružnosti ve smyku závisí v rámci jednoho materiálu na hustotě. Lze zjednodušeně říct, že čím větší hustota, tím lepší hodnoty modul pružnosti ve smyku.



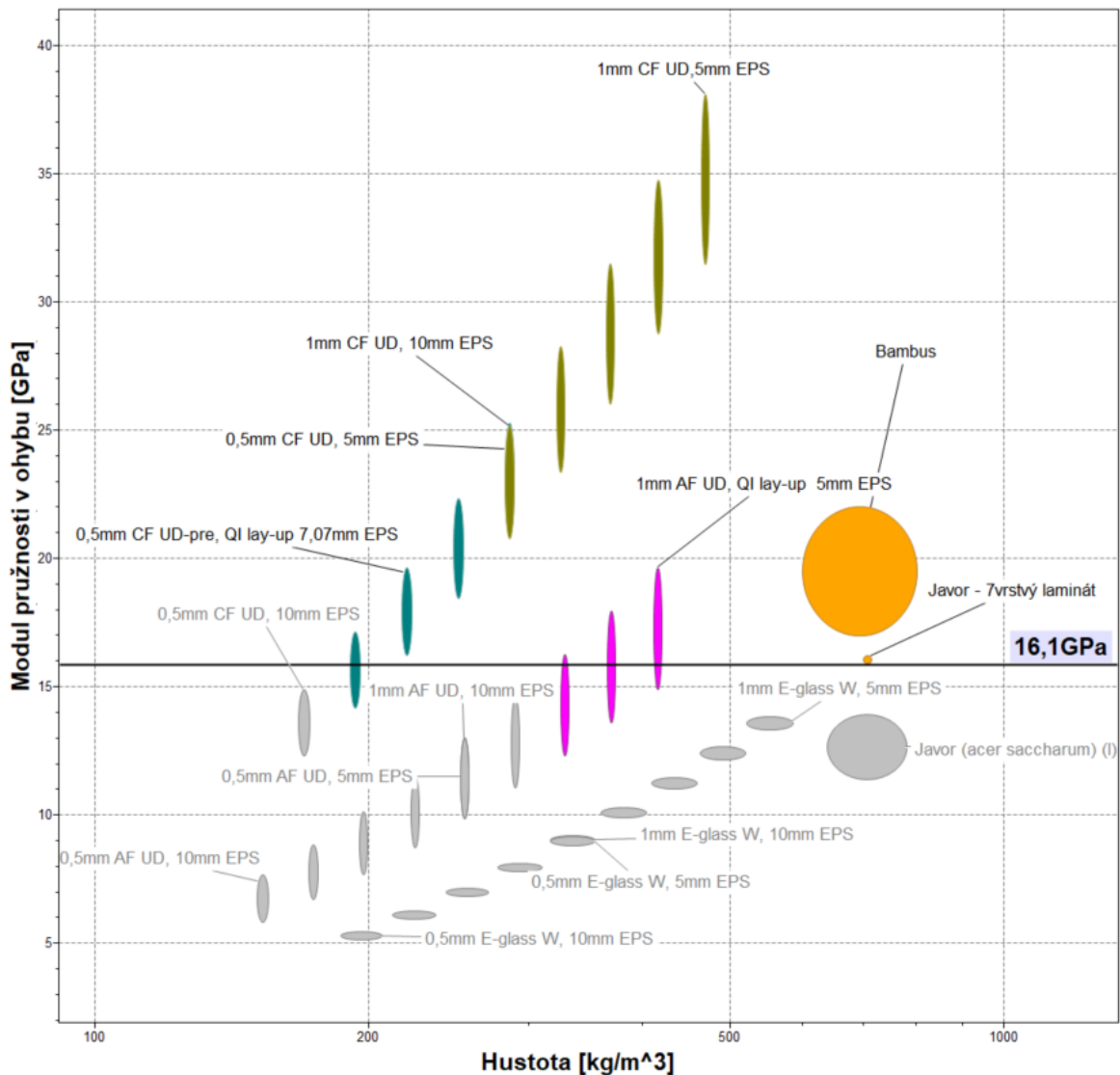
Graf 3. Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě sendvičového panelu z různých pěn; s klesající tloušťkou jádra (10 mm - 5mm) při stejné tloušťce vnější vrstvy (0,5 mm).

Z grafu č. 3 lze pozorovat, že modul pružnosti v ohybu závisí minimálně na hustotě pěn. Je patrný vliv tloušťky jádra v kompozitu. Kompozit s jádrem s největší tloušťkou (10 mm) má nejnižší modul pružnosti v ohybu (11 GPa). Materiály z pěn se rovněž liší hustotou.



Graf 4. Závislost objemové ceny sendvičového panelu z různých typů pěn

Vzhledem ke srovnatelným mechanickým parametrům pěny, kdy při stejné tloušťce a stejné hustotě, vybereme pěnu s nejnižší hustotou a tedy zároveň i nejlevnější. Na grafu č. 3 obr. 32, je vidět že nejlevnější sendvičový panel obsahuje pěnu EPS s hustotou  $30 \text{ kg/cm}^3$ , kterou jsem si vybral jako základní pěnu při návrhu (syntéze) kompozitů v programu CES.



Graf 5. Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě různých typů sendvičových prvků

Další krokem bylo nasyntetizovat v programu CES několik sendvičových prvků. Vstupní proměnné byly materiály potahu, kompozity z uhlíkových vláken, aramidových vláken (vlákna ve formě pásu) a E-skleněná vlákna ve formě tkaniny. Uspořádání vrstev vlákna je u všech kompozitu vybráno jako kvazi-izotropní ( $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ ), což představuje symetrický laminát složený z 4-vrstev. Návrh sestavení pro sendvič je: 0,5 mm a 1 mm je tloušťka potahu a (5 mm; 5,95 mm; 7,07 mm; 8,41 mm; 10 mm) tloušťka jádra (EPS). Hustota EPS je  $30 \text{ kg/m}^3$ . Pro porovnání byl do mapy vložen přírodní materiál: bambus a javor. Dále byl nasyntetizován 7- vrstvý laminát z javoru o celkové tloušťce 11,48 mm. Všechny materiály byly zobrazeny do mapy modulů pružnosti v ohybu v závislosti na hustotě. Byla stanovena mezní hodnota modulů pružnosti v ohybu podle referenčního

laminátu z javoru, která je 16,1 GPa. Pro větší přehled byl do mapy zaveden rámeček, ve kterém zvýrazněné materiály splňují podmínku.

**Tabulka 3. Vybrané materiály z grafů.**

Materiál	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (0,5/7,7/8,7)	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (1/10/12)	AF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (1/5/7)	Javor 7vrstvý laminát (x/x/11,48)
Index	1	2	3	4
Cena [CZK/kg]	778	804	1335	36,3
Tlouška potahu [mm]	0,5	1	1	-
Tlouška jádra [mm]	7,7	10	5	-
Tlouška desky [mm]	8,07	12	7	11,48
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	220,5	285	415,5	707
Youngův modul [GPa]	6,82	9,2	7,78	13,8
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	17,95	22,95	17,25	16,1
Pevnost na mezi kluzu [MPa]	83,9	113	108,6	12,9

Deska longboardu se 7-mi vrstvami javoru (x/x/11,48), kde x – představuje tloušťku laminy, která není přesně uvedena v databázi CES, ale je udána celková tloušťka laminátu. Standardně je takový laminát dostupný na trhu v tloušťce od 11 mm do 13 mm. Laminát má poměrně vysoký Youngův modul (13,8 GPa) i při vyšší hodnotě hustoty (707 kg/m<sup>3</sup>) je výrazně levnější kolem 36,3 CZK/kg než desky z kompozitního materiálu 1335 CZK/kg.

## 4.2 Výpočet

### Namáhání longboardu

Namáhání tělesa je obecně rozloženo na kombinaci tahu, tlaku, ohybu, stříhu a krutu s tím, že téměř jedna složka vždy dominuje. U Longboardů, kdy uživatel se svojí váhou stojí na prkně a působí vlivem gravitační síly, dojde k ohybu prkna vlivem ohybového napětí. Lze předpokládat, že složka ohybového zatížení bude dominovat.



Obrázek 34 Ohybové zatížení panelu s konstanty  $C_1$  s hodnotou 48 a  $C$  s hodnotou 4

V další části je uveden výpočet pro průřezový modul, který je potřeba k dalším výpočtům síly potřebné při přetržení a výpočtu průhybu. Výpočet průhybu panelu vyžaduje hodnoty kvadratického momentu plochy.

### 4.2.1 Síla potřebná k přerušení

#### Vztah pro výpočet průřezového modulu v ohybu

$$Z_p = \frac{1}{4} \cdot b \cdot h^2 \quad (3)$$

kde :

$b$  – výška panelu [m]

$h$  – šířka panelu [m]

Vzorový výpočet pro materiál č.1:

$$Z_p = \frac{1}{4} \cdot 0,23 \cdot 0,00807^2$$

$$Z_p = 3,744 \cdot 10^{-6} \text{m}^3$$

**Vztah pro výpočet síly potřebné k přerušení**

$$F_f = \frac{C \cdot Z_p \cdot \sigma_y}{L} \quad (4)$$

kde:

- $F_f$  síla potřebná k přerušení [N]  
 $C$  konstanta rozložení zatížení, zde  $C=4$   
 $Z_p$  moment plochy při přerušení [ $m^3$ ]  
 $\sigma_y$  mez kluzu [ $N/m^2$ ]  
 $L$  délka sendvičového panelu [m]

Vzorový výpočet síly potřebné k přetržení pro materiál č.1:

$$F_f = \frac{4,3,744 \cdot 10^{-6} \cdot 839 \cdot 10^5}{1}$$
$$F_f = 1256,4 \text{ N}$$

**4.2.2 Výpočet průhybu****Vztah pro výpočet moment v ohybu**

$$M = Z_p \cdot \sigma_y \quad (5)$$

kde:

- $M$  moment v ohybu [ $N \cdot m$ ]  
 $Z_p$  moment plochy při přerušení [ $m^3$ ]  
 $\sigma_y$  pevnost na mezi kluzu [ $N/m^2$ ]

Vzorový výpočet pro materiál č.1 :

$$M = 3,744 \cdot 10^{-6} \cdot 839 \cdot 10^5$$
$$M = 314 \text{ N.m}$$



**Vztah pro kvadratický moment plochy**

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad (6)$$

kde:

I kvadratický moment plochy [m<sup>4</sup>]

b šířka sendvičového panelu [m]

h výška sendvičového panelu [m]

Vzorový výpočet kvadratického momentu plochy pro materiál č.1:

$$I = \frac{1}{12} \cdot 0,23 \cdot (8 \cdot 10^{-3})^3$$

$$I = 1,00732 \cdot 10^{-8} \text{m}^4$$

**Vztah pro výpočet průhybu**

$$\delta = \frac{M \cdot L^2}{C_1 \cdot E \cdot I} \quad (7)$$

kde:

 $\delta$  průhyb [m]

M moment v ohybu [N·m]

L délka sendvičového panelu [m]

C<sub>1</sub> konstanta rozložení zatížení. Zde je to 48E Youngův modul [N/m<sup>2</sup>]I kvadratický moment plochy [m<sup>4</sup>]

Vzorový výpočet průhybu pro materiál č.1 :

$$\delta = \frac{314,17 \cdot 1^2}{48,6,82 \cdot 10^9 \cdot 1,00732 \cdot 10^{-8}}$$

$$\delta = 0,0952 \text{ m}$$

Tabulka 4. Výpočty pro různé materiály

Materiál	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (0,5/7,7/8,7)	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (1/10/12)	AF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (1/5/7)	Javor 7vrstvý laminát (x/x/11,48)
Index	1	2	3	4
$Z_p[m^3]$	3,74E-06	8,28E-06	2,82E-06	7,58E-06
$F_f[N]$	1,26E+03	3,74E+03	1,22E+03	3,91E+02
$M[Nm]$	3,14E+02	9,36E+02	3,06E+02	9,78E+01
$I[m^4]$	1,01E-08	3,31E-08	6,57E-09	2,90E-08
$\delta[m]$	9,53E-02	6,40E-02	1,25E-01	5,09E-03

### Materiálový index

Vztah pro maximalizaci tuhosti v ohybu při minimální hustotě

$$M = \frac{E_{flex}^{\frac{1}{3}}}{\rho} \quad (8)$$

Tabulka 5. Porovnání materiálových indexů M

Index	Materiál	M [GPa <sup>1/3</sup> /kg·m <sup>3</sup> ]
1	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (0,5/7,7/8,7)	11,87
2	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (1/10/12)	9,97
3	AF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (1/5/7)	6,21
4	Javor 7vrstvý laminát (x/x/11,48)	3,57

Výpočet ceny a hmotnosti - pro výpočet ceny a hmotnosti použijeme rovnice č.1 a č.2.

Tabulka 6. Porovnání senvičového materiálu s přírodním

Index	Materiál	Jednotková cena [CZK]	Hmotnost [kg]	Výška [mm]	Průhyb [cm]
1	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (0,5/7,7/8,7)	318,41	0,409	8,07	9,52
2	CF UD-prepreg QI lay-up, EPS 30 (1/10/12)	632,42	0,786	12	6,39
3	AF UD-prepreg QI lay- up, EPS 30 (1/5/7)	893,05	0,668	7	12,46
4	Javor 7vrstvý laminát (x/x/11,48)	67,76	1,866	11,48	0,5

## Diskuze

Z grafů vytvořených v praktické části práce můžeme pozorovat, že mechanické vlastnosti sendvičového panelu v rámci jednoho typu materiálu závisí hlavně na hustotě panelu. Hustota panelu je daná jak tloušťkou pěny, tak i tloušťkou vnější vrstvy – potahu.

Z tabulky č. 4 můžeme brát jako nejlepší materiál pro sendvičový panel materiál s číslem 2: CF UD-prepreg, QI lay-up, expanded PS s geometrií: 30 (1/10/12). Sendvičový panel složený z tloušťky 1mm potahu připraveného z jednosměrných uhlíkových vláken prosycených epoxidovou pryskyřicí a tloušťkou jádra 10 mm pěnového PS. Tento sendvič má nejlepší hodnoty Youngova modulu (9,2 GPa), pevnost na mezi kluzu (113 MPa) i nejvyšší hodnoty síly potřebné k přerušení (3740 N). Z hodnot materiálových indexů z tab. č.5 vychází, že nejlepší materiál pro sendvičový panel je materiál č.1. Jak však vidíme dále v tab. č.4, hodnoty síly potřebné k přerušení i hodnoty průhybu jsou v porovnání s materiálem č.2 poněkud horší. Jak lze pozorovat z tab.č.6 hmotnost materiálu č.1, je velmi příznivá (0,409 kg), materiál č.3 má naproti tomu nejmenší tloušťku 7 mm celého panelu. Přírodní laminát z javoru se 7-mi vrstvami laminát má velmi nízkou cenu (67,7 CZK). V zadání práce bylo cílem minimalizovat hmotnost a cenu, kde se materiál č.1 jeví jako nejvhodnějším kandidátem nebo-li jako alternativa namísto přírodního materiálu z javoru pro návrh longboardu. V porovnání s přírodním materiálem č. 4 (laminát z javoru) má materiál č.1, hmotnost o 78 % nižší, a výšku longboardu nižší o 29 %. Cena přírodního materiálu je však o 79 % nižší než cena kompozitního materiálu č.1.

## ZÁVĚR

Úspěšně jsem nesyntetizoval v programu CES Edupack kompozitní sendvičové panely z netoxických materiálů a porovnal jejich vlastnosti. Získal jsme přehled o trendu chování složky sendvičových materiálů v závislosti na jejich hustotě a tloušťce panelu. Porovnáním mezi kompozitními sendvičovými materiály a přírodním laminátem z javoru jsem zjistil, že lepší mechanické vlastnosti mají syntetické kompozitní materiály. Navíc mají excelentní odolnost vůči vodě, a jsou tedy velmi vhodnými materiály pro výrobu dopravních prostředků. Výborná únavová pevnost sendvičových materiálu nám dává předpoklad pro spolehlivost jízdy, a tedy i zachování bezpečnosti jezdce. Z hlediska materiálového indexu, kdy požadujeme co nejvyšší tuhost při co nejnižší hustotě se nám jeví neoptimálnější sendvičový prvek složený z kompozitní laminy z uhlíkových vláken (CF UD-prepreg, QI lay-up) s jádrem z pěnového PS o hustotě  $30 \text{ kg/m}^3$  s geometrií: tloušťka vnější vrstvy 0,5 mm; jádro o tloušťce 7,7 mm a celková tloušťka sendvičového panelu 8,7 mm, dané hodnotou  $M \sim 12 \text{ GPa}^{1/3}/\text{kg}\cdot\text{m}^3$ . Jedinou nevýhodou je vyšší cena. Ceny tedy jsou pravděpodobně důvodem, proč výrobci preferují jako materiál longboardu z javoru nebo bambusu. Ceny longboardu (komplet včetně koleček a trucků) z javoru na trhu začínají již od 500 CZK za kus, u levnějších longboardu tedy není prostor pro použití kompozitního materiálu. V současnosti dochází k rozvoji elektrických longboardů jako dopravních prostředků. U elektrického longboardu je kladem větší nárok na minimalizaci hmotnosti, a to kvůli dalším komponentům jako jsou elektronika, baterie, motory, které navyšují hmotnost celého longboardu. Ceny elektrických longboardu mají taky větší finanční rozsah, a lépe se tedy schová rozdíl vyšší ceny sendvičového materiálu ze syntetických kompozitů. Je tedy zde prostor pro větší rozšíření sendvičového typu longboardu na trhu do budoucna.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ŠUBA O. Dimenzování a navrhování výrobků z plastů. UTB Zlín 2005. 112s
- [2] EHRENSTEIN. Gottfried W.: Polymerní kompozitní materiály. 1.vyd. V ČR, ISBN: 978-80-86960-29-6, 2009. 351s
- [3] JANČÁŘ. Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno:FCH VUT , 2013. 194s
- [4] SILVA Arlindo, The Role of Digital Libraries in Teaching Materials Science and Engineering. Lisbon:University of Lisbon, 2017 1804s
- [5] GUPTA, M. C. Polymer Composites. New Academic Science 2019. 186s
- [6] MALLICK P.K. Composites Engineerig Handbook. CRC Press, 1997. 1264s
- [7] MALLICK P.K. Processing of Polymer Matrix Composites: Processing and Applications. CRC Press 2017. 356s
- [8] WHITE J. R. Short Fibre-Polymer Composites. Woodhead Publishing, 1996. 272s
- [9] GUEDES R. M. Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites. Woodhead Publishing, 2019. 586s
- [10] SUMMERSCALES J. Microstructural Characterisation of Fibre-Reinforced Composites. CRC Press, 1998. 320s
- [11] Běhálek L. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [12] CHAWLA K. K., Composite materials: Science and Engineering, Springer, 1998. 195s
- [13] FEHRI M., FAKHREDDINE D. Improvement of natural Fiber Composite Materials by Carbon Fibers 2017
- [14] CAMPILHO R.D.S.G. Natural Fiber Composites.CRC Press 2015. 340s
- [15] MATTHEWS F.L., RAWLINGS R.D. Composite Materials: Engineering and Science . Woodhead Publishing 1999. 480s
- [16] Ghost A. K, Dwiedi M. Processability of Polymeric Composites. Springer 2020. 270s
- [17] Campbell F. C. Structural Composite Materials. ASM International 2010. 599s
- [18] Analysis of Sandwich Structures by the FEM. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/ajme/5/6/2/>
- [19] ZENKERT D. THE HANDBOOK OF SANDWICH CONSTRUCTION. Engineering Materials Advisory Services Ltd 1997, 442s

- [20] BITZER T.N. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing. Springer 1997, 243s
- [21] SHAU T.L. Polymeric Foams: Innovations in Processes, Technologies, and Products 2016, 406s
- [22] Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications. Dostupné z: [https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20130201\\_105501\\_16344\\_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf](https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20130201_105501_16344_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf)(online)
- [23] Sandwich structures. Dostupné z: <https://www.flight-mechanic.com/sandwich-structures/>
- [24] Sandwich Constructions USNA. Dostupné z: [https://www.usna.edu/Users/mecheng/pjoyce/composites/Short\\_Course\\_2003/13\\_P\\_AX\\_Short\\_Course\\_Sandwich-Constructions.pdf](https://www.usna.edu/Users/mecheng/pjoyce/composites/Short_Course_2003/13_P_AX_Short_Course_Sandwich-Constructions.pdf) (online)
- [25] FUSS .F.K., SUBIC A., STRANGWOOD M. Routledge Handbook of Sports Technology and Engineering. Routledge 2013 528s
- [26] Ashby M.F. Materials Selection in Mechanical Design. Elsevier Ltd. 2011. 493s
- [27] Tenglongsealingss.com Dostupné z: <http://www.tenglongsealingss.com/heat-insulation/fiberglass-products/texturized-fiberglass-cloth.html>
- [28] Sklocement.cz Dostupné z: <http://sklocement.cz/sklenena-vlakna-cem-fil/cem-mat/>
- [29] Direct Industry Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/owens-corning/product-37816-259793.html>
- [30] Caramilla Dostupné z: <https://www.caramilla.cz/wp-content/uploads/2019/03/tkane-textilie-tri-druhy-vazeb-caramilla-kepr-platno-atlasova.png>
- [31] Fellow skateboards Dostupné z: <https://www.fellowskateboards.com/>
- [32] Hydroflex Technology Dostupné z: <https://www.hydroflex.com/>
- [33] BERGER Matt. The Handmade Skateboard: Design & Build a Custom Longboard, Cruiser, or Street Deck from Scratch Spring House Press, 2014. 160s

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

DSC Diferenciální skenovací kalorimetrie

DMA Dynamická mechanická analýza

Pa Pascal

MPa Megapascal

GPa Gigapascal

s Sekunda

h Hodina

MHz Megahertz

μm Mikrometr

mm Milimetr

m Metr

kg Kilogram

T<sub>g</sub> Teplota skelného přechodu

N Newton

UV Ultrafialové

UD Unidirectional – jednosměrné

QI Quasi isotropic – kvazi-izotropní

CF Carbon fiber – uhlíková vlákna

AF Aramid fiber – Aramidová vlákna

W Woven - tkanina

HCN Kyanovodík

DH Divinylcell

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Porovnání objemu materiálů prodeje v USA [25].	11
Obrázek 2. Polymerní prekurzory.	13
Obrázek 3. Volné molekuly.	14
Obrázek 4. Zesíťované polymery.	14
Obrázek 5. Závislost viskozity termoplastu na smykové rychlosti [7].	18
Obrázek 6. Tkanina [27] rohož [28] a pramenec [29].	19
Obrázek 7. Vazby tkaniny [30].	20
Obrázek 8. Závislost meze pevnosti v tahu na průměru vlákna [7].	22
Obrázek 9. Závislost E-modul na délce vlákna [7].	22
Obrázek 10. Závislost E-modul na poměru délky a průměru vláken [7].	23
Obrázek 11. Uhlíková vlákna/epoxidová matrice: Závislost hodnoty E-modul vláken podle směru zatížení [7].	23
Obrázek 12. Závislost modul v podélném namáhání ( $E_L$ ) a v příčném namáhání ( $E_T$ ) na objemovém podílu vláken ( $V_f$ ) [7].	24
Obrázek 13. Interdifúze [15].	25
Obrázek 14. Znázorňuje prorůstání mezi povrchem dvou materiálů [15].	25
Obrázek 15. R a X představuje chemické skupiny [15].	25
Obrázek 16. Elektrostatické vazby [15].	26
Obrázek 17. Skateboard s laminatovou konstrukcí ze 7-mi vrstev dřeva a 2-mi vrstvy uhlíkových vláken [31].	27
Obrázek 18 Skateboard představuje sendvičovou konstrukci s vnitřním jádrem z PET pěny [32].	28
Obrázek 19. Typy konfigurace buněk voštinové struktury [20].	31
Obrázek 20. Technologie ručního kladení [21].	34
Obrázek 21. Technologie stříkání laminátu [21].	34
Obrázek 22. Selhání pevnosti sendvičového panelu [24].	36
Obrázek 23. Selhání tuhosti sendvičového panelu [24].	36
Obrázek 24. Zborcení panelu sendvičového panelu [24].	36
Obrázek 25. Zmačknutí potahu sendvičového panelu [24].	37
Obrázek 26. Zborcení jádra sendvičového panelu [24].	37
Obrázek 27. Lokální stlačení sendvičového panelu [24].	37
Obrázek 28: Typy vložek a popis: 1. Šroub, nýt; 2. Otvor; 3. Drážka; 4. Spoj pomocí lepidla [19].	38
Obrázek 29 Materiálová mapa – přehled skupiny materiálu a jejich závislost Youngův modul na hustotě.	39



**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Materiály potahu.....	47
Tabulka 2: Materiály jádra.....	49
Tabulka 3: Vybrané materiály z grafů .....	54
Tabulka 4: Výpočty pro různé materiály .....	58
Tabulka 5: Porovnání materiálových indexů .....	58
Tabulka 6: Porovnání sendvičového materiálu s přírodním .....	58

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1: Závislost ohybového modulu na hustotě kompozitu .....	48
Graf 2: Závislost G-modulu na hustotě pěny .....	50
Graf 3: Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě sendvičového panelu .....	51
Graf 4: Závislost objemové ceny sendvičového panelu z různých typech pěn .....	52
Graf 5: Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě různých sendvičů .....	53

