

# Využití kompozitních materiálů pro sportovní aplikace

Radek Zavadil

---

Bakalářská práce  
2014

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek Zavadil**  
Osobní číslo: **T11304**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Využití kompozitních materiálů pro sportovní aplikace**

Zásady pro vypracování:

### I. Literární část

1. Definice kompozitních materiálů s polymerními matricemi, vlastnosti a jejich využití pro sportovní aplikace.
2. Rešerše v oblasti využití kompozitních materiálů v konstrukci lyží, snowboardů a skateboardů.
3. Přehled v oblasti zpracovatelských technologiích polymerních materiálů.

### II. Experimentální část

1. Materiálová analýza kompozitního výrobku dle doporučení.
2. Experimentální studium mechanických vlastností kompozitních materiálů s ohledem na danou aplikaci.
3. Vzájemné srovnání experimentálně dosažených výsledků, v porovnání z pohledu vhodnosti respektive nevhodnosti využití kompozitních materiálů v dané aplikaci.
4. Závěry bakalářské práce.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] Ptáček, L.: *Nauka o materiálu II*. CERM, s.r.o., Brno, 2002.

[2] Ehrenstein, G. W.: *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia Praha, 2009.

[3] Bareš, R. A.: *Kompozitní materiály*. SNTL Praha, 1988.

[4] Kořínek, Z.: *Kompozity*. Dostupné na: [www.volny.cz/korinek](http://www.volny.cz/korinek)

[5] Jančář, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno, 2003

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství


Datum zadání bakalářské práce:

**10. února 2014**


Termín odevzdání bakalářské práce:

**23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



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

Přijmení a jméno: ZAVADIL RADEK

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 1.5.2014

Z.R.

<sup>21)</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 výsledek 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 odevzdaním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>22)</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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>23)</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 vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

Ve Zlíně 15. 12. 2014

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce popisuje využití kompozitních materiálů při výrobě lyží, snowboardů a skateboardů. Seznamuje se základními typy kompozitních materiálů s polymerními maticemi v konstrukci využívaných právě pro tyto tři typy sportovních nástrojů a dále přehled v oblasti zpracovatelských technologií polymerních materiálů.

Klíčová slova:

Kompozit, lyže, snowboard, skateboard

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis describes the use of composite materials in the manufacture of skis, snowboards and skateboards. It introduces basic types of composite materials with polymeric matrices used in the construction for these three types of sports instruments and an overview of the processing technology of polymeric materials.

Keywords:

Composite, ski, skateboard, snowboard

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi věnovali svůj čas a cenné rady při vypracování této práce.

Konkrétně patří dík za skvěle vedení a velkou podporu při vypracování mé práce paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D., dále pak panu Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D., za pomoc při měření a vyhodnocení testovaných vzorků.

Největší poděkování patří panu Vladimíru Kotrlovi z firmy Willer, za ochotu, velkou trpělivost a spoustu drahocenného času. Nejen že mi pomohl se samotnou výrobou lyží a poskytl mi potřebné materiály, ale hlavně mi věnoval spoustu cenných praktických rad ohledně zpracování kompozitních materiálů.

Dále chci poděkovat Panu Ladislavu Pokludovi za konzultaci ohledně materiálů lyží, svému spolužákovi Petrovi Komínkovi za pomoc při samotné výrobě a Panu Michalu Malinovi z firmy Sporten, za čas který mi věnoval, důležité materiály a provedené měření vyrobených lyží spolu s vyhodnocením.

Neméně důležitý dík patří také mé rodině, jak za morální, tak finanční podporu po celou dobu mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze v elektronické podobě nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

ÚVOD.....	10
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S POLYMERNÍMI MATICEMI .....</b>	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI.....	14
1.1.1 Homogenita a nehomogenita.....	14
1.1.2 Izotropie a anizotropie.....	14
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	15
1.2.1 Podle velikosti částic výztuže .....	15
1.2.2 Podle disperzní fáze .....	16
1.2.3 Podle typu matrice.....	16
1.2.4 Podle tvaru výztuže .....	17
1.3 POLYMERNÍ MATRICE .....	19
1.3.1 Reaktoplastické .....	19
1.3.2 Termoplastické.....	20
1.4 VÝZTUŽNÝ SYSTÉM.....	21
1.5 VYUŽITÍ PRO SPORTOVNÍ APLIKACE .....	21
<b>2 ŘEŠENÍ V OBLASTI VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....</b>	<b>23</b>
2.1 KONSTRUKCE LYŽÍ .....	23
2.1.1 Sendvičová konstrukce.....	23
2.1.2 Torzní box (krabicová konstrukce) .....	24
2.1.3 Capová (skořepinová) konstrukce.....	25
2.1.4 Hybridní (Half-Cap) konstrukce .....	27
2.2 KONSTRUKCE SNOWBOARDŮ.....	27
2.3 KONSTRUKCE SKATEBOARDŮ.....	29
<b>3 PŘEHLED V OBLASTI ZPRACOVATELSKÝCH TECHNOLOGIÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>30</b>
3.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ .....	30
3.2 NANÁŠENÍ SPREJEM.....	31
3.3 RTM (RESIN TRANSFER MOULDING) - LISOVÁNÍ SE VSTŘIKEM .....	32
3.4 VAKUOVÁ INFÚZE .....	33
3.5 VAKUOVÉ LISOVÁNÍ PREPREGŮ .....	34
3.6 PULTRUZE .....	36
3.7 NAVÍJENÍ.....	36
3.8 SMC (SHEET MOLDING COMPOUND) – PLOŠNÉ VÝLISKY S POLYMERNÍ MATICÍ.....	37
3.9 TECHNOLOGIE VÝROBY LYŽÍ A SNOWBOARDŮ .....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>40</b>
<b>4 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>41</b>
<b>5 SKATEBOARDY .....</b>	<b>42</b>
5.1 MATERIÁLOVÁ ANALÝZA ZKOUMANÝCH SKATEBOARDŮ .....	42
5.1.1 Skateboard č. 1 (červený s černou výztuží) .....	43



5.1.2	Skateboard č. 2 (šedý s výztuží).....	43
5.1.3	Skateboard č. 3 (červený bez výztuže).....	44
5.1.4	Skateboard č. 4 (oranžový od jiné firmy).....	44
5.2	POPIS VYBRANÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....	45
5.2.1	Popis zkoušky tříbodovým ohybem .....	45
5.2.2	Charakteristika stroje provádějícího ohybovou zkoušku .....	47
5.3	VZÁJEMNÉ SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNĚ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	48
5.3.1	Uchycení ve zkušebním stroji .....	48
5.3.2	Naměřené hodnoty .....	48
5.4	ZHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ .....	50
5.4.1	Skateboard č. 1 .....	50
5.4.2	Skateboard č. 2 .....	51
5.4.3	Skateboard č. 3 .....	51
5.4.4	Skateboard č. 4 .....	52
<b>6</b>	<b>LYŽE .....</b>	<b>53</b>
6.1	NÁVRH .....	53
6.2	POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ .....	54
6.3	KONSTRUKCE SKELNÉ LYŽE A .....	56
6.4	KONSTRUKCE UHLÍKOVÉ LYŽE B .....	57
6.5	POPIS VÝROBY .....	58
6.6	POPIS PROVEDENÝCH ZKOUŠEK .....	61
6.6.1	ISO 5902 – Stanovení elastických vlastností .....	61
6.6.2	ISO 6266 – Stanovení indexu únavy cyklickým ohybovým namáháním .....	62
6.7	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNĚ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	62
6.7.1	Stanovení elastických vlastností dle normy ISO 5902.....	63
6.7.2	Stanovení indexu únavy cyklickým ohybovým namáháním dle normy ISO 6266 .....	64
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>73</b>

## ÚVOD

Výborné mechanické vlastnosti, jednoduchost výroby a nízká hmotnost, to jsou hlavní přednosti kompozitních materiálů a této problematice je věnována moje bakalářská práce. Konkrétně se zaměřím na sportovní oblast, ve které se v dnešní době kompozity staly již běžně používaným prvkem. Jedná se o oblast lyžování snowboardingu a skateboardingu.

Teoretickou část věnuji základnímu pohledu do problematiky kompozitů. Zaměřím se na základní vlastnosti, rozdělení podle použitých typů materiálů s ohledem na vybrané oblasti použití. V další kapitole se věnuji důležité složce kompozitních materiálů, do které patří polymerní matrice a jejich výztužný systém spolu s krátkým náhledem do uplatnění ve sportovních aplikacích obecně. Další část se zabývá přehledem v oblasti, na kterou je tato práce především zaměřena a to jsou lyže, snowboardy a skateboardy. Zabývá se přehledem konstrukčních řešení a jednotlivými dnes používanými materiály. Konec teoretické části je zaměřen na obecný přehled technologií pro zpracování kompozitních materiálů, spolu s popisem využívaných materiálů a vhodnou aplikací, ve které se technologie uplatňují.

Praktickou část jsem rozdělil na dvě části. První se věnuje skateboardům a druhá lyžím. Podle zadání jsem u každé části provedl materiálovou analýzu spolu s popisem konkrétní konstrukce testovaného vzorku. Po důkladném popisu zkoumaných vzorků jsem vybral typy mechanických zkoušek, na kterých půjdou nejlépe zhodnotit a porovnat jejich mechanické vlastnosti a jednotlivě použité materiály s ohledem na danou aplikaci. U těchto zkoušek jsem podle norem provedl základní popis a veličiny, které nám nejlépe zprostředkují výsledky k porovnání. Velká část patří také popisu výroby lyží, které jsem sám navrhl podle dnešních typů vyráběných lyží se zaměřením na lyžařskou disciplínu skialpinismus. Poslední kapitola se věnuje vyhodnocení experimentálně dosažených výsledků spolu s porovnáním měřených vzorků mezi sebou. K vyhodnocení také patří konkrétní zhodnocení jednotlivých použitých materiálů a případně doporučení jejich modifikace nebo úplné náhrady pro dosažení všeobecně lepších výsledků.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

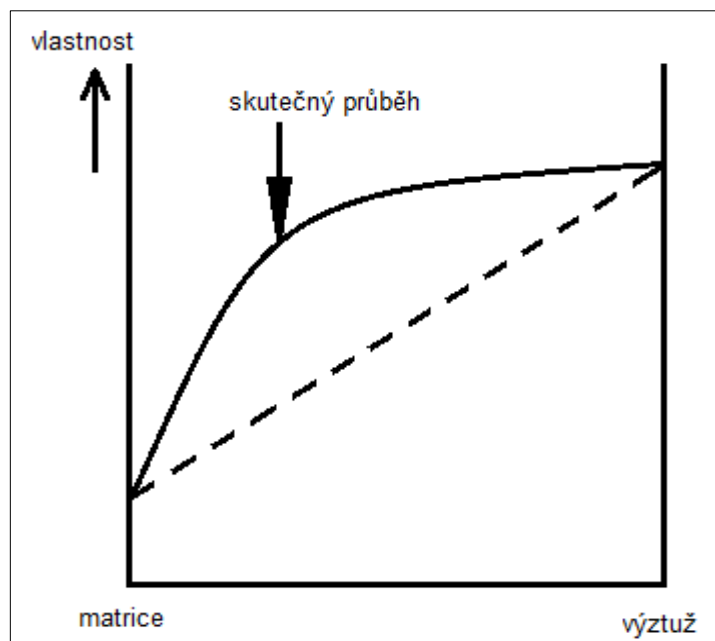
## 1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S POLYMERNÍMI MATRICEMI

V publikaci [1] autor definoval kompozitní materiály obecně jako, složení dvou nebo více fyzikálně a chemicky odlišných složek (fází). Jedna z hlavních nespojitých složek je výztuž, která má tvrdší, houževnatější a pevnější vlastnosti než spojitá a většinou poddajné pojivo, které se nazývá matrice. Materiál označující se slovem kompozit musí splňovat určitá kritéria:

- Musí mít podíl výztuže více než 5%
- Musí být vytvořen kombinací dvou a více složek
- Mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti výztuže a matrice se odlišují, výztuž je výrazně pevnější v tahu a většinou tužší než matrice [1]

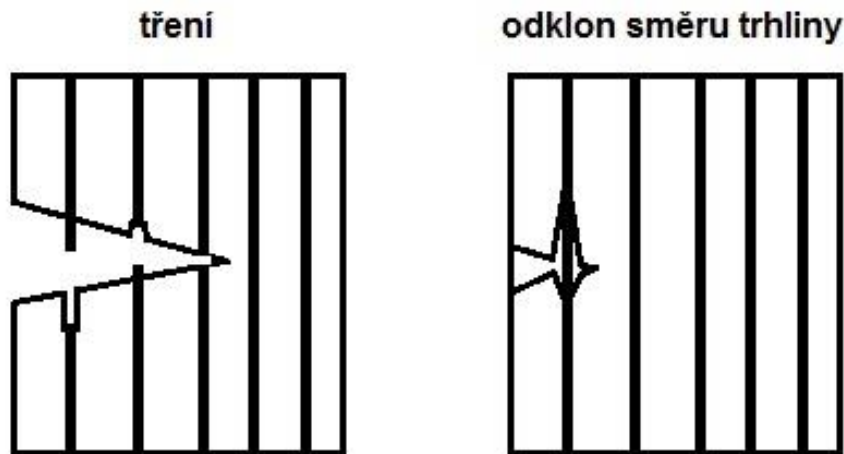
Cílem kompozitního materiálu je dostat součtem (smíšením) dvou a více různých materiálů A a B nový materiál C s lepšími vlastnostmi, než mají původní složky. [2]

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností.



Obr. 1-1 Synergické chování složek kompozitu

I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolnosti proti náhlému křehkému porušení. Uvedené chování kompozitů je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlina je bržděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde jednak k odklánění směru šíření trhliny a také k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Kvalita rozhraní mezi matricí a výztuží má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. [3]



Obr. 1-2 Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu

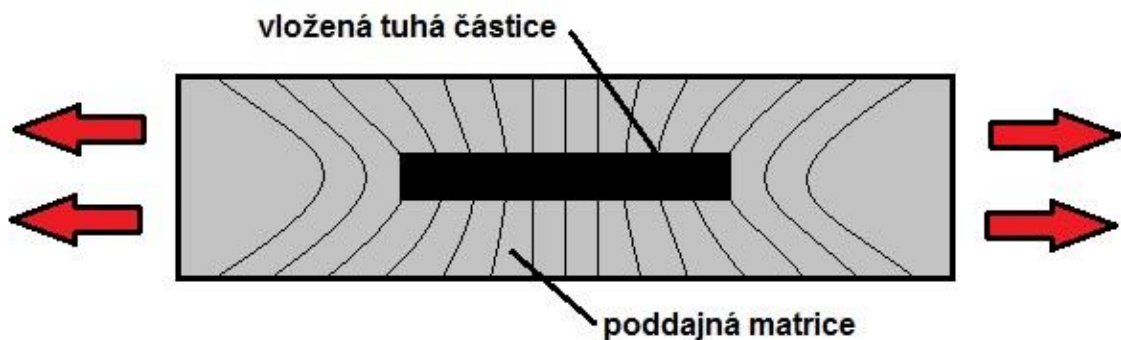
Parametry, které ovlivňují vlastnosti kompozitu, souvisí s jejich strukturou nebo s mezifázovými vztahy. Patří sem:

- *mechanické vlastnosti materiálových složek a fází* (pevnost, Poissonuv součinitel, pracovní diagram)
- *objemové zastoupení složek* (koncentrace)
- *geometrie výztužení* (tvar, velikost, uspořádání)
- *soudržnost matrice a výztuže*
- *vzájemná interakce jednotlivých fází a složek* [4]

## 1.1 Základní vlastnosti

### 1.1.1 Homogenita a nehomogenita

V atomárním měřítku je každý technický materiál nehomogenní. Proto je nutné požadovat, aby nehomogenity v kompozitu byly v mnohem větším měřítku než atomárním. Musí přitom být ale dostatečně malé, aby bylo možné v makroměřítku srovnatelném s rozměry konstrukčních dílů z tohoto kompozitu považovat tento kompozit za homogenní materiál. Kompozit je tedy vnitřně nehomogenní, ale z makroskopického hlediska homogenní, vede k zavádění vlastností kompozitního materiálu, které často bývají jen fiktivní.



Obr. 1-3 Část kompozitu, deformovaná tahovým jednoosým napětím

Při působení tahového napětí se tuhá částice protáhne, a z jejího prodloužení lze spočítat její relativní deformaci. Matrice se naopak protahuje v různých místech různě, protože jí v tom zabraňuje tuhá částice. Avšak je také možné změřit (nebo spočítat) v různých místech relativní deformaci. Kompozit jako celek se také protáhne o určitou hodnotu, toto protažení je možné změřit a spočítat z něj relativní deformaci kompozitu jako celku. Pro konstrukční účely je tato hodnota velmi důležitá, ve skutečnosti se ale žádná složka takto nedeformuje, jde jen o fiktivní hodnotu, kterou je nutné spočítat z deformací částice a matrice. [5]

### 1.1.2 Izotropie a anizotropie

U polymerních kompozitů s uspořádanými vlákny (skleněnými, uhlíkovými) se jejich tuhost nebo pevnost ve směru vláken a kolmo na ně výrazně liší, dokonce až o několik řádů. Proto je nutné s anizotropií u kompozitních materiálů vždy počítat. Základní rozdělení materiálů z hlediska symetrie jeho vlastností jsou:

- a) Izotropní materiál – má ve všech směrech stejné mechanické vlastnosti. Kdyby se nanesly vektory vlastností od počátku souřadného, tak by vznikla koule.
- b) Anizotropní materiál – má vlastnosti v každém směru jiné a při nanesení jednotlivých vektorů vlastností od počátku souřadného systému, by koncové body vytvořily obecnou plochu
- c) Pseudoizotropní materiál (kvaziizotropní) materiály – má vlastnosti stejné ve směru tří základních os a jsou symetrické podle tří rovin tvořených těmito osami. Při nanesení vektorů vlastností od počátku souřadného systému, vytvořily by koncové body například krychli.
- d) Ortotropní materiál – má vlastnosti symetrické podle tří navzájem kolmých rovin. Ve třech kolmých směrech tvořených průsečnicemi těchto rovin (tzn. hlavní směry) má vlastnosti vzájemně různé, ale bez typických efektů anizotropie (např. při stlačení v tomto směru dojde jen k deformaci ve směru síly, ve všech ostatních směrech deformace nemá směr síly). Kdybychom nanesli na jednotlivé vektory vlastností od počátku souřadného systému, vytvořily by koncové body například kvádr.
- e) Příčně izotropní materiál – je typický pro kompozitní materiály, má izotropní vlastnosti v určité rovině. Vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i na sebe vzájemně kolmých. Průsečnice těchto dvou rovin je hlavní osa. Kdybychom nanesli jednotlivé vektory vlastností od počátku souřadného systému, vytvořili by koncové body rotační elipsoid. [5]

Pokud není kompozit příčně izotropní, je z pravidla zcela izotropní. Jiné případy anizotropie jsou u kompozitních materiálů výjimečné.

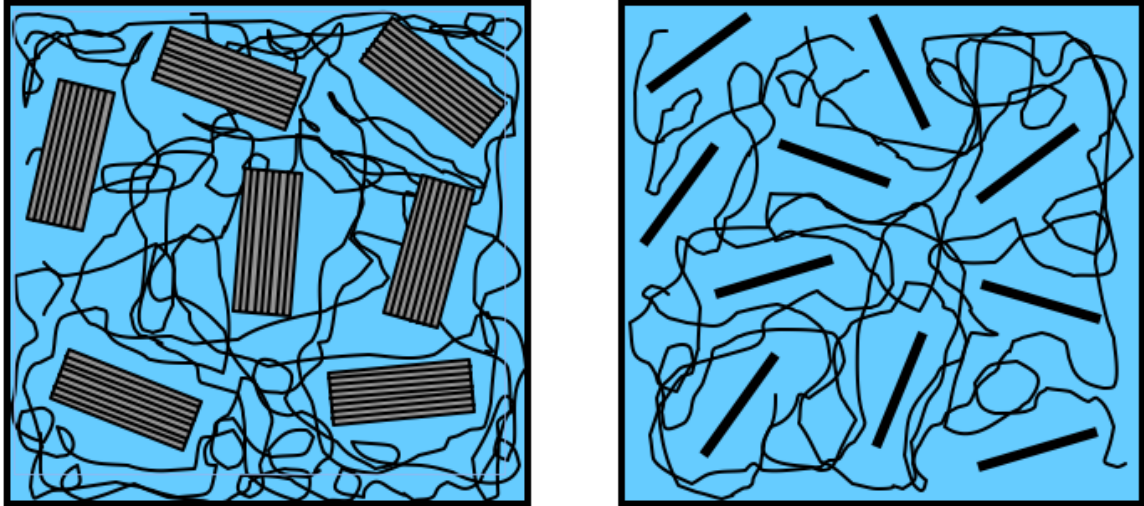
## 1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Lze je rozdělit do skupin podle typu, povahy a velikosti výztuže nebo podle druhu matrice.

### 1.2.1 Podle velikosti částic výztuže

- Mikrokompozitní materiály – jejich největší příčné rozměry výztuže, jsou v rozmezí 100 až 102  $\mu\text{m}$ , mají největší význam v průmyslu
- Makrokompozitní materiály – obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru 100 až 102 mm, jsou používány především ve stavebnictví

- Nanokompozitní materiály - mají rozměry výztuže (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách nm, hrají velkou roli ve výpočetní technice, zdravotnictví, v oblasti filtrace atd. [1]



Obr. 1-4 Rozdíl mezi nanokompozitem (vlevo) a mikrokompozitem (vpravo)

### 1.2.2 Podle disperzní fáze

Každý kompozit musím mít jednu složku, která je v celém rozsahu spojitá a určuje tvar a rozměry (drží ho pohromadě). Tato složka se označuje jako matrice. Všechny ostatní složky jsou zpravidla v matrici rozptýleny – dispergovány a proto se označují jako disperze. Tři základní typy rozdělení podle disperze:

- Kompozit prvního typu – má disperze (jednu nebo více) z pevné fáze. Tyto kompozity se používají nejčastěji v technice.
- Kompozit druhého typu – má kapalnou disperzi. Tento druh je méně používány, patří sem některé pórovité struktury s póry vyplněnými např. mazacím olejem. Kapalina může být buď v uzavřených, nebo otevřených pórech.
- Kompozit třetího typu – má plynnou disperzi. Patří sem pěnové materiály i různé vláknové struktury s vlákny buď slinutými, nebo spojenými malým množstvím pojiva [5]

### 1.2.3 Podle typu matrice

- Kompozity s polymerní matricí (Plastic Matrix Composites – PMC)
- Kompozitní materiály s kovovou matricí (Metal Matrix Composites – MMC)



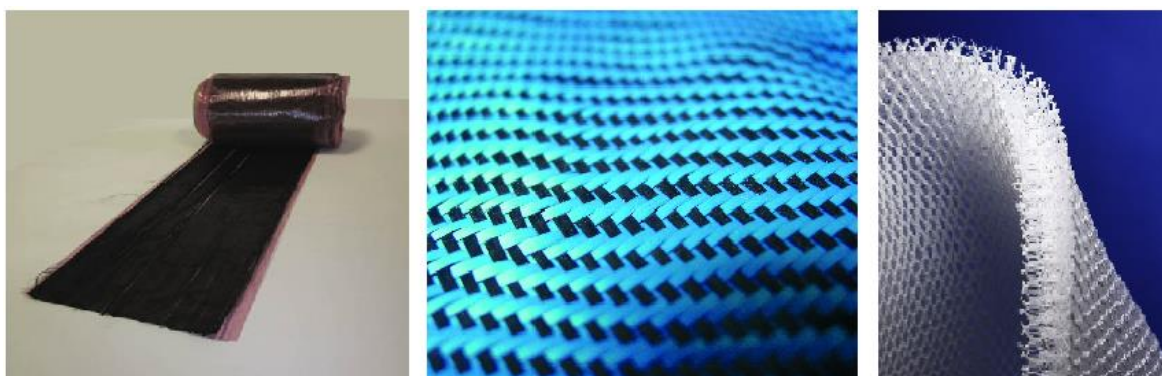
- Kompozitní materiály s keramickou maticí (Ceramic Matrix Composites – CMC)
- Kompozitní materiály se skleněnou nebo sklokeramickou maticí
- Kompozitní materiály s uhlíkovou maticí [1], [5]

#### 1.2.4 Podle tvaru výztuže

Tvar jednotlivých částí disperze má podstatný vliv na anizotropii vlastností i na způsobu interakcí mezi maticí a disperzí.

Podle tvaru disperze se kompozity dělí:

- Částicové - disperze je ve tvaru částic, buď:
  - izometrických – kompozit je zpravidla izotropní
  - anizometrických – částice jsou ve tvaru destiček nebo jehliček a mohou být
    - náhodně orientované
    - orientované
- Vláknové - disperze je ve tvaru vláken
  - jednovrstvé
    - kontinuální vlákna
      - 1D (jednosměrná)
      - 2D (tkaniny, rohože)
      - 3D (tkaniny, rohože)



Obr. 1-5 1D, 2D a 3D uspořádání vláken

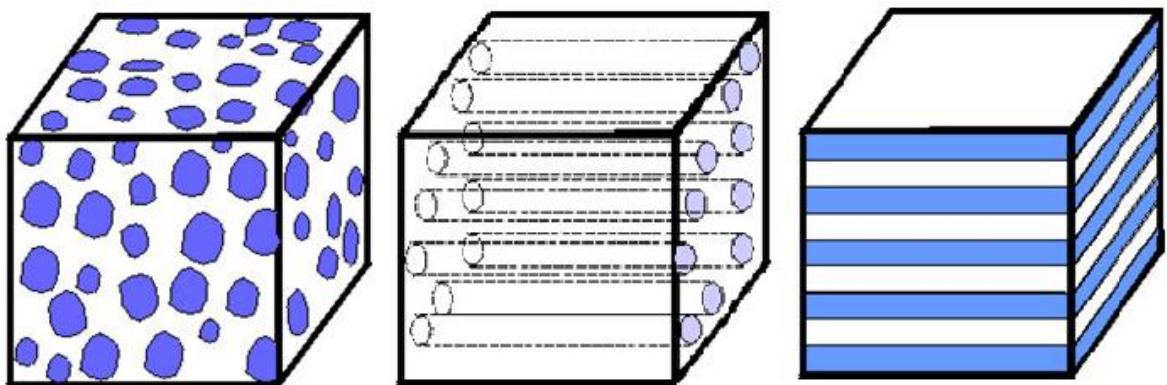
- diskontinuální vlákna
  - náhodná orientace
  - orientované

- vícevrstvé
  - lamináty
  - sendviče
    - distanční tkaniny
    - voštiny
    - polymerní pěny
    - syntaktické pěny



*Obr. 1-6 Laminátová konstrukce skateboardu a sendvičová konstrukce s voštinovým jádrem*

- Deskové – matrice i disperze jsou složeny ze vzájemně se střídajících desek, většinou nelze dobře rozlišit co je matrice a co disperze.



*Obr. 1-7 Částicové, vláknové a laminární [1]*

### 1.3 Polymerní matrice

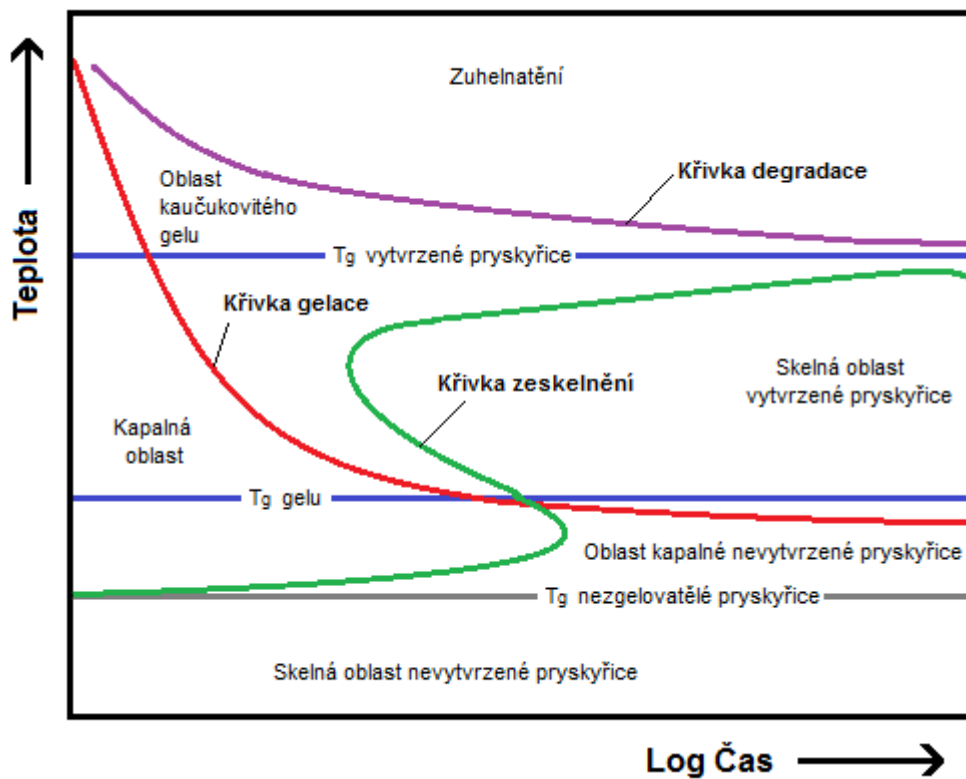
Spojité složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna. Polymerní matrice jsou výrazně poddajnější než vlákna, pevnost v tahu je u všech matric menší, než je pevnost vláken (u polymerních matric až o dva řády). Pro kompozitní materiály s kontinuálními vlákny se nejvíce používají reaktoplastické nebo termoplastické matrice.

#### 1.3.1 Reaktoplastické

U reaktoplastů je nutný proces vytvrzování, je to proces, který vede k vytvoření prostorové makromolekuly s nekonečnou molární hmotností. Vytvrzování probíhá při určité teplotě rychlostí závislou na druhu pryskyřice a typu tvrdidla. Některé technologie vyžadují přídavek urychlovače, aby byla zkrácena doba vytvrzování za studena, naopak ve směsích pro technologii lisovací technologii (SMC) zase bývá inhibitor reakce pro prodloužení skladovací doby prepregu za normální teploty.

Velmi důležitou charakteristikou vytvrzovacího procesu je tzv. doba gelace (želatinace), po jejímž uplynutí se viskózní pryskyřice změní na elastickou tuhou hmotu s malým modulem pružnosti (kaučukovitého chování). Od tohoto okamžiku již pryskyřice ztrácí schopnost protékat a vzlínat mezi vlákny výztuže. Doba gelace je pro danou teplotu vytvrzování možno zjistit těmito metodami:

- 1) měřením dielektrických vlastností směsi pryskyřice-tvrdidlo. Ztráta pohybnosti makromolekulárních řetězců se výrazně projeví na křivce dielektrických ztrát
- 2) měřením změn mechanických ztrát u ultrazvukem rozkmitávané jehly, ponořené do aktivované pryskyřice (patent firmy RAPRA, UK)
- 3) hodnocením změn viskozity pryskyřice. Kinetiku vytvrzovací reakce pryskyřice lze v případě čisté pryskyřice (bez rozpouštědla) znázornit v digramu TTT (“Time-Temperature-Transformation“) viz obr. 1-8 [1]



Obr. 1-8 Diagram TTT

### 1.3.2 Termoplastické

Kompozity s termoplastickou maticí se mohou dodatečně tvarovat nebo svařovat. Po zchlazení matrice jsou kompozity hotové k použití, dají se skladovat na neomezenou dobu, při zvýšené teplotě však změknu. Se sníženým obsahem vláken v kompozitu se zvyšuje sklon ke zkrucování.

Termoplastické matrice s kontinuálními vlákny poskytují oproti reaktoplastickým tyto výhody:

- prepregy mají neomezenou skladovací dobu
- při použití vhodných termoplastů má matrice výbornou chemickou odolnost, neabsorbuje vlhkost, oproti nemodifikovaným reaktoplastům a má velmi dobrou houževnatost
- výroba dílů tvarováním ohřátých desek je velmi produktivní, při spojování desek je nutno matici natavit, tuhnutí matrice závisí na rychlosti odvodu tepla

Jejich nevýhodou je nízká tepelná odolnost a výrazně vyšší cena oproti reaktoplastickým.

## 1.4 Výztužný systém

Hlavním úkolem výztuže v kompozitním materiálu je především zajistit mechanické vlastnosti materiálu, jako je tuhost a pevnost. Na výztuži však záleží i elektrické vlastnosti, a proto typ výztuže má klíčový vliv na vlastnosti profilu.

Konstrukční profily jsou často vystaveny zatížení, které působí kolmo k jejich délce. Tyto profily musí být schopné odolávat tahům a napětí vyvolaném při odstraňování šroubu atd. Proto se používá nejen jednosměrně orientovaný roving, ale také roving s příčně orientovanými vlákny. Je možné také použít i rohože a tkaniny s různou orientací vláken. Rohože a tkaniny s orientací vláken mezi 45° a 90° zásadně zvyšují odolnost proti napětí vyvolanému při odstraňování šroubů a zlepšují mechanické vlastnosti v příčném směru.

Běžně používaným typem výztuže je:

- skleněné vlákno - dodává kompozitu všeobecně dobré vlastnosti
- uhlíkové vlákno – přidává vysokou tuhost
- kevlarové vlákno – zvyšuje odolnost proti rázům [6]



Obr. 1-9 Typy vláken (skelné, uhlíkové, kevlarové)

## 1.5 Využití pro sportovní aplikace

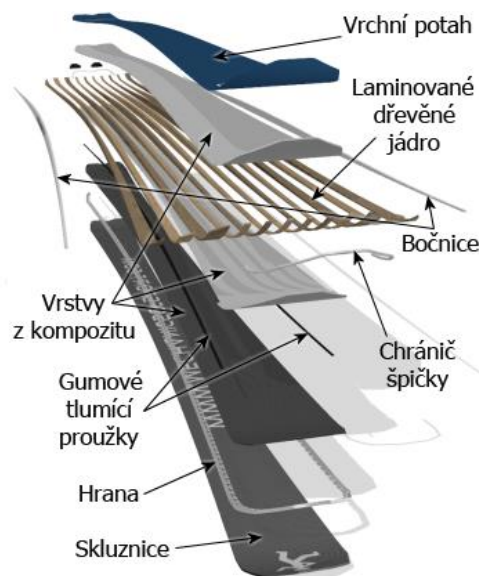
Pro výrobu sportovního náčiní je kompozitních materiálů využíváno velice velké množství. Je téměř nemožné najít sportovní odvětví, ve kterém žádný výrobce nenabízí kompozitní výrobky. Výroba sportovních potřeb z kompozitních materiálů je velice komplikovaná, ale vývoj jde rychle kupředu, protože se v tomto odvětví pohybuje významná část světového kapitálu. Výrobci sportovních potřeb neváhají vynaložit astronomické částky na vývoj a výrobu nových materiálů. Vyžadují to především složité 3D tvary, které vyžadují nestandardní formy, ze kterých by nebylo možné výrobek vyndat, nebo je nutné materiály spojovat. Takto je vyráběna řada sportovního náčiní. Například při výrobě vysokotlakou meto-



## 2 ŘEŠENÍ V OBLASTI VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

### 2.1 Konstrukce lyží

Moderní lyže pro sjezdy se skládají z nosných částí, jádra, hran, skluznice a u některých modelů z vnitřních, či eventuálně vnějších tlumících prvků. Podle uspořádání nosných prvků rozeznáváme následující níže uvedené typy konstrukcí lyží, je však nutné brát ohled na to, že většina výrobců dané typy konstrukcí v hojně míře kombinuje, případně doplňuje o vlastní řešení výztuh a jiných prvků. [7]

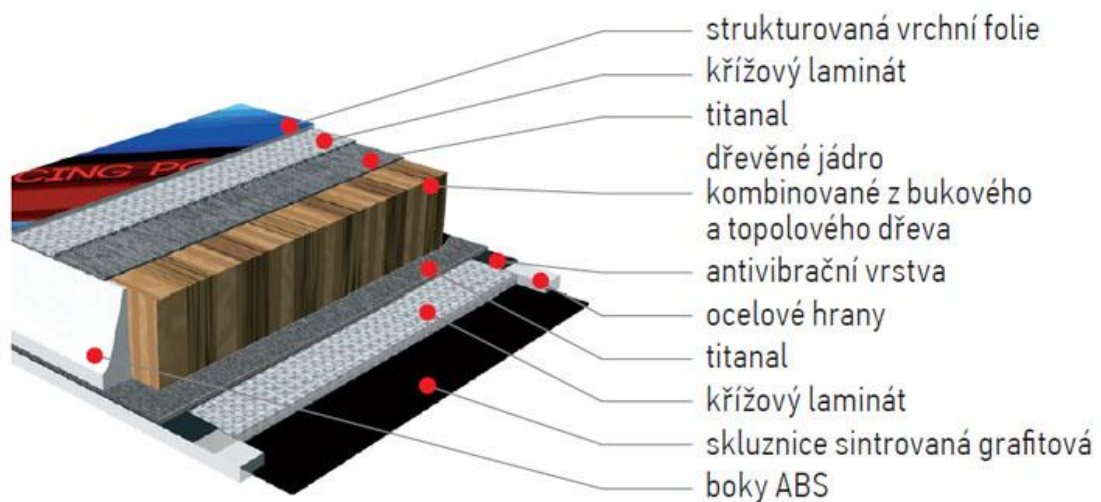


Obr. 2-1 Složení lyže [8]

#### 2.1.1 Sendvičová konstrukce

Tato konstrukce pochází již z počátku 60. let 20. století a ještě před dvaceti lety byla touto technologií vyráběna podstatná část produkce. Dnes je tato konstrukce, která vyniká pružností a torzní tuhostí, používána především pro ostřejší verze závodních lyží a dražší sjezdové lyže. Základem konstrukce jsou dva nosné plátky (nazývají se podle hlavního druhu jejich namáhání - spodní jako tahový a vrchní jako tlakový) vyrobené z laminátu ze skelných, karbonových či kevlarových vláken, eventuálně jejich kombinace, nebo z kovových slitin na bázi hliníku (v poslední době se nejčastěji používá legovaná slitina hliníku – jedná se o již zmíněný Titanal), případně ještě jejich kombinace s lamináty. Mezi těmito nosnými plátky je jádro. To je dnes vyráběno jako složitý skládaný dřevěný slepenec nebo může být vyrobeno na umělohmotné bázi v kombinaci s kovovými vyztužovacími prvky a měkkými tlumícími materiály. Dřevěné jádro je však stále považováno za vynikající řešení, které

dává lyži charakter a vynikající pružnost. O něco horší je to s torzní tuhostí. Technologicky jsou lyže s dřevěným jádrem náročné. Ke konstrukci se dále přidají hrany a skluznice a celý komplet je za vysoké teploty a tlaku slepen do jednoho pevného celku. Celá tato operace je technologicky poměrně náročná – lyže je ve speciální vytvrzovací peci doslova spečena. Na horní plát se ještě může aplikovat tenká vrstva s potiskem, ale není to nutné. [7], [9]

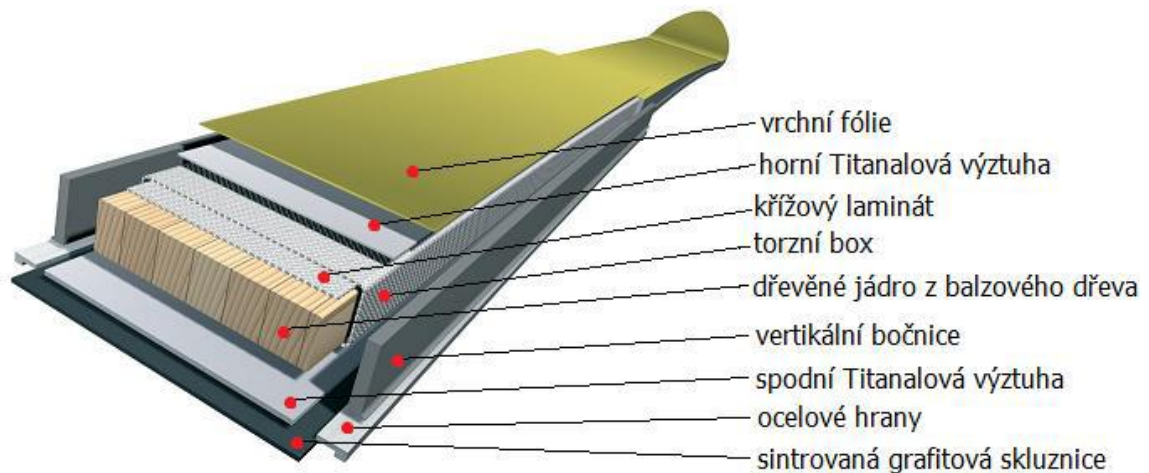


Obr. 2-2 Sendvičová konstrukce lyže Sporten AHV 06 GS (12/13) [10]

### 2.1.2 Torzní box (krabicová konstrukce)

Tuto technologii vyvinuly některé firmy (např. K2, Dynamic a Völkl) ve snaze zlepšit mechanické vlastnosti lyže, zejména její torzní tuhost při zachování, nebo dokonce snížení váhy oproti sendvičové technologii. Nejčastěji se jednalo o několikanásobné ovinutí skelné tkaniny, většinou v kombinaci s karbonem a kevlarom, okolo jádra. Následovalo prosycení a vytvrzení za vysokého tlaku a teploty. Další možností je vytvoření úpletu z jednotlivých vláken na počítačem řízeném stroji. Vyvinuta byla i velmi odolná technologie trojitého torzního boxu, a to i ve variantě s dutým jádrem (jednalo se o technologicky náročnou konstrukci Fibre Tube firmy Kastle). Většina firem však od této technologie pro její složitost ustoupila (ve větší míře už ji dnes používají jen firmy K2 a Völkl). [7], [9]

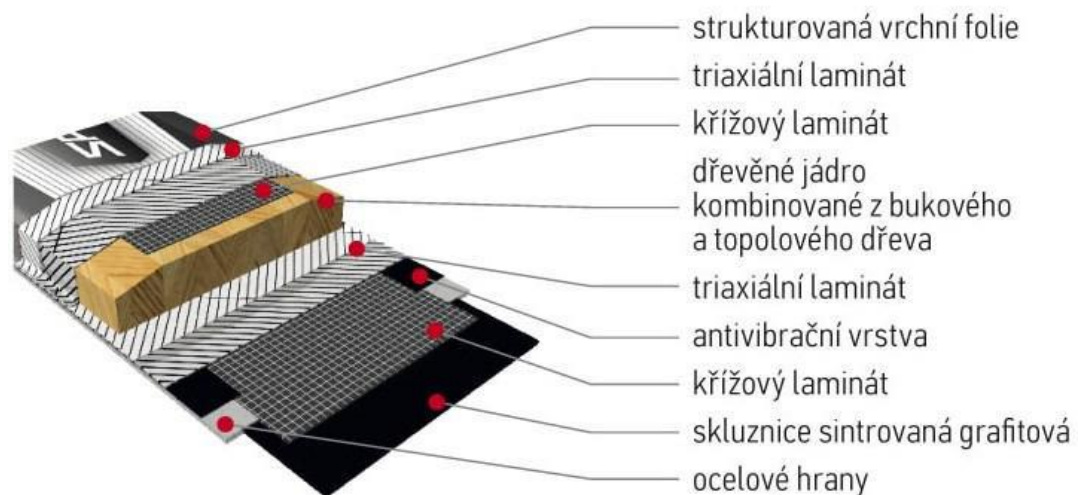




Obr. 2-3 Krabicová konstrukce lyží od výrobce Völkl [11]

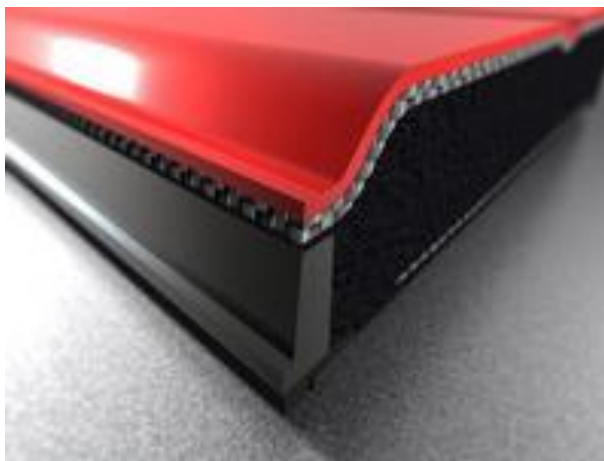
### 2.1.3 Capová (skořepinová) konstrukce

S touto výrobně poměrně jednoduchou technologií nazvanou Monocoque přišla před asi patnácti lety firma Salomon a postupně na ni nebo její upravené varianty přešla většina výrobců a je jí vyráběna větší část produkce sjezdových lyží. Hlavní nosnou částí lyže je zde nosník ve tvaru širokého U - profilu. Ten zároveň tvoří vrchní část a oba boky lyže. Ke konstrukci tohoto nosníku se používají stejné materiály jako u sendviče (zcela ojedinělé je použití nerezového ocelového plechu, který používá firma Volant), což často ztěžuje rozlišení těchto dvou typů konstrukce. Doplněn je spodním plátem, hranami a skluznicí. Jádro je u nejlevnějších modelů jednoduše vyplněno polyuretanovou pěnou. U dražších modelů je opět řešeno jako u výše popsaných sendvičů. Po řadě let začaly některé firmy opět používat u některých modelů voštinové jádro, které má tvar včelích plástů. [7]



Obr. 2-4 Capová konstrukce lyže značky Sporten Raptor [12]

Protože základní capová konstrukce zcela nevyhovuje všem požadavkům na mechanické vlastnosti lyží a potíže jsou i s její životností, přistoupila většina firem k jejím různým modifikacím, především ke kombinování různých typů konstrukcí neboli hybridní konstrukci. Další možností je použití dvojitého či vícevrstvého capu, často vyrobeného z rozdílných materiálů. [9]



*Obr. 2-5 Technologie Dualtec u lyže Rossignol Pursuit kombinuje capovou konstrukci spolu s vertikálními bočnicemi [13]*

Prakticky samostatnou kategorií tvoří výrazně příčně profilovaná skořepina, kterou už od roku 1996 úspěšně rozvíjela a postupně inovovala firma Atomic. Její Beta profil se stal doslova legendou. Pod skořepinou jsou paralelně uloženy dvě armovací trubice uložené v tlumící hmotě zvané Densolit. U nejvyšších modelů jsou skořepina i trubice vyrobeny z Titanalu. Postupně však firma od této technologie upouští. [7]



*Obr. 2-6 Beta konstrukce firmy Atomic [14]*

### 2.1.4 Hybridní (Half-Cap) konstrukce

Dříve nebyly hybridní konstrukce nikterak běžnou záležitostí, ale s novými technologiemi přichází i velké inovace od výrobců lyží. Nejčastěji se vyskytuje poměrně nová konstrukce lyže zvaná Half-Cap, která kombinuje sendvičovou a skořepinovou konstrukci, kdy je přední část lyže vyrobena jako skořepina, kdežto střed a patka lyže jsou konstruovány jako sendvič. V dnešní době tuto konstrukci nabízí firma Rossignol nebo také společnost Atomic s řešením Sidewall Cap Fibre, ale i několik dalších.

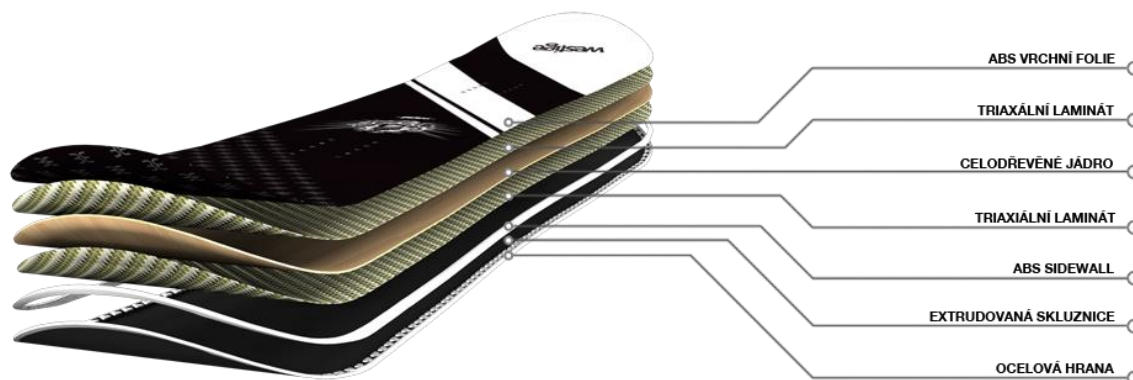
Hybridní konstrukce se ale nemusí týkat jen kombinace různých konstrukčních řešení. Velká pozornost, a to zejména u vyšších a závodních řad, je výrobcí v dnešní době věnována také tlumení nežádoucích kmitů lyží, a tím i podstatnému zlepšení její ovladatelnosti, zejména pak na tvrdém podkladu. S trochou nadsázky se dá říci, že mají obdobný vliv na jízdní vlastnosti jako tlumiče v automobilu. Tlumicí segmenty jsou buď zabudovány přímo v lyži, nebo jsou umístěny na její horní ploše. Většina z nich je konstruována na bázi kombinace pevných prvků z oceli nebo Titanalu uložených v elastomeru. K jednodušším a méně účinným řešením této problematiky pak patří použití gelovité látky. [9]

## 2.2 Konstrukce snowboardů

Snowboardy rozdělujeme na tři různé typy konstrukce podle typu jádra:

- snowboardy s dřevěným jádrem (wood core)
- snowboardy s jádrem z polyuretanové pěny (PU foam core)
- snowboardy s jádrem vyrobeným kombinací PU pěny a dřeva

Snowboardy s dřevěným (vertikálně vrstveným – sendvičovým) jádrem jsou dražší, jsou ale lehčí, pevnější a trvalejší.

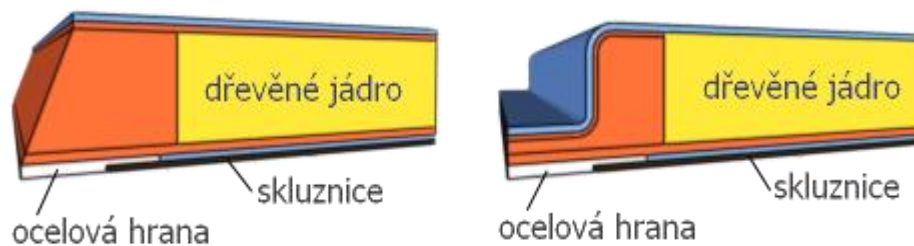


Obr. 2-7 Konstrukce snowboardu s dřevěným jádrem [15]

Polyuretanové jádro je měkčí a hodí se spíše na dětská prkna či pro jezdce s menší hmotností. Snowboardy nejsou příliš odolné a nemívají dlouhou životnost.

V devadesátých letech se pro výrobu používaly tři technologie:

- prkno s kolmými bočními stěnami - sidewalls
- prkno s CAP
- monocoque prkna (CAP 360°)



Obr. 2-8 Technologie sidewalls vlevo, konstrukce s CAP vpravo [16]

Snowboardy s konstrukcí CAP jsou pevnější, lépe se ovládají a mají anti vibrační schopnosti. Podstatou stavby je tak zvaný torzní box, stejně jako u lyží, kde je horní a spodní vrstva skelných vláken na stranách a u hrany spojená a protáhnutá CAP folií. Vznikne tak pevný celek kolem jádra snowboardu.

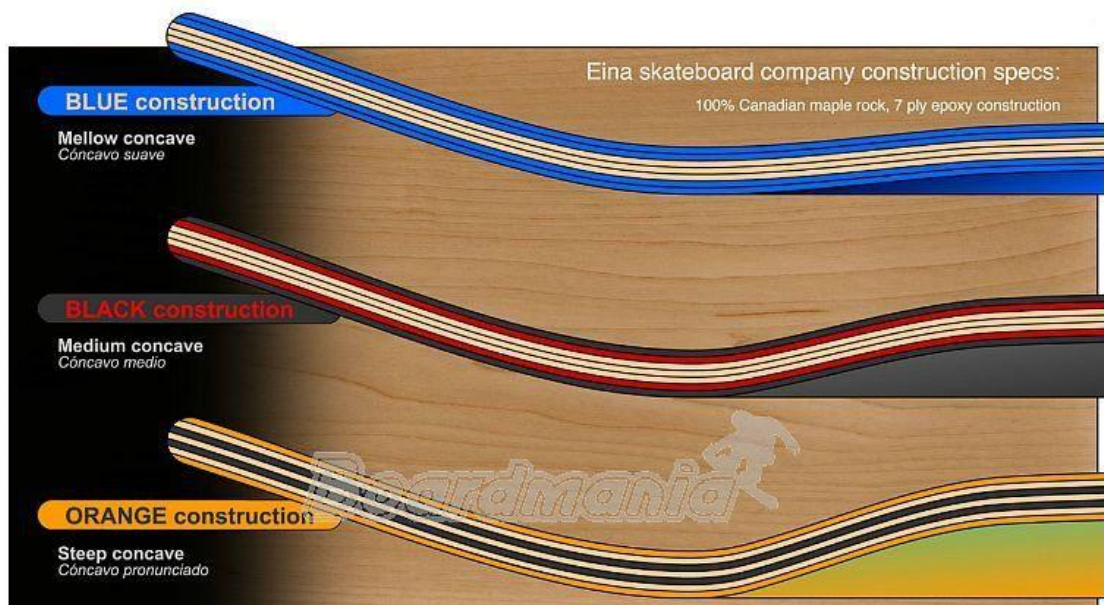
Jsou také firmy, které používají levnější postupy výroby, při kterém horní vrstva skelných vláken končí hned za horní hranou, a není spojena se spodní vrstvou. Vzniklý prostor zůstane nevyplněn. Takto vyrobená prkna nejsou CAP, i když jsou za ně často vydávána.

U monocoque prken jsou horní i dolní vrstvy skelných vláken spojeny po celém obvodu prkna. Nevýhodou těchto dvou technologií je, že při proražení vrchní vrstvy snowboardu je velká pravděpodobnost proražení až na jádro, čímž dojde k velkému poškození struktury prkna. [17]

### 2.3 Konstrukce skateboardů

Skateboard je dřevěná lepená deska, nejčastěji se při výrobě používá javor díky své pevnosti a pružnosti. Liší se různou šířkou, délkou, zahnutím špičky a paty, velikostí „conca-  
vu“ (podélné prohnutí desky). Prkno je tvořeno nejčastěji ze sedmi lepených desek o tloušťce 1 mm, jež jsou kladeny šikmo, aby zabránily vzniku rizikových lomných ploch při dopadu. Výběr desky je zcela individuální záležitostí a neexistuje obecně platné pravidlo pro výběr.

Výroba skateboardu začíná výběrem kvalitního dřeva. Pro výrobu se používají nejkvalitnější javorové stromy, které se zpracovávají a nařezou do správných velikostí. Velikost skateboardu se určuje podle vrstev každé desky (6, 7 a 8 vrstev). Desky se lisují dlouho dobu, čím déle tím lépe, aby mohlo lepidlo pořádně vytvrdnout. Při předčasném vytáhnutí desky, natahuje skateboard vlhkost a tím by se deformoval tvar. Do těchto polotovarů jsou poté vyvrtané díry na trucky, pomocí vrtaček, které jsou přesně kalibrovány na danou rozteč. Po vyvrtání děr se polotovar vyřezává do správného tvaru, zaoblují se a ručně se dobrousí hrany. Desky se poté opatřují ochranným pláštěm, který zabraňuje pronikání vlhkosti. Poté se deska ošetří pomocí transparentního laku a výroba skateboardu je hotová.



Obr. 2-9 Konstrukce skateboardu dle podélného prohnutí desky (conca-  
vu) [18]

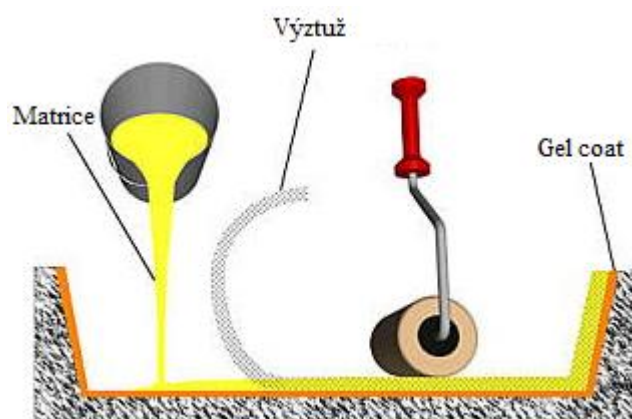
### 3 PŘEHLED V OBLASTI ZPRACOVATELSKÝCH TECHNOLOGIÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Jak vyplývá již z charakteru jednotlivých složek a základního rozdělení kompozitu, vzniká (až na výjimky) vláknový kompozit – laminát teprve při výrobě polotovaru resp. výrobku. Vzhledem k tomu je třeba posuzovat technologický postup při výrobě vyztužených plastů za velmi podstatný faktor, který v zásadě určuje jak jeho výsledné vlastnosti, tak i ekonomiku výroby. Proto je třeba věnovat volbě technologie značnou pozornost. Výrobní technologie je dána především charakterem výrobku. Volba se řídí několika zásadními faktory:

- Sériovostí dílce, velikostí a členitostí výrobku
- Kvalitou povrchu
- Požadovanými vlastnostmi
- Limitem nákladů

#### 3.1 Ruční laminování

Jedná se o proces, ve kterém je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvality povrchu vytvrzeného kompozitního dílce. Jedná se o jednu z omezujících zvláštností tohoto výrobního procesu, totiž že pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. Po položení výztuže a provlhčení pryskyřicí je připravený ruční kompozit ponechán vytvrzení.



Obr. 3-1 Schéma ručního laminování

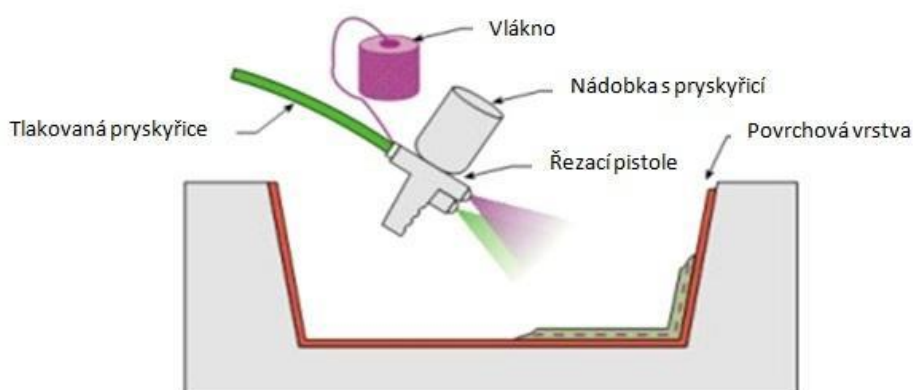
Je to poměrně rozšířená technologie a jejími výhodami jsou jednoduchost a nízké náklady na výrobu formy. Je vhodná pro malé série a pro velkorozměrové, složité výrobky. Nevýhodou je dále nereprodukovatelnost odpadu, malá produktivita a pouze jeden kvalitní povrch. Kvalita výrobku silně závisí na zkušenostech a schopnostech pracovníka. Uplatnění této technologie je hlavně u obkladů karoserií dopravních prostředků (autobusy, vlaky) a v lodním průmyslu.



Obr. 3-2 Ruční laminování

### 3.2 Nanášení sprejem

Tato metoda má princip v tom, že se na povrch formy nanáší stříkáním katalyzovaná směs krátkých skelných vláken současně s matricí, která je slisována a vytvrzena.

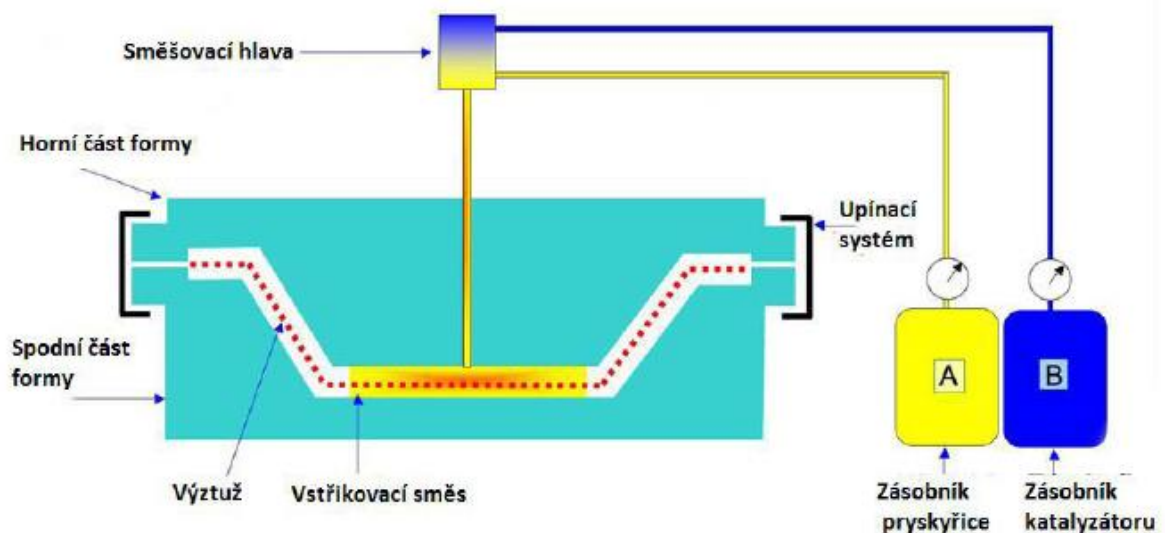


Obr. 3-3 Nanášení sprejem

Kladné vlastnosti této metody spočívají v nízké ceně technologického zařízení, poměrně dobré produktivitě a reprodukovatelnosti výrobků (pokud je proces automatizován). U této technologie není žádné omezení velikosti výrobku. Nevýhodou je nesnadné dosažení přesných tolerancí a velké požadavky na kvalitní a schopnou pracovní sílu. Aplikace je například ve výrobě panelů, lodí, zásobníků.

### 3.3 RTM (Resin Transfer Moulding) - Lisování se vstřikem

Jde o technologii s uzavřenou formou, při které se ohřátá pryskyřice a ohřáté tvrdidlo pomocí nízkotlakých čerpadel dopravují do směšovací komory bezprostředně před vstřikem směsi do dutiny formy, kde následně prosycují výztuž ve formě tkanin (sklo, v letectví uhlík) nebo speciálně tkaných rohoží. Matrice se obvykle používají polyesterové, epoxidové nebo fenolické a vytvrzují při standardních atmosférických podmínkách, případně je dutina formy vyhřívána (40 – 60 °C).



Obr. 3-4 Schéma lisování se vstřikem – RTM

Jedná se o jednoduchou a rozšířenou technologii. Výhodou je produktivita a přesnější technologie v porovnání s ručním laminováním. Je vhodná pro střední série (300 – 5000 kusů). Další velkou výhodou je, že obě strany výrobku jsou hladké a transparentní. Nevýhoda je, že není možné vyrobit výrobky s negativním úhlem, kvůli odformování a ve



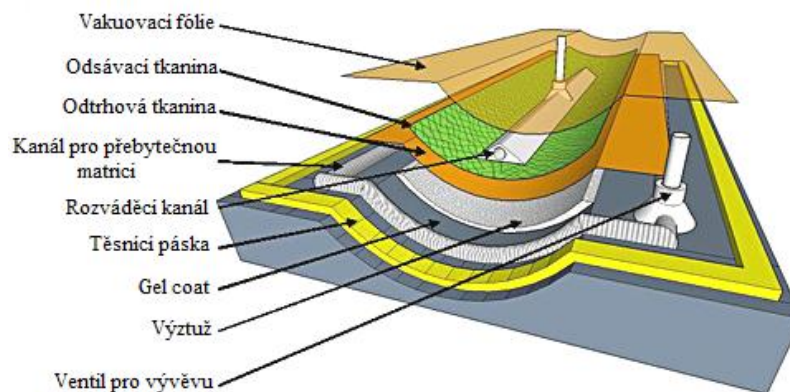
vyšších nákladech na výrobu forem, které jsou většinou robustní a těžké. Uplatnění je ve výrobě obkladů karoserií dopravních prostředků, lodí, krytů přístrojů a zařízení. A hlavně u designových prvků z různých oblastí.



Obr. 3-5 Forma pro technologii RTM

### 3.4 Vakuová infúze

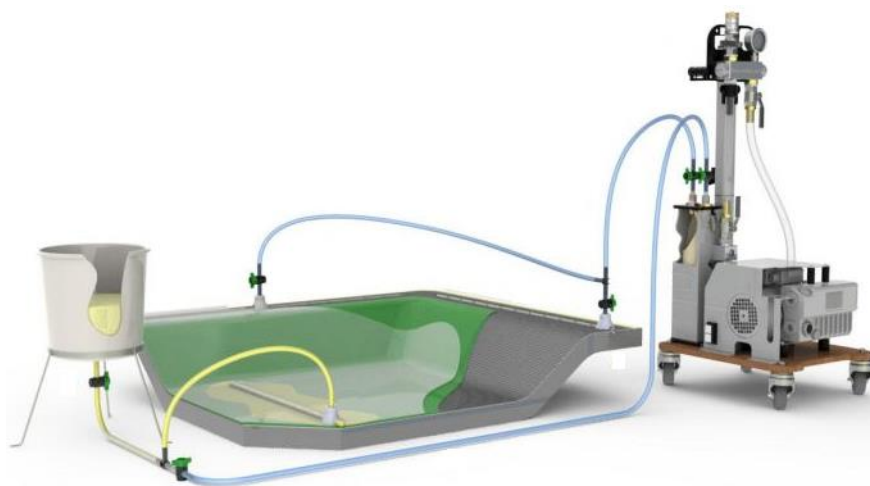
Jde o technologii ručního kladení suché výztuže (tkanin, speciálně tkaných rohoží) do formy. Na nakladenou výztuž ve formě se dále kladou další technologicky potřebné materiály. Tyto materiály jsou například: separační fólie, rozváděcí, odsávací tkanina a poslední vrstvou je vždy vakuovací fólie. Pomocí vákua vytvořeného pomocí vývěvy se všechny nakladené materiály ve formě slisují pod vakuovací fólií a prosytí nasávanou matricí. Tato matrice dále vytvrzuje při standartních atmosférických podmínkách.



Obr. 3-6 Skladba technologicky potřebných materiálů

Matrice se v případě této technologie používají epoxidové nebo polyesterové. Výztuže jsou nejčastěji skelné, uhlíkové nebo kevlarové tkaniny, dají se však použít i sendvičové materiály jako třeba pěna nebo balza.

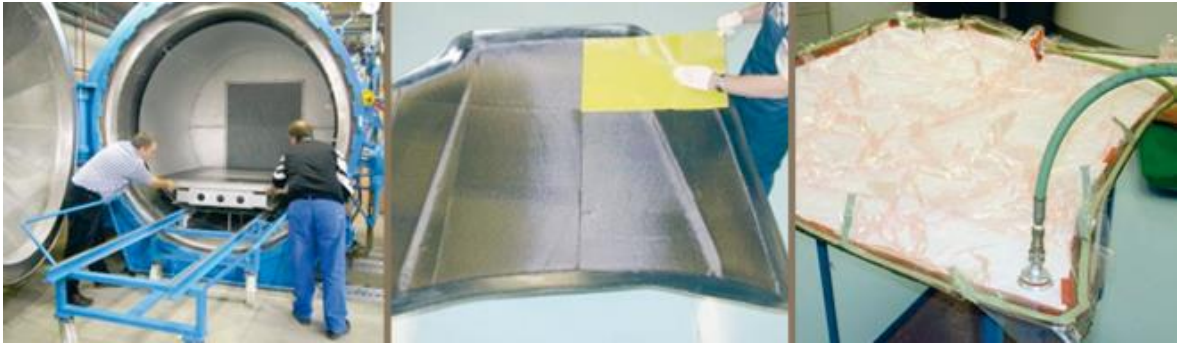
Výhodou této technologie je kontrolovaný proces, který zaručuje lepší kvalitu a mechanické vlastnosti výsledného produktu. Je vhodná pro malé série a pro rozměrově velké výrobky. Využití této technologie je hlavně v lodním průmyslu, u vrtulí elektrických elektráren a všude tam, kde jsou rozměrově velké dílce.



*Obr. 3-7 Vakuová infúze*

### **3.5 Vakuové lisování prepregů**

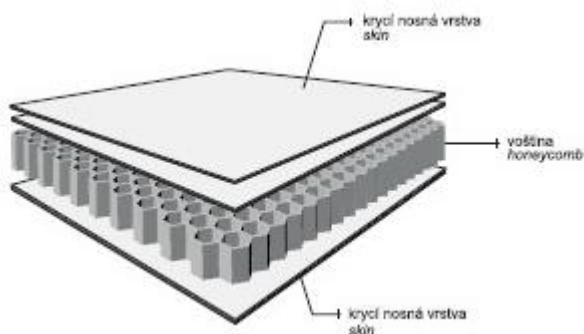
Tato technologie využívá už maticí předimpregnované materiály (prepregy). Tyto prepregy se podle daného plánu kladou do dutiny formy ve více vrstvách a na tuto vrstvu výztuže se postupně kladou další technologicky potřebné materiály, jako třeba odtrhová tkanina, separační fólie, odsávací rohož a vakuovací fólie. Za pomoci vákua se pod vakuovací fólií vytvoří ve formě podtlak, který všechny vrstvy slisuje. Následně se celá forma vloží do vyhřívací pece nebo autoklávu, kde začnou prepregy za vyšších teplot vytvrzovat (teploty závisí na konkrétním použitém prepregu), v případě použití autoklávu i za zvýšeného tlaku.



*Obr. 3-8 Vakuové lisování prepregu v autoklávu*

Matrice se v případě prepregů používají buď epoxidové nebo fenolické a pro vysokoteplotní aplikace polyamidové, bismaleimidové nebo kyanátesterové.

Jako výztuž se u prepregů používají nejčastěji tkaniny, dvou i jednosměrné. Hlavní využití prepregů je v případě sendvičových konstrukcí, například s voštinovým jádrem nebo s různými druhy pěn (PVC, PET, PIM).



*Obr. 3-9 Voštinový sendvič*

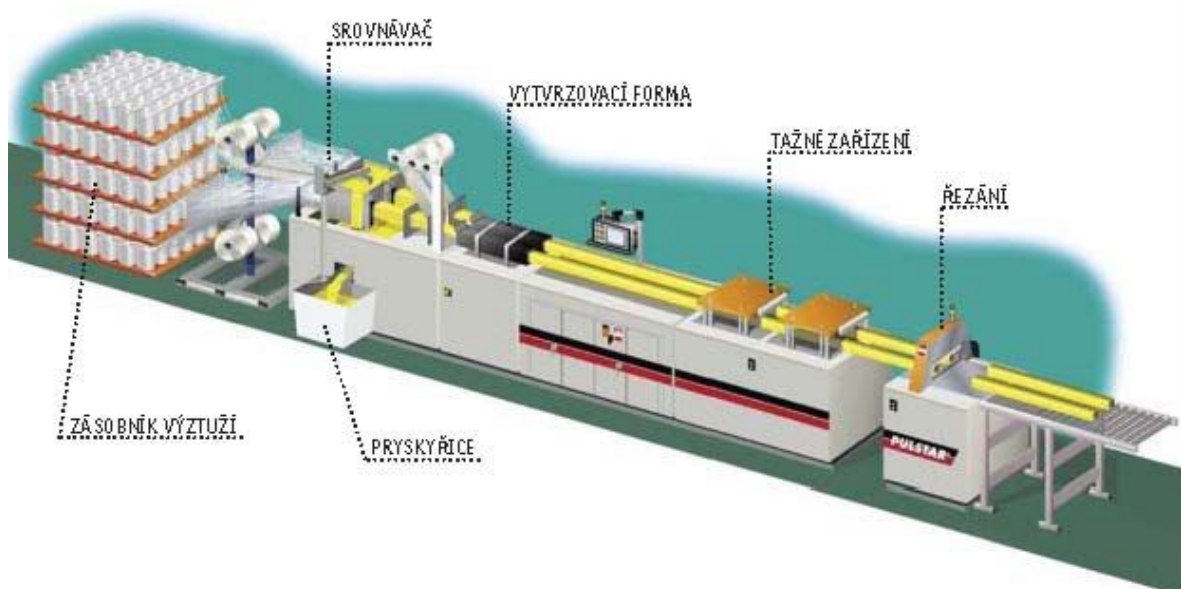
Výhodou je kontrolovaný proces, který zaručuje lepší kvalitu a mechanické vlastnosti produktu. Je vhodná pro velkorozměrné výrobky. Nevýhodami je pak technologicky složitější proces a větší náklady na pomocný materiál. Využívají se nejčastěji v leteckém, kosmickém a lodním průmyslu.

### 3.6 Pultruze

Pultruze je technologie ve formě systému nekonečného vlákna, které je taženo lázní s matricí a následně přes vyhřívanou formu. Při tažení vlákna přes vyhřívanou formu matrice vytvrzuje a vytváří tak požadovaný profil, který se pak nařeže na požadovanou délku.

Matrice se v případě této technologie využívá polyesterová, vinylesterová nebo epoxidová. Výztuž tvoří ve většině případů skelná nebo uhlíková vlákna.

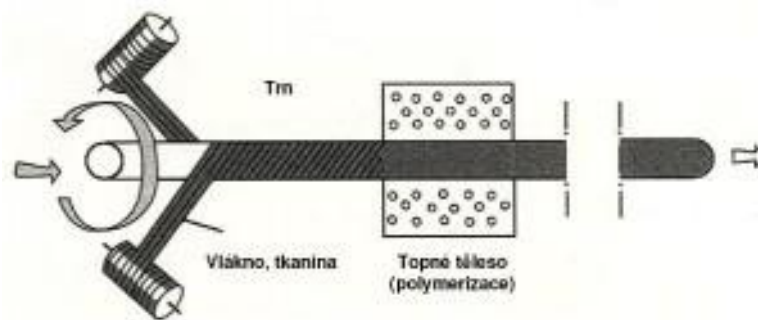
Výhodou je produktivní technologie výroby, která umožňuje vyrobit 1 až 5 metrů profilu za minutu, záleží na jeho složitosti. Nevýhodou je náročný rozběh technologického cyklu a tvarové omezení profilů. Aplikace produktů je v mnoha různých odvětví průmyslu.



Obr. 3-10 Schéma výrobní linky pultruzních profilů [19]

### 3.7 Navíjení

Pomocí navíjení se zhotovují výhradně rotační výrobky. Tato technologie pracuje na principu nekonečného vlákna, které je tažené přes lázeň s pryskyřicí a následně je navíjeno na rotující trn, nebo jiné rotační jádro dle požadovaného výrobku. Toto rotační jádro je vyhřívané externím zařízením kvůli pryskyřici, která vytvrzuje při zvýšené teplotě.



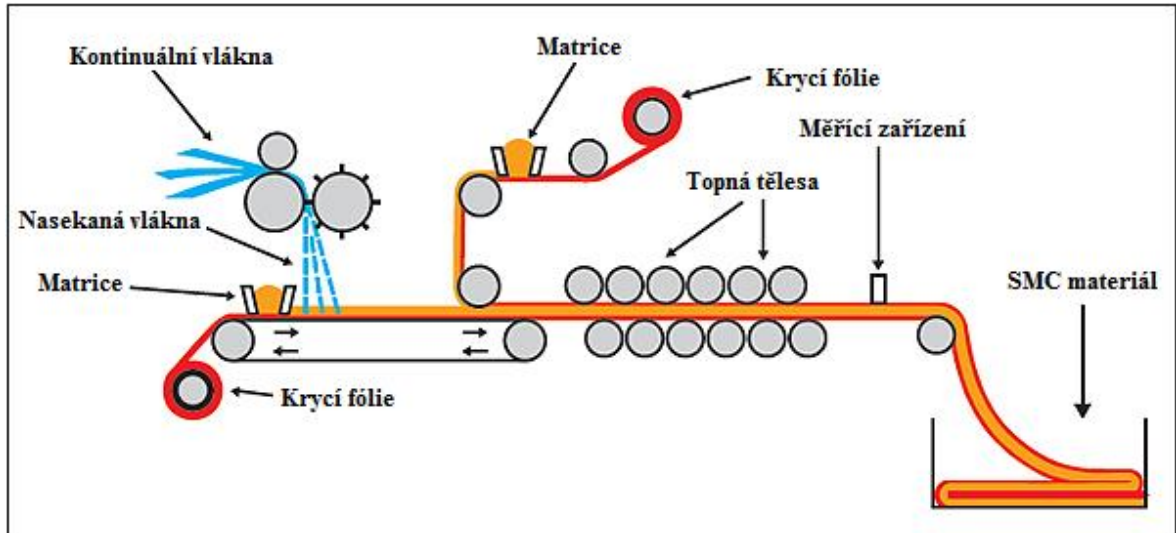
Obr. 3-11 Schéma navíjení

Jako výztuž se zde využívá ve většině případů skelné vlákno nebo u speciálních případů uhlíkové či kevlarové. Typy používané pryskyřice jsou například polyesterová, vinylesterová a epoxidová.

Kladnými vlastnostmi této technologie je produktivní proces výroby kompozitů a možnost výroby velmi tuhých konstrukcí. Naopak zápornými vlastnostmi jsou omezené možnosti technologie z hlediska změny tvaru, nerovnoměrný návin po celé délce trnu, vysoké náklady na výrobu trnu a neatraktivní vzhled vnější strany výrobku.

### 3.8 SMC (Sheet Molding Compound) – plošné výlisky s polymerní maticí

Jde o lisovací technologii ve vytápěné dvoudílné ocelové formě. Polotovar pro lisování lze nazývat také „prepreg“. Lisování SMC vyžaduje hydraulický lis a ocelovou vyhřívanou formu s leštěnými povrchy dutin, tudíž je poměrně finančně náročný a proto se tato technologie uplatňuje při velkém množství požadovaných kusů výrobků (přibližně od 10 000 kusů). Povrchy dílů mají vysokou kvalitu. SMC je možné vyrobit tak, že polyesterovou pryskyřici s obsahujícím zahušťovadlem a lacinými částicemi, jako třeba uhličitan vápenatý nebo křemičitý prášek smícháme s nasekanými, nejčastěji skelnými vlákny a vytvoříme plátno. Vlákna mohou být rozloženy paralelně v rovině plátna nebo náhodně s objemovým množstvím mezi 15 až 40 %. Rychlost výroby jednoho výrobku určuje čas vytvrzování ve formě. Při výrobě SMC dochází k určitému toku materiálu ke zpevňujícím vláknům, což může být využito na zlepšení vlastností.



Obr. 3-12 Schéma výroby SMC materiálu

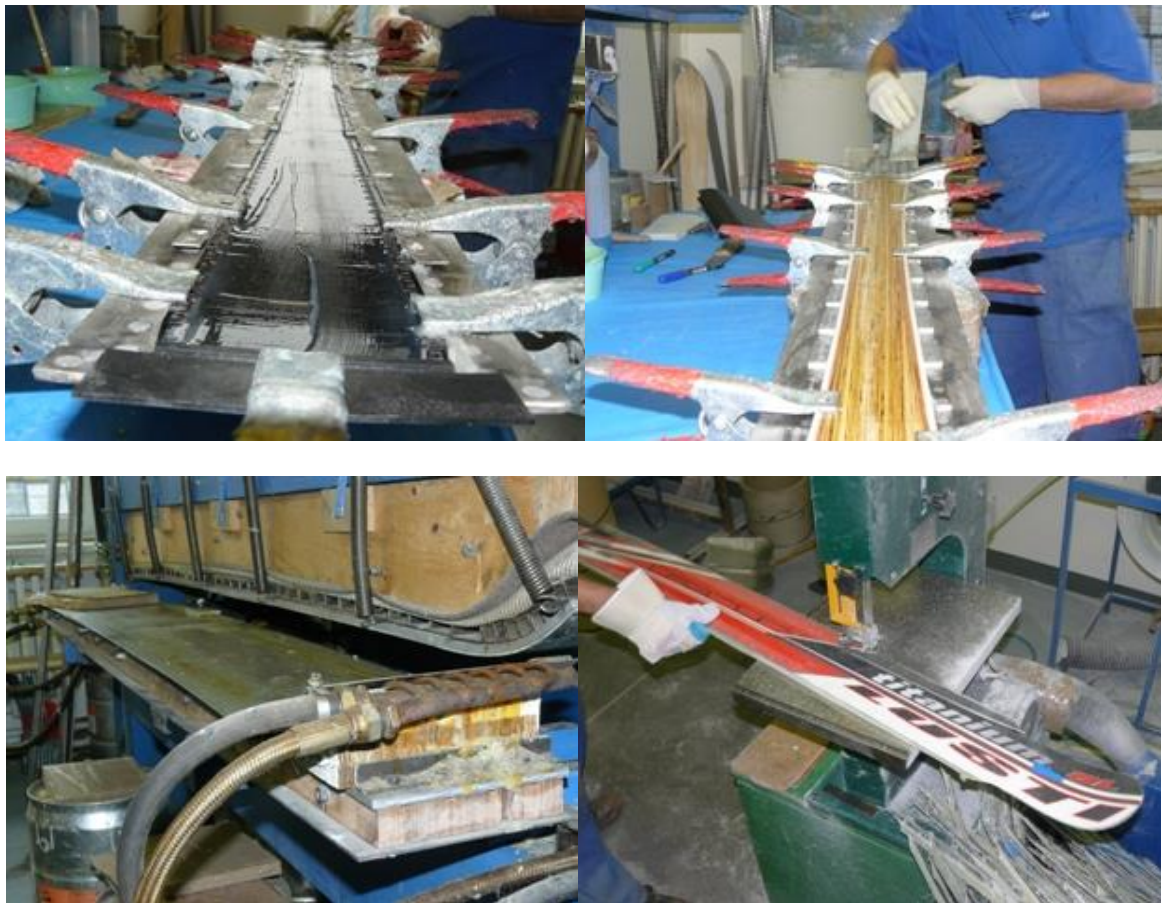
SMC materiály mají výborné mechanické vlastnosti v širokém rozmezí teplot, a velký prostor pro tvorbu designu. Mají menší koeficient roztažnosti než je u ocelí, nižší hmotnost a dobrou chemickou odolnost. Typické použití výlisků je u všech typů z plechů porovnatelné s ocelovými a hliníkovými plechy. Dále pak panely karoserií automobilů a různé ochranné kryty.



Obr. 3-13 Lis na SMC materiály

### 3.9 Technologie výroby lyží a snowboardů

Lyže, snowboardy i skateboardy jsou ideálním příkladem kompozitních materiálů, kdy kombinací různých druhů materiálů získáme výsledný výrobek s jedinečnými vlastnostmi. Výroba spočívá v kladení materiálů na sebe s postupným nanášením pryskyřice na jednotlivé vrstvy do formy, která se následně vloží do vyhřívaného lisu, kde postupně za zvýšené teploty pryskyřice vytvrzuje a spojí v celek všechny nakladené materiály. Po úplném vytvrzení a vyjmutí z lisu následují dokončovací operace. Například ořezání přebytečných materiálů na požadovaný tvar a dobroušení hran se skluznicí s následným vyleštěním na finální výrobek. Kladené materiály jsou vybírány a kombinovány individuálně dle oblasti využití lyže nebo snowboardu. V dnešní době existuje mnoho odvětví v lyžování a pro každé dané odvětví jsou požadovány mechanicky odlišné vlastnosti, které lze splnit správnou kombinací materiálů, kterých je velká škála a tudíž se nabízí velký sortiment výběru pro každého.



*Obr. 3-14 Technologický postup výroby lyží značky Lusti [20]*

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 4 CÍL PRÁCE

Cílem mojí bakalářské práce je úvod do problematiky kompozitních materiálů a jejich vzájemné porovnání při využití ve sportovních aplikacích, jako jsou lyže, snowboardy a skateboardy.

Shrnutí práce v jednotlivých bodech:

### I. Teoretická část

1. Definice kompozitních materiálů, jejich vlastnosti a rozdělení
2. Zaměření na konstrukci a využití v jednotlivých sportovních aplikacích
3. Popis základních typů technologií pro zpracování kompozitních materiálů

### II. Praktická část

1. Skateboardy
  - a. Materiálová analýza
  - b. Popis provedené zkoušky
  - c. Vyhodnocení naměřených hodnot
2. Lyže
  - a. Návrh
  - b. Materiálová analýza
  - c. Popis výroby
  - d. Porovnání naměřených výsledků
3. Závěr

## 5 SKATEBOARDY

Na žádost nově vznikající firmy zaměřené na výrobu skateboardů jsme byli požádáni o porovnání mechanických vlastností čtyř skateboardů s odlišnou konstrukcí.

### 5.1 Materiálová analýza zkoumaných skateboardů

Tři ze skateboardů jsou od stejného výrobce, který požaduje srovnání mechanických vlastností mezi sebou a s jedním skateboardem od jiné, konkurenční firmy. Porovnávané skateboardy jsou stejné rozměrově, ale byly zde použity rozdílné typy lepidla při jejich výrobě a dva z testovaných skateboardů jsou navíc z horní části vyztuženy laminátem ze skelných vláken pro dosažení lepších mechanických vlastností.

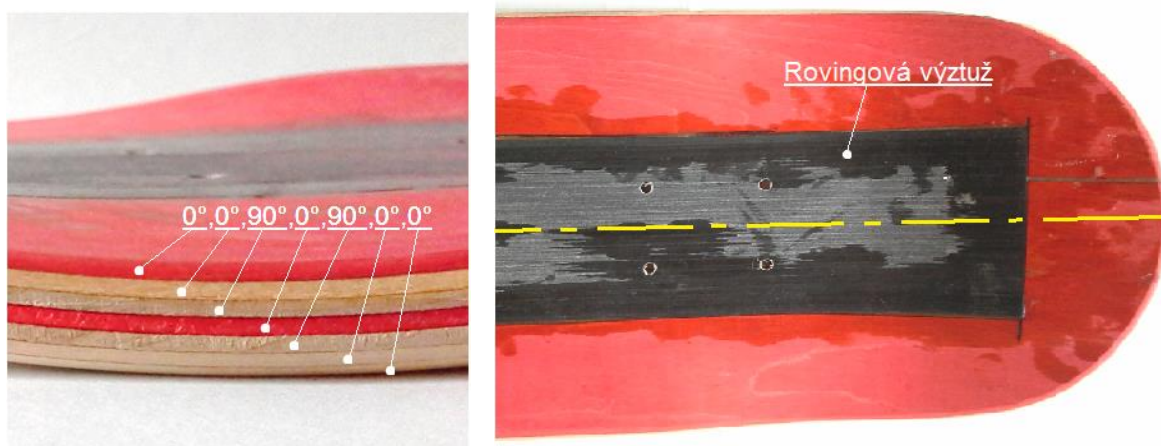


*Obr. 5-1 Zkoumané skateboardy*

Zkoumané typy skateboardů jsou vyrobeny z jednomilimetrových plátů javorového dřeva, které jsou k sobě přilepeny v sedmi vrstvách s různou orientací pro snížení vzniku rizikových lomných ploch při dopadu. Jak jsem již zmínil, byly zde použity různé typy lepidel, které silně ovlivňují mechanické vlastnosti skateboardu a tudíž i určují, v jaké aplikaci by bylo vhodné je nejlépe využít.

### 5.1.1 Skateboard č. 1 (červený s černou výztuží)

U skateboardu č. 1 byla použita klasická skladba sedmi milimetrových plátů z javorového dřeva slepená epoxidovou pryskyřicí. Orientace jednotlivých plátů ve stupních je 0,0,90,0,90,0,0. Tudíž jsou zde symetricky dva pláty s orientací 90° od hlavní osy skateboardu vedené v podélném směru. Pro zlepšení tuhosti a vůbec celkových mechanických vlastností, byla do horní, sedmé vrstvy přidána výztuž v podobě rovingu ze skelných vláken o šířce 90 mm a tloušťce 1,2 mm. Tato výztuž je umístěna uprostřed a rozpíná se téměř po celé délce skateboardu.



Obr. 5-2 Skateboard č. 1 – skladba, výztuž na horní straně

### 5.1.2 Skateboard č. 2 (šedý s výztuží)

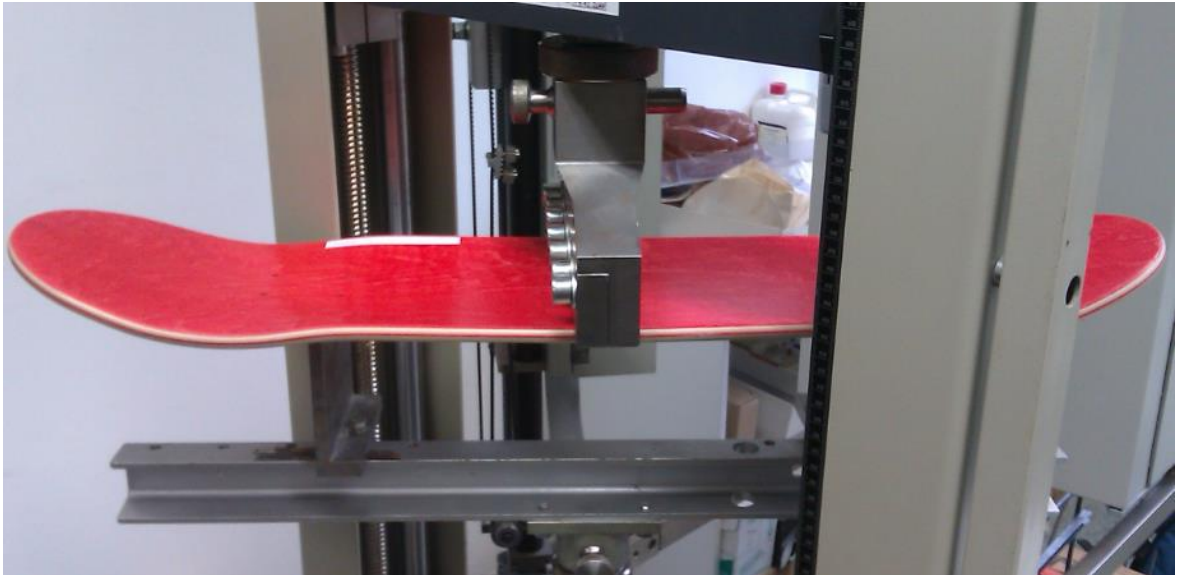
Skateboard č. 2 má stejnou dřevěnou konstrukci i skladbu, jako skateboard č. 1. Jako matrice zde byla také využita epoxidová pryskyřice. A také u tohoto typu byla použita výztuž na horní části skateboardu v podobě jednosměrné tkaniny o šířce 90 mm ze skelných vláken provázána tavnou nití pro lepší manipulaci.



Obr. 5-3 Skateboard č. 2 – při ohybové zkoušce

### 5.1.3 Skateboard č. 3 (červený bez výztuže)

Klasický skateboard o stejné skladbě javorových plátů bez jakýchkoliv přidaných prvků výztuže. Jeho hlavní odlišností je typ použité matrice, kterou je fenolová pryskyřice.



*Obr. 5-4 Skateboard č. 3 – Při ohybové zkoušce*

### 5.1.4 Skateboard č. 4 (oranžový od jiné firmy)

U tohoto skateboardu od cizí firmy jsem podle vizuální prohlídky určil stejný typ konstrukce, jako u předchozích tří skateboardů, tedy stejná dřevěná skladba ovšem bez použití jakýchkoliv přidaných výztužných prvků. V tomto případě nebylo možné zjistit, o jaký typ lepidla se jedná.



*Obr. 5-5 Skateboard č. 4 – Při ohybové zkoušce*

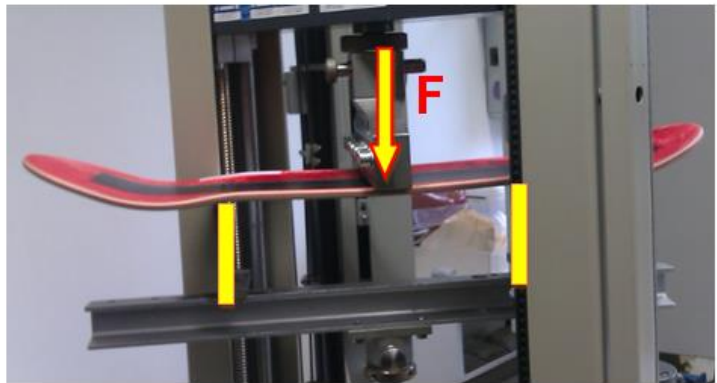
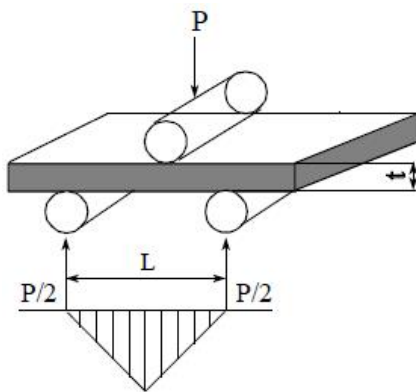
## 5.2 Popis vybrané mechanické zkoušky

K určení mechanických vlastností skateboardů jsem použil zkoušku ohybem, přesněji tříbodový ohyb dle normy ČSN EN ISO 178.

### 5.2.1 Popis zkoušky tříbodovým ohybem

Při této zkoušce je zkušební těleso zatíženo osamělou silou  $F$ , která působí uprostřed mezi dvěma podporami takovou dobu, dokud u tělesa nedojde k přelomení.

Ohybový moment vyvolaný silou  $F$  způsobí v horních vláknech průřezu napětí tlakové a ve spodních vláknech napětí tahové. Výhodou této zkoušky je, že můžeme změnou vzdálenosti podpěr dosáhnout velkých ohybových momentů i při malé zatěžující síle.



Obr. 5-6 Schéma zkoušky tříbodovým ohybem

Metoda se používá ke zjištění chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí.

Zkušební tělesa:

- Délka a tloušťka zkušebního tělesa musí být ve stejném poměru jako u přednostního tělesa, tj.

$$\frac{l}{h} = (20 \pm 1)mm \quad (1)$$

- Hodnoty šířky  $b$  ve vztahu k tloušťce  $h$

$$3 < h \leq 5 \qquad b = (10 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$5 < h \leq 10 \qquad b = (15 \pm 0,5) \text{ mm}$$

- Rozpětí podpěr  $L$  se nastaví tak, aby vyhovovalo následujícímu vztahu (s přesností 0,5 %)

$$L = (16 \pm 1)h \qquad (2)$$

- Rychlost zkoušky se nastaví dle požadavků v předmětové normě zkoušeného materiálu. Není-li k dispozici, vybere se hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1% za minutu. To je rychlost zkoušky, která během 1 minuty způsobí průhyb tělesa co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky.

Výpočet a vyjádření výsledků:

- Pevnost v ohybu – maximální napětí v ohybu, které zkušební těleso snese během zkoušky
- Napětí v ohybu  $\sigma_f$  – jmenovité napětí vnějšího povrchu zkušební tělesa uprostřed rozpětí podpěr. Počítá se dle vztahu:

$$\sigma_f = 3FL/2bh^2 \qquad (3)$$

Kde  $F$  je zatěžující síla v newtonech,  $L$  je rozpětí podpěr v milimetrech,  $b$  šířka zkušební tělesa v milimetrech,  $h$  tloušťka zkušební tělesa v milimetrech.

- Modul pružnosti v ohybu  $E_f$  – pro stanovení modulu pružnosti v ohybu se vypočítají průhyby  $s_1$  a  $s_2$  odpovídající daným hodnotám deformace ohybem  $\varepsilon_{f1}=0,0005$  a  $\varepsilon_{f2}=0,0025$  dle rovnice:

$$s_i = \varepsilon_{fi} L^2 / 6h \qquad (4)$$

Kde  $s_i$  je jednotlivá hodnota průhybu v milimetrech,  $\varepsilon_{fi}$  odpovídající deformace ohybem,  $L$  rozpětí podpěr v milimetrech,  $h$  tloušťka zkušební tělesa v milimetrech.

- Modul v ohybu vyjádřený v megapascálech se vypočítá dle rovnice:

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}) \qquad (5)$$

Kde  $\sigma_{f1}$  je napětí v ohybu, vyjádřené v megapascalch, stanovené pro průhyb  $s_1$ ,  $\sigma_{f2}$  je napětí v ohybu, vyjádřené v megapascalch, stanovené pro průhyb  $s_2$ .

### 5.2.2 Charakteristika stroje provádějícího ohybovou zkoušku

Všechny testy byly prováděny na zkušebním stroji ZWICK 1456 za pomoci testovacího softwaru testXpert v7.11. Na tomto zařízení lze také provádět zkoušku tlakovou, ohybovou a tahovou. Pomocí různých typů přípravků lze na stroji provádět zkoušky s různými typy a velikostmi materiálů. Snímače síly použité na stroji mají limitní hodnoty do 2,5 kN a do 20 kN. Lze také využít teplotní komory k nasimulování různých teplotních podmínek. Stroj je dále vybaven extenzometry pro zpřesnění měření modulu pružnosti. Veškeré výpočty naměřených hodnot provádí software automaticky. Výsledky zaznamenává do tabulek a grafů.

Technické údaje stroje ZWICK 1456:

- Maximální posuv příčnicku: 800 mm/min
- Snímače síly: 2,5 kN a 20 kN
- Teplotní komora: -80 / +250 °C
- testXpert: Tah/Ohyb/Tlak



Obr. 5-7 Zkušební stroj ZWICK 1456

## 5.3 Vzájemné srovnání experimentálně dosažených výsledků

### 5.3.1 Uchycení ve zkušebním stroji

Zkoumané skateboardy jsem záměrně umístil na podpěry v místech, kde v praktickém využití bývají namontovány podvozky, aby měření co nejvíce simulovalo reálné podmínky využití s tím, že hlavní středová působící síla byla umístěna do středu skateboardu. Vzhledem k velkým rozměrům zkoumaných vzorků jsme zvolili podpěry, které na vzorky působily čárovou silou kolmo k hlavní ose skateboardu.

### 5.3.2 Naměřené hodnoty

Všechny naměřené hodnoty byly získány pomocí zkušebního stroje ZWICK 1456 s použitím testovacího softwaru testXpert v7.11. Pro měření byly do této práce zahrnuty a vybrány pouze výsledky, které byly stanoveny jako důležité pro samotné vyhodnocení. Tyto výsledky se nacházejí v následující tabulce a grafech.

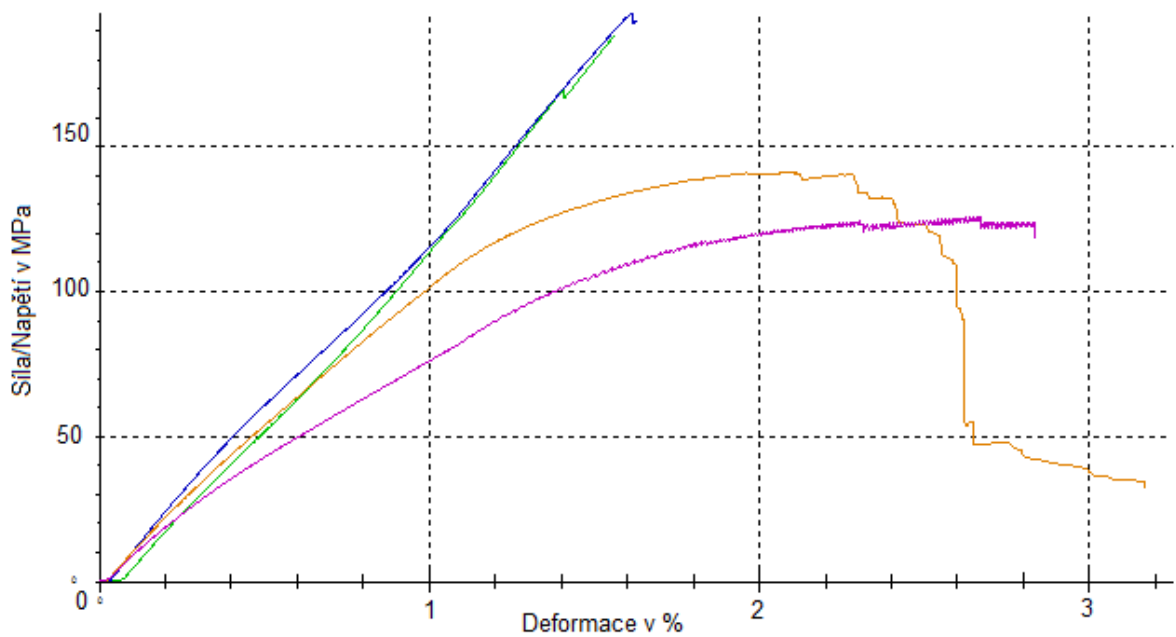
Tab. 1 Tabulka naměřených hodnot

Skateboard č.	E	F <sub>MAX</sub>	ε	y	F <sub>LOM</sub>	W při F <sub>MAX</sub>	W při F <sub>LOM</sub>	a	b
	MPa	N	%	mm	N	N.mm	N.mm	mm	mm
1	12400	188	1,6	36,0	188	120879	120927	10	209
2	14000	196	1,6	38,2	193	136534	138566	10	209
3	12000	141	2,1	50,1	-	167211	-	10	204
4	9870	126	2,7	64,0	119	194779	212491	10	204

Tab. 2 Rozlišení naměřených křivek

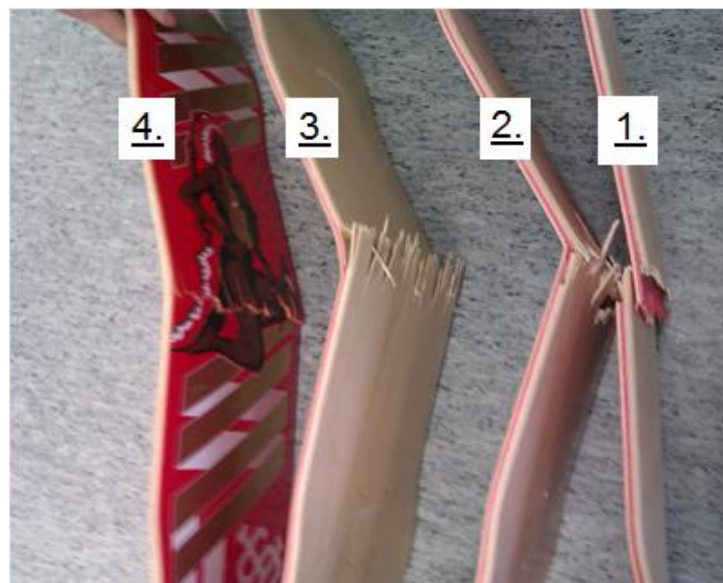
Skateboard č.	Barva křivky v grafu
1	Zelená
2	Modrá
3	Oranžová
4	Fialová





Obr. 5-8 Graf závislosti zatěžující síly na poměrné deformaci

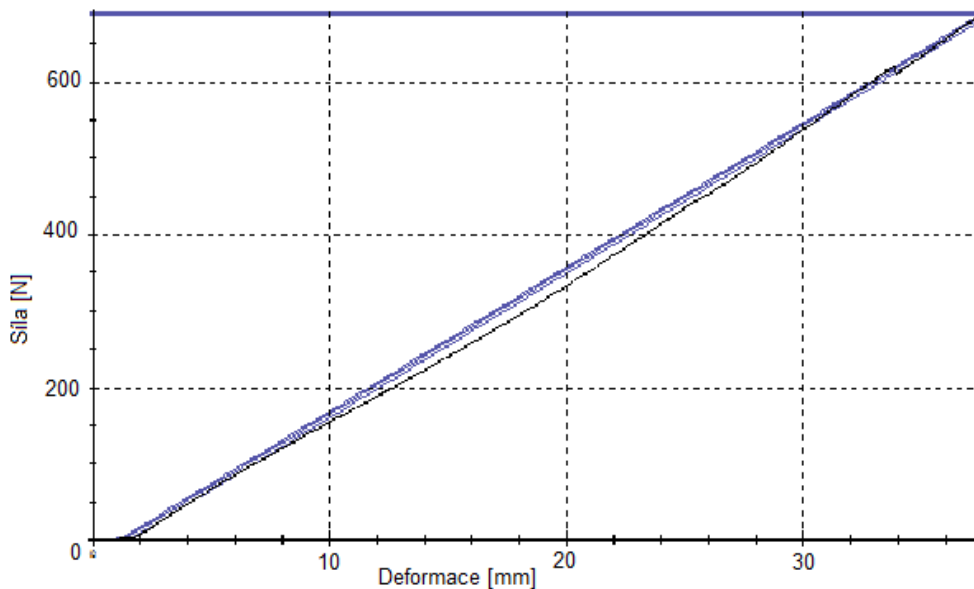
Z grafu porovnávajícího výsledné křivky ohybové zkoušky všech čtyř skateboardů lze vyčíst na první pohled rozdíly, které mají na svědomí použité typy matric a požitá výztuž. Skateboard č. 1 a 2 s epoxidovou pryskyřicí a výztuží v horní části skateboardu vykazovaly spíše vlastnosti s vyšší pevností na úkor křehkosti a tudíž nárazového lomu. Skateboardy č. 3 a 4 se chovaly spíše houževnatěji s velkým průhybem až k postupnému lomu, což má na svědomí s největší pravděpodobností fenolová pryskyřice disponující těmito vlastnostmi.



Obr. 5-9 Skateboardy po provedené zkoušce

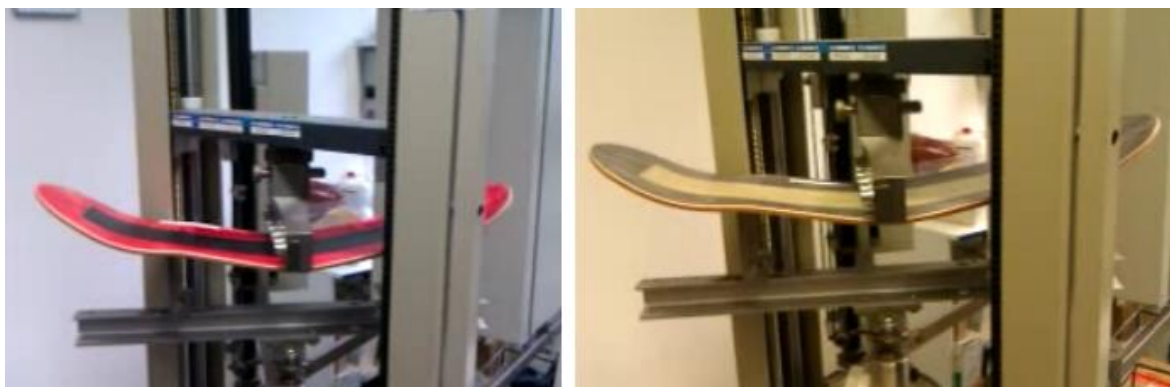
## 5.4 Zhodnocení jednotlivých měření

### 5.4.1 Skateboard č. 1



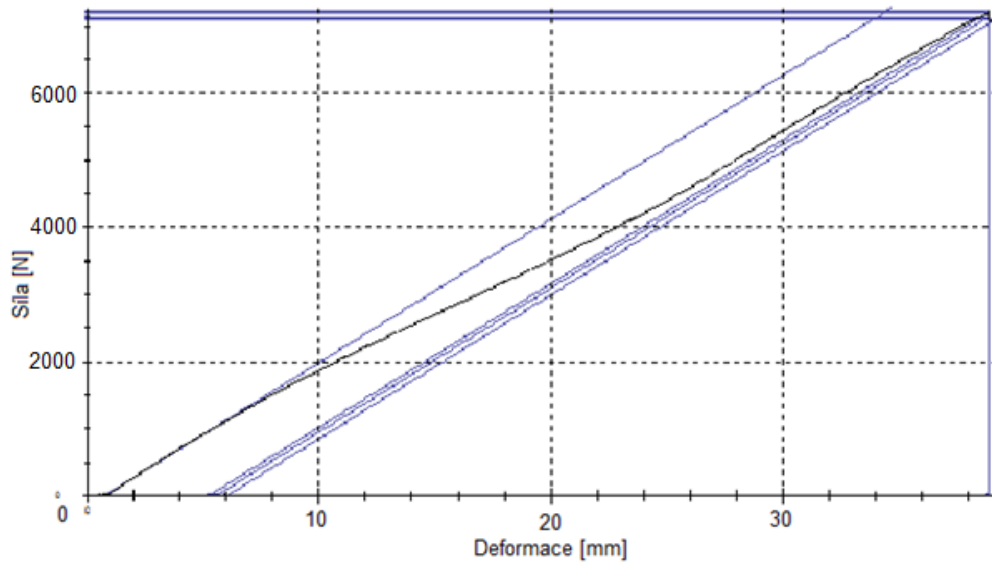
Obr. 5-10 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 1

První testovaný skateboard odpovídal typickým vlastnostem epoxidové pryskyřice, která disponuje vysokou pevností na úkor křehkosti, která se u prováděné zkoušky projevila lineárním nárůstem zatěžující síly až na 12 400 MPa s velmi malým průhybem 36 mm po kterém došlo k nárazovému lomu. Použitá výztuž neměla větší vliv na zlepšení mechanických vlastností díky umístění v horní části, která v tomto případě byla namáhána na tlak. Tudiž nemohlo dojít k využití hlavní výhody rovingové výztuže, která je určena především k tahovému namáhání.



Obr. 5-11 Skateboard 1 a 2 při provádění zkoušky

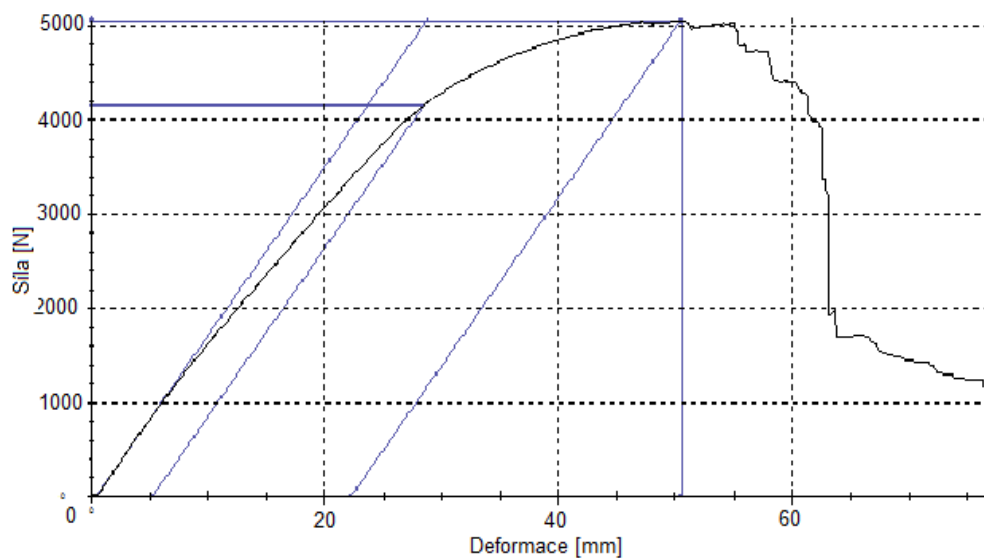
### 5.4.2 Skateboard č. 2



Obr. 5-12 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 2

Zkoušený skateboard č. 2 vykazoval stejný průběh zkoušky, jako skateboard č. 1. Epoxidová pryskyřice zajistila skateboardu velkou pevnost 14 000 MPa při průhybu 38,2 mm po kterém došlo ke křehkému lomu. Z pohledu výztuž je posudek taktéž stejný, protože použitá jednosměrná tkanina má hlavní využití v tahovém namáhání.

### 5.4.3 Skateboard č. 3

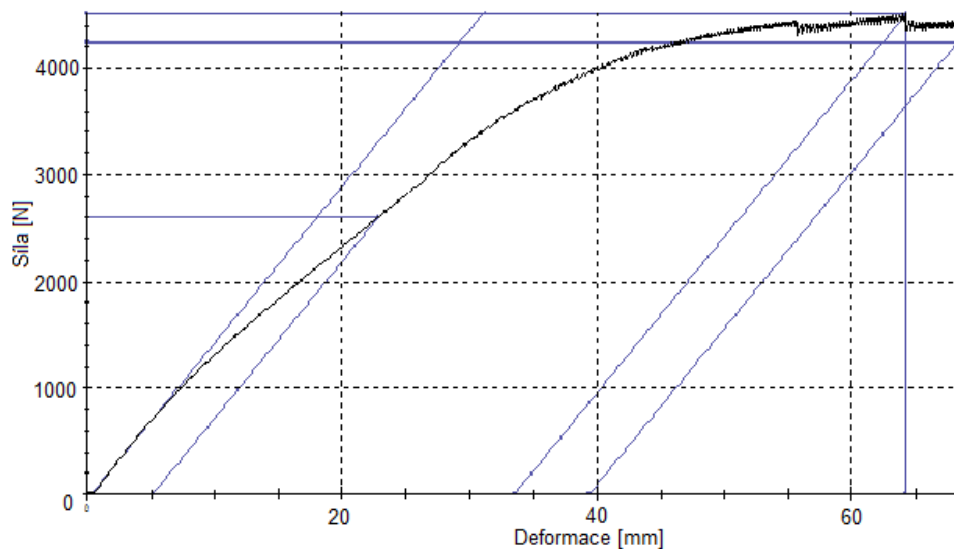


Obr. 5-13 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 3

Třetí zkoumaný skateboard č. 3 již od začátku nárůstu zatěžující síly vykazoval odlišné chování při průběhu zkoušky. Z teoretických znalostí o fenolové pryskyřici bylo zřejmé, že

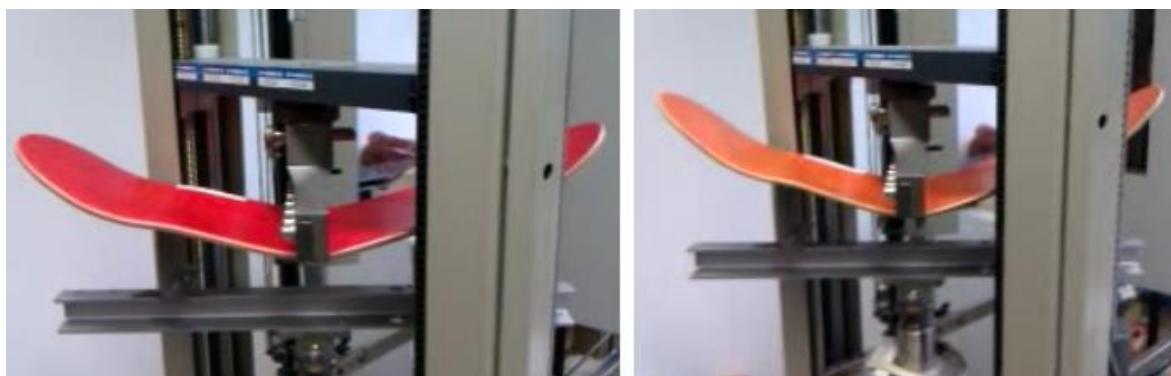
skateboard bude disponovat velkou houževnatostí, která se projevila nelineárním nárůstem zatěžující síly na 12 000 MPa v závislosti na deformaci, která vystoupala na 50,1 mm a při níž došlo k houževnatému lomu, u kterého se postupně lámaly jednotlivé pláty směrem od dolní části skateboardu k horní.

#### 5.4.4 Skateboard č. 4



Obr. 5-14 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 4

Skateboard č. 4 od jiného výrobce, u kterého jsme neurčili typ použité matrice, se při zkoušce zachoval, jako skateboard č. 3 z čehož jsem usoudil, že zde výrobce použil podobný typ fenolové pryskyřice vhodný pro tuto aplikaci. Při zkoušce dosáhl 9 870 MPa zatěžující síly s deformací 64 mm po které následoval houževnatý lom s postupným lámáním jednotlivých plátů, jako v předchozím případě.



Obr. 5-15 Skateboard 3 a 4 při provádění zkoušky

## 6 LYŽE

Pro druhou polovinu praktické části jsem vyrobil jeden pár lyží pomocí technologie ručního laminování, přičemž každá lyže jak konstrukčně, tak materiálově rozdílná.

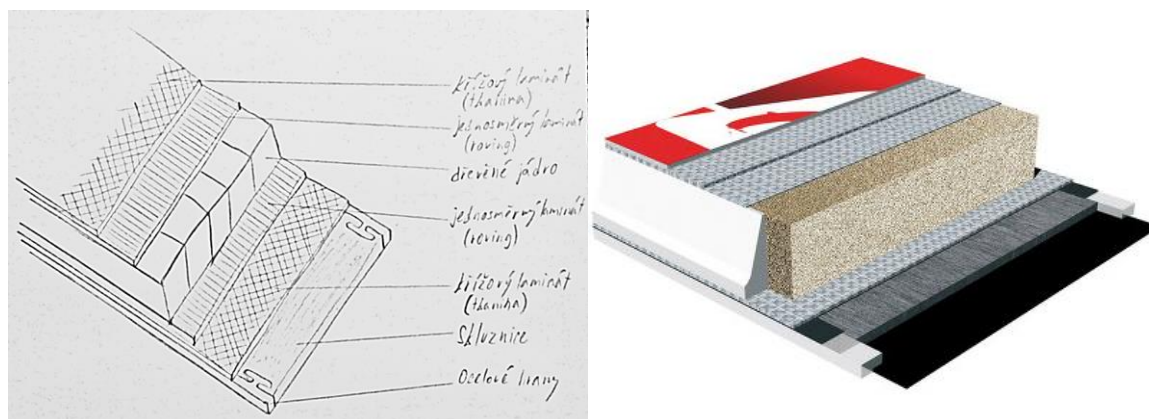


Obr. 6-1 Vyrobený pár lyží

### 6.1 Návrh

Vzhledem k mé oblíbené lyžařské disciplíně, kterou je skialpinismus, jsem vytvořil návrh konstrukce jednoho páru lyží s tím rozdílem, že v jedné lyži budou použita skelná vlákna a v druhé uhlíková. Jako návod pro návrh skladby lyží jsem použil katalogy firem zaměřené výhradně na výrobu skialpinistických lyží, které se v posledních letech zaměřují hlavně na hmotnost při zachování optimálních jízdních vlastností dle terénu, pro který jsou určeny.

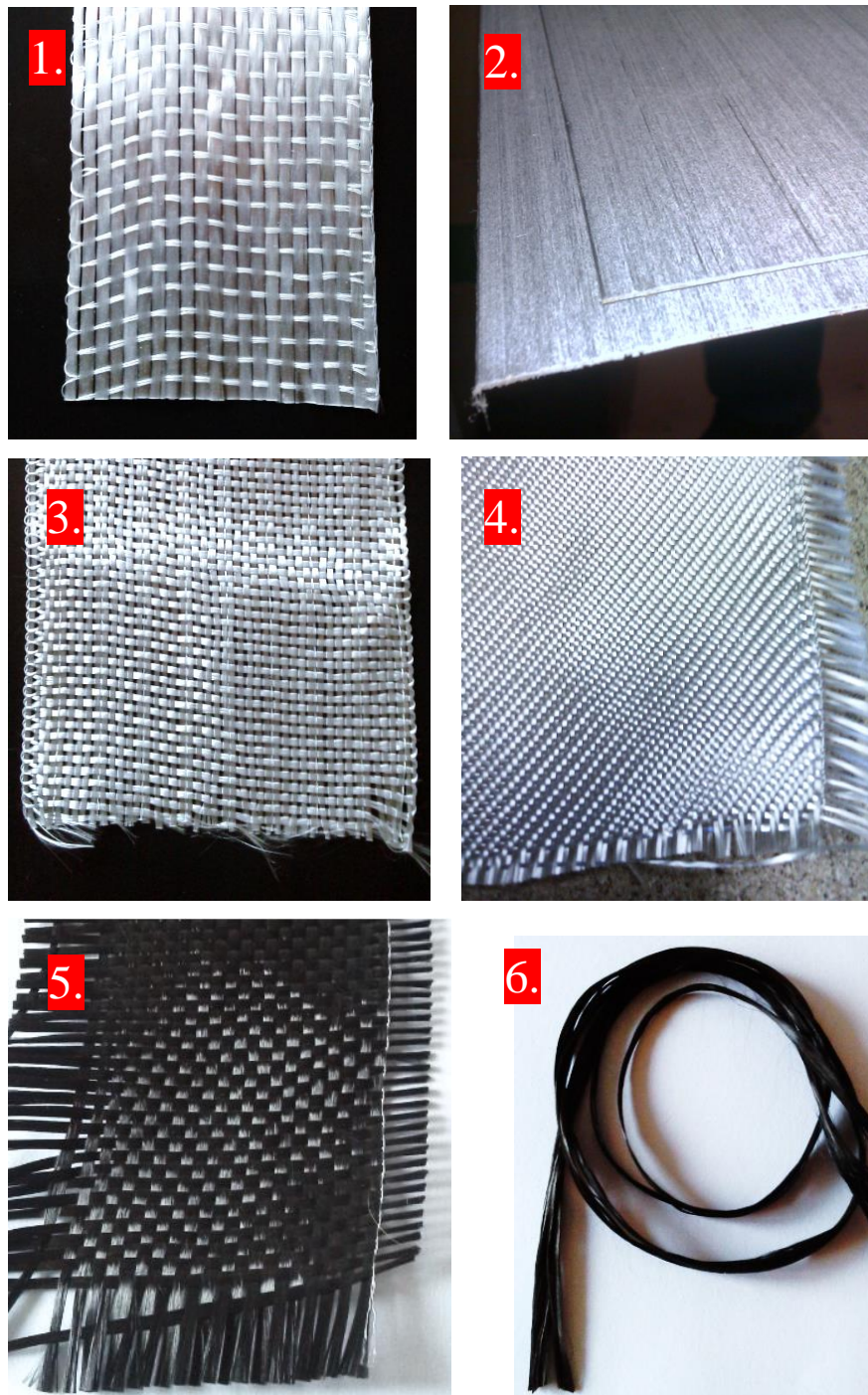
Navrhl jsem skladbu pro ruční výrobu lyže s ohledem na dostupné materiály, jednoduchost výroby, dosažení poměrně nízké hmotnosti a optimálních mechanických vlastností tudíž i jízdních vlastností.



Obr. 6-2 Návrh vlastní konstrukce v porovnání s konstrukcí lyže Sporten Guru

## 6.2 Popis použitých materiálů

Hlavními prvky konstrukce jsou materiály z uhlíkových a skelných vláken. Z čehož skelná vlákna jsou zde zastoupena ve formě 1D tkaniny protkané tavnou nití (1), jednosměrným rovingem o tloušťce 1mm (2) a dvěma typy 2D tkaniny o gramáži 280 g/m<sup>2</sup> s plátňovou vazbou (3) a 80 g/m<sup>2</sup> s keprovou vazbou (4). Uhlíková vlákna byla použita ve formě 2D tkaniny s gramáží 240 g/m<sup>2</sup> a plátňovou vazbou (5) a rovingovými vlákny (6).



Obr. 6-3 Obrázky vláknových materiálů

Další, důležité materiály které mi poskytla firma Sporten jsou dřevěná jádra, která jsou kombinována z bukového a topolového dřeva, skluznice z polyethylenového plastu P-Tex s číslem molekulové hmotnosti 1840 a ocelové hrany (7).



Obr. 6-4 Materiály od firmy Sporten

Jelikož dřevěné jádro se v dnešní době nedává přes celou délku lyže, použil jsem jako výztuž špičky a paty plast (8). Pro spojení všech těchto materiálů jsem použil epoxidovou pryskyřici Letoxit PR 220 od firmy 5M (9).



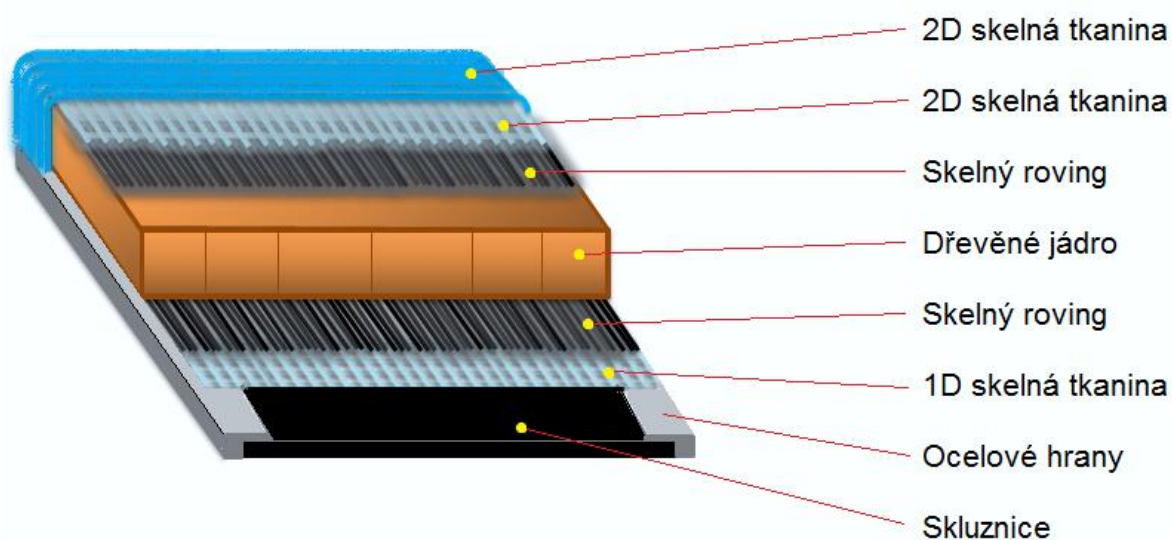
Obr. 6-5 Obrázek výztuže špičky a paty spolu s použitým lepidlem

### 6.3 Konstrukce skelné lyže A

Lyže patří do kategorie capové (skořepinové) konstrukce, které jsme dosáhli překrytím lyže poslední 7. vrstvou tkaniny. Materiály jsou voleny tak, aby lyže měla co nejlepší mechanickou odolnost jak proti ohybu tak krutu a tím byly zajištěny optimální jízdní vlastnosti. Konkrétně proti ohybu jsem využil vlastností skelných vláken a použil jednosměrně orientovaný roving spolu s překrývajícími tkaninami. Odolnost proti krutu pak kompenzují 2D skelné tkaniny.

Jednotlivé materiály na sebe byly kladeny v pořadí:

1. Skluznice s ocelovými hranami
2. 1D skelná tkanina provázána tavnou nití
3. Jednosměrný skelný roving
4. Dřevěné jádro
5. Jednosměrný skelný roving
6. 2D skelná tkanina s gramáží 280 g/m<sup>2</sup>
7. 2D skelná tkanina s gramáží 80 g/m<sup>2</sup>



Obr. 6-6 Schéma struktury lyže A

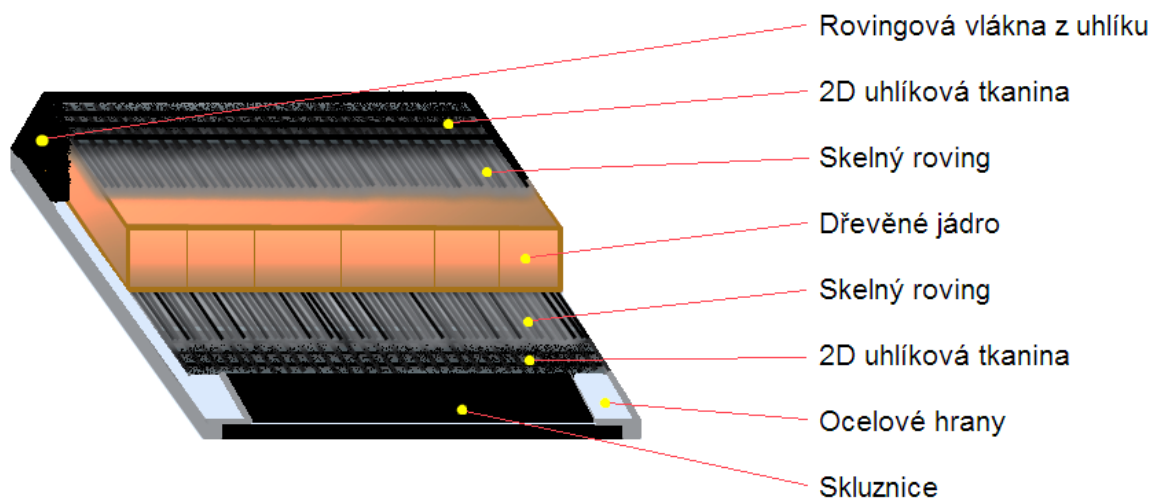


## 6.4 Konstrukce uhlíkové lyže B

Lyže je typem sendvičové konstrukce s bočnicemi z uhlíkových vláken. Její složení je stejné až na poslední krycí tkaninu, které zde není. Jelikož mají uhlíková vlákna lepší mechanické vlastnosti než skelná, tento nedostatek se kompenzuje. Jako náhradu ABS bočnic jsem využil rovingových vláken, které budou mít také podíl na výsledných mechanických vlastnostech.

Jednotlivé materiály na sebe byly kladeny v pořadí:

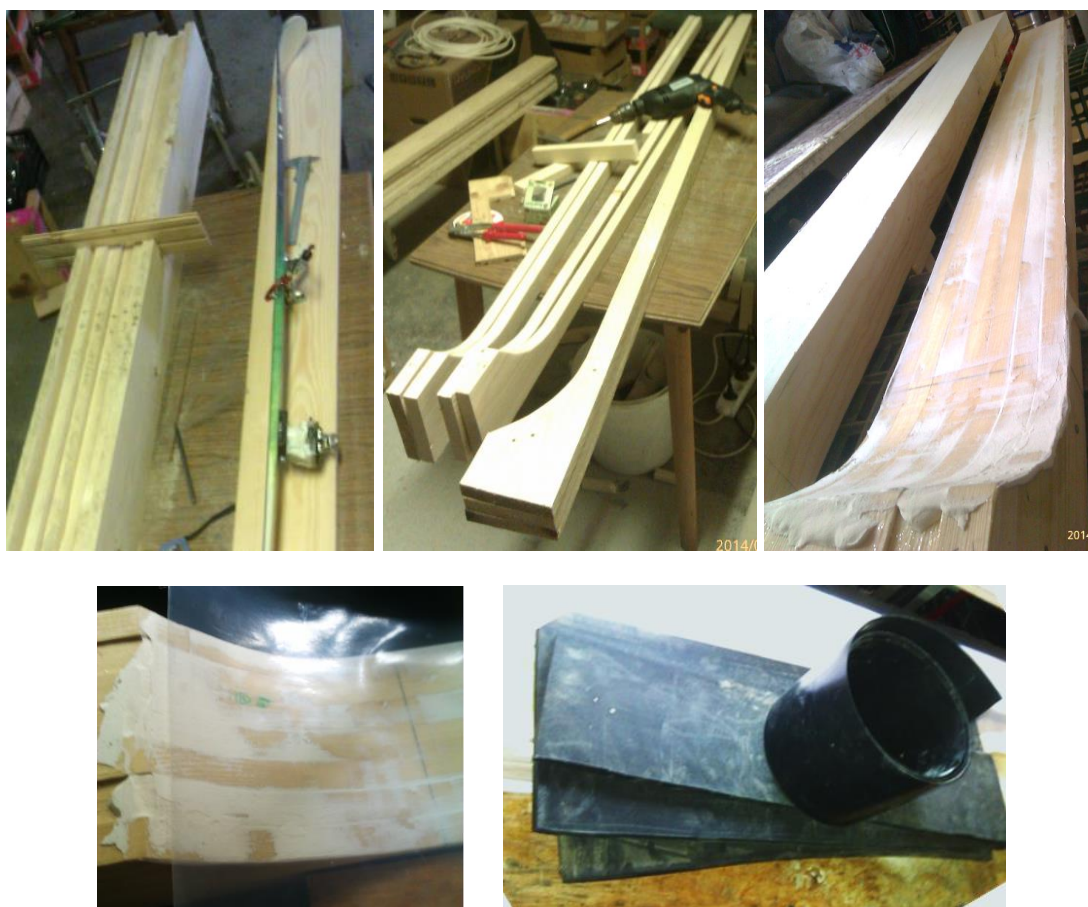
1. Skluznice s ocelovými hranami
2. 2D uhlíková tkanina
3. Jednosměrný skelný roving
4. Dřevěné jádro
5. Jednosměrný skelný roving
6. 2D uhlíková tkanina



Obr. 6-7 Schéma struktury lyže B

## 6.5 Popis výroby

Před samotnou výrobou lyží, jsem si zhotovil formu pro jednu lyži, která se skládá ze dvou částí, horní a spodní, mezi kterými se lyže lisovala. Tuto formu jsem vyrobil ze smrkových desek, do kterých jsem vyřezal tvar lyže z profilu podle vlastního návrhu. Následně je sešrouboval a výslednou plochu vybrousil, nalakoval a zarovnal jemnozrnnou sádrou do požadované roviny. Součástí formy jsou také izolační fólie, mezi kterými byla lyže lepena, aby se nepřichytila k formě při vytvrzování. V horní části formy byla navíc umístěna pryž, která vyrovnala všechny nerovnosti formy, aby byl výsledek co nejlepší.



*Obr. 6-8 Výroba formy*

Výroba lyže započala nákresem tvaru skluznice, od které se odvíjel tvar celé lyže. Po vystřížení přišly na řadu ocelové hrany, které jsem vytvaroval a pro následnou lepší manipulaci bodově přilepil ke skluznici sekundovým lepidlem, je to také důležité proto, aby se při slisování ve formě neodsunuly a nevytvořily tak mezeru mezi hranou a skluznicí. Dalším postupem byl nástřih všech potřebných vrstev tkanin a rovingu, který jsem jednoduše vystříhl podle tvaru již připravené skluznice s hranami tak, aby tkanina byla s rezervou pro následné opracování.



*Obr. 6-9 Příprava materiálů před lepením*

Po přípravě všech potřebných materiálů jsem přistoupil k samotnému lepení, k němuž jsem si připravil 80 gramů lepidla na jednu lyži. Lepení probíhalo tak, že jednotlivé materiály na sebe byly vrstveny v pořadí od skluznice až po poslední tkaninu podle návrhu každé lyže, přičemž byly postupně prosycovány lepidlem. Na prosycení všech materiálů byl kladen velký důraz, hlavně tkanin, aby v lyži nevznikly vzduchové bubliny a lepidlo rovnoměrně vyplnilo celý povrch. Toho jsem docílil vhodně zvoleným válečkem pro nanášení lepidla. Po nanesení poslední vrstvy, byla lyže překryta horní izolační fólií, na kterou se přiložila vyrovnávací pryž spolu s horní částí formy. Celá forma se na závěr slisovala pomocí čtyř svorek a vložila do vyhřívané skříně, kde pryskyřice vytvrzovala 24 hodin při zvýšené teplotě. Po úplném vytvrzení se lyže vytáhla z formy a nahrubo obrousila.



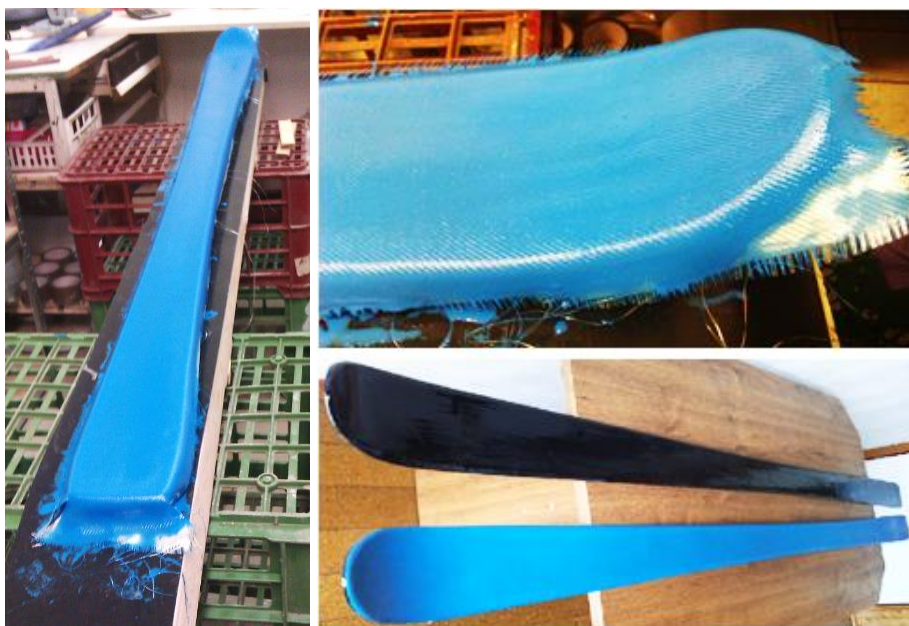
*Obr. 6-10 Postup lepení lyží*

Protože kladený roving i tkaniny hrubě přesahovaly šířku jádra, vznikl po stranách lyže žlábek, který jsem vyplnil rovingovými vlákny spolu s pryskyřicí.



*Obr. 6-11 Opracování po vytažení lyže z formy*

Rozdíl mezi výrobou skelné a uhlíkové lyže, byl kromě použitých tkanin, pouze v závěrečném opracování. Uhlíková lyže se po vytvrzení žlábků pouze obrousila do výsledného tvaru a nastříkala ochranným bezbarvým lakem. Skelná lyže se po vytvrzení žlábků také obrousila do výsledného tvaru, ale kvůli nevzhlednému a nepřilíživému povrchu se překryla tkaninou (vrstva č. 7). Při jejím lepení byla do pryskyřice přimíchána modrá barva, která zakryla všechny nevzhledné materiály, a tím vznikl pohledově pěkný vyrovnaný povrch.



Obr. 6-12 Závěrečné opracování

## 6.6 Popis provedených zkoušek

Byly provedeny jen základní zkoušky podle normy.

### 6.6.1 ISO 5902 – Stanovení elastických vlastností

- Stanovení konstanty pružení středu
- Stanovení torzní konstanty pružení přední a zadní části lyže

Konstanta pružení je poměr síly působící na lyži k odpovídajícímu prohnutí lyže.

$$c = \frac{F}{f} \quad (6)$$

Torzní konstanta pružení je poměr použitého momentu k odpovídajícímu úhlu zkroucení.

$$C_t = \frac{M}{\alpha} \quad (7)$$

### 6.6.2 ISO 6266 – Stanovení indexu únavy cyklickým ohybovým namáháním

Princip zkoušky spočívá v tom, že na základě konstanty pružení středu se určí průhyb lyže, který bude vytvářen a to cyklicky – 20 000 cyklů. Po tomto testu se provede vizuální kontrola, zda nedošlo k nějakému poškození a určí se index únavy výšky vzpruhu index únavy konstanty pružení středu.

- Index únavy výšky vzpruhu:

$$K_h = \left( h_B - \frac{h'_B}{h_B} \right) \times 100 \quad (8)$$

$h_B$  - počáteční výška vzpruhu

$h'_B$  - konečná výška vzpruhu

- Index únavy konstanty pružení středu:

$$K_h = \left( c_M - \frac{c'_M}{c_M} \right) \times 100 \quad (9)$$

$c_M$  - počáteční konstanta pružení středu

$c'_M$  - konečná konstanta pružení středu

## 6.7 Vyhodnocení experimentálně dosažených výsledků

Veškeré testování lyží provedla firma Sporten na přístrojích speciálně zaměřených pro testování lyží dle platných norem.

Měřené vzorky:

- A – lyže ze skelných vláken s hmotností 1478 g
- B – lyže z uhlíkových vláken s hmotností 1451 g

Vzhledem k výslednému malému rozdílu hmotností, které je 27 gramů, bude výsledné porovnání přesnější a bude hlavně záviset na použitých materiálech.

### 6.7.1 Stanovení elastických vlastností dle normy ISO 5902

Tab. 3 Stanovení konstanty pružení středu

Měřená veličina	Jednotka	A	B
Konstanta pružení - c	[N/mm]	3,786	4,000
Průhyb při zatížení 300 N	[mm]	77,4	75,0

Výsledkem této zkoušky jsou průhyby, které vznikly působením samotné síly působící kolmo do středu lyže. Výsledné hodnoty nám ukazují, že lyže B má o 2,4 mm menší průhyb při stejné zatěžující síle, z čehož vyplývá, že použití uhlíkových vláken má lepší vliv na mechanické vlastnosti lyže v ohybu a tudíž i jízdní vlastnosti.



Obr. 6-13 Průběh zkoušky při stanovení konstanty pružení středu

Tab. 4 Stanovení torzní konstanty pružení přední části lyže

Měřená veličina	Jednotka	A	B
Torzní konstanta <b>přední části</b> lyže - $C_t$	[N.m/°]	1,15	1,11
Úhle zkroucení při zatížení 15 N.m	[°]	13,0	13,5

Tab. 5 Stanovení torzní konstanty pružení zadní části lyže

Měřená veličina	Jednotka	A	B
Torzní konstanta <b>zadní části</b> lyže - $C_t$	[N.m/°]	1,20	1,20
Úhly zkroucení při zatížení 15 N.m	[°]	12,5	12,5

Výsledky zkoušky, při které byly lyže namáhány na krut v přední a zadní části lyže, jsou víceméně stejné díky podobné konstrukci. Zde se neprojevil rozdíl mezi použitými materiály, protože namáhání je závislé na šířce lyže, která je tak malá, že nemohlo dojít k využití hlavních předností použitých materiálů.



Obr. 6-14 Průběh zkoušky při stanovení torzní konstanty přední a zadní části lyže

### 6.7.2 Stanovení indexu únavy cyklickým ohybovým namáháním dle normy ISO 6266

- Vizuální kontrola po provedené zkoušce: Ani jeden z testovaných vzorků nevykazoval známky jakéhokoliv viditelného poškození.
- Index únavy výšky vzpruhu: Vzorek A i B měl tak malé počáteční hodnoty, že index nešlo stanovit.



Tab. 6 Index únavy konstanty pružení středu

Měřená veličina	Jednotka	A	B
Index únavy konstanty pružení středu - $c_M$	[-]	2,48	2,52

Výsledky cyklické zkoušky dopadly o něco lépe pro lyži A ze skelných vláken. Tento výsledek přikládám většímu množství jednosměrně orientovaných vrstev v lyži spolu s tím, že je na lyži o jednu vrstvu tkaniny navíc, což se právě na dlouhodobějším cyklickém namáhání pozitivně projevilo.



Obr. 6-15 Průběh zkoušky cyklickým namáháním

Co se týče obecného srovnání výsledků lyží s konkurenčními lyžemi sjezdovými, jsou na úrovni nižší až střední třídy sportovní kategorie.

## ZÁVĚR

Praktická část byla zaměřena na porovnání použitých kompozitních materiálů při aplikaci na skateboardy a porovnání jednoho páru lyží, z čehož jedna je ze sklených a druhá z uhlíkových vláken. K porovnání čtyř testovaných skateboardů byla využita zkouška tříbodovým ohybem dle platných norem ČSN EN ISO 178. Lyže byly testovány na flexi, torzi a cyklické namáhání dle norem ISO 5902 a ISO 6266.

Čtyři vzorky skateboardů, které jsme mezi sebou porovnávaly, se nelišili rozměrově, ani konstrukčně. Jediný rozdíl byl v typu použitého lepidla, které se na výsledcích provedené zkoušky jasně projevilo. Testované skateboardy č. 1 a 2 s výztuží, které byly lepeny epoxidem, dosáhly modulu pružnosti 12 400 MPa a 14 000 MPa, maximální síla byla neměřena 188 N a 196 N při vykonávané práci 120 879 N.mm a 136 534 N.mm. Jejich chování se oproti skateboardům č. 3 a 4 projevilo zejména vyšší pevností s menším průhybem a následným křehkým lomem. Skateboardy č. 3 a 4 bez výztuže lepené fenolovou pryskyřicí, dosáhly modulu pružnosti 12 000 MPa a 9 870 MPa, maximální síla byla naměřena 141 N a 126 N při vykonávané práci 167 211 N.mm a 194 779 N.mm. Jejich chování při zkoušce vykazovalo houževnaté vlastnosti s velkým průhybem a následným houževnatým lomem, který se projevilo postupným praskáním jednotlivých lamel.

Jak je zřejmé z výsledných hodnot, skateboardy se chovaly podle očekávání s ohledem na mechanické vlastnosti použitých lepidel. Výztuž použitá v případě skateboardů 1 a 2 neměla na výsledné mechanické vlastnosti významný vliv, zejména díky umístění, které bylo v horní části a bylo namáhané na tlak, mělo být spíše ve spodní části, aby bylo využito hlavních vlastností vláknového kompozitu, kterou je vysoká pevnost v tahu a bylo dosaženo větší pevnosti v ohybu. Konkurenční skateboard byl z pohledu mechanických vlastností téměř totožný se skateboardem č. 4. Výsledné posouzení, zda je lepší skateboard s vyšší pevností nebo naopak houževnatější už záleží na tom, v jaké aplikaci bude skateboard používán.

Vyrobený pár skialpinistických lyží byl porovnávaný s ohledem na použitou výztuž. Veškeré měření proběhlo ve firmě Sporten, která má zařízení na měření mechanických vlastností sjezdových lyží. Již po samotné výrobě měly lyže téměř stejnou hmotnost, navzdory trochu odlišné skladbě i konstrukci, která byla výhodou pro lepší porovnání jejich vlastností. Hmotnost lyže A je 1 478 g a lyže B 1 451 g. Průhyb středu lyží při stejném zatížení 300 N byl u lyže A s použitím skelných vláken 77,4 mm a u lyže B s použitím uhlíkových

vláken 75 mm. Úhel zkroucení přední části lyží, při stejném zatížení 15 N.m, byl u lyže A  $13^\circ$  a u lyže B  $13,5^\circ$ . Úhel zkroucení zadní části lyží byl stejný  $12,5^\circ$ , při totožném zatížení. Pro poslední posouzení jsem zvolil cyklickou zkoušku pružení středu, jejíž výsledné konstanty jsou u lyže A 2,48 a u lyže B 2,52.

Z experimentálně naměřených výsledků lze určit, že i když lyže B má o jednu vrstvu tkaniny méně než lyže A, lepší vlastnosti uhlíkových vláken vykompenzovaly rozdíl mechanických vlastností při měření průhybu středu lyže a výsledná hodnota byla dokonce o 2,4 mm lepší, z čehož se dá usoudit, že lyže disponuje větší pevností. Naopak při cyklickém namáhání se projevila větší tuhost u lyže A, kterou má na svědomí větší množství jednosměrně orientovaných vrstev. Úhel zkroucení přední i zadní části lyží se nijak významně neliší, zejména díky stejným šířkám lyží, které jsou tak malé, že se na nich nemůže projevit jejich materiálová rozdílnost.

Na základě hodnocení firmy Sporten, lze lyže v porovnání s konkurenčními lyžemi sjezdovými, lyže zařadit do nižší až střední třídy sportovní kategorie. Co se týče porovnání v kategorii skialpinistických lyží, na základě hmotnosti, jsou lyže srovnatelné s dnešními výrobnými modely. Ovšem u lyže B je vzhledem k použitým uhlíkovým vláknům poměrně vysoká hmotnost. Jako modifikaci těchto vyrobených lyží a redukci váhy, by se daly využít pro odlehčení dřevěných jader voštinové materiály a lépe zvolené typy výztuže, přesně zaměřené na konkrétní směr namáhání.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Kompozity [online]. [cit. 2013-11-05]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.volny.cz/zkorinek/>>
- [2] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. 194 s.
- [3] Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.: Úvod do studia materiálů. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- [4] BAREŠ, Richard A. Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 325 s. ISBN (Váz.).
- [5] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 80-737-2279-8
- [6] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2013-11-10]. Dostupné z WWW:  
<[http://www.stefanmichna.com/download/technickematerialy\\_II/kompozitni\\_materialy.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technickematerialy_II/kompozitni_materialy.pdf)>
- [7] ŠTUMBAUER, J. *Materiálové vybavení pro carvingové lyžování. Metodický dopis*. Praha: Svaz lyžařů České republiky, 2004, 18 s. Dostupné z WWW:  
<[http://www.banda.cz/webs/s/snowblade-academy/usr\\_files/file/metodicky-dopis-lyzovani.pdf](http://www.banda.cz/webs/s/snowblade-academy/usr_files/file/metodicky-dopis-lyzovani.pdf) >
- [8] Mechanicsofsport [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z WWW:  
<[http://www.mechanicsofsport.com/skiing/equipment/skis/ski\\_construction.html](http://www.mechanicsofsport.com/skiing/equipment/skis/ski_construction.html)>
- [9] LyzeLyze.cz. *Články: Technologie* [online]. 2013 [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: <http://www.lyzelyze.cz/article/technologie/>.
- [10] My sport [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.mysport.cz/katalog/zimni-sporty/sjezdove-lyzovani/sjezdove-lyze/zavodni-sjezdky/sporten-sjezdove-lyze-ahv-06-gs-11-12.html>>
- [11] Volkl [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.volkl.com/constructions/?L=7>>
- [12] Sporten [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.sporten.cz/cze/katalog/sjezdove-lyze/sportovni/product:292>>
- [13] Ski a bike centrum Radotín [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z WWW:  
<<http://eshop.lyze-radotin.cz/lyze-rossignol-pursuit-14ltd-aramid-basalt-vazani-axium-110stpi2/>>

- [14] Motorkari.cz [online]. [cit. 2013-11-24]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.motorkari.cz/forum-detail/?ft=117672&fid=34>>
- [15] Westige.com [online]. [cit. 2013-11-24]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.westige.com/index.php?view=konstrukce>>
- [16] Snowboarding [online]. [cit. 2013-11-24]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.snowboarding.kx.cz/snowboard.html>>
- [17] BINTER, L., et al. Snowboarding. 2. vyd., Praha: Grada Publishing, 2002. 132 s.  
ISBN 80-247-0246-0
- [18] Boardmania [online]. [cit. 2013-11-27]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.boardmania.cz/prodej/Deska-Eina-Andreu-Script-7-75->>
- [19] Prefa kompozity, a.s. [online]. [cit. 2013-11-27]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby-tazenych-profilu-prefen>>
- [20] Lusti [online]. [cit. 2013-11-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.lusti.cz/info/>>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Synergické chování složek kompozitu .....</i>	12
<i>Obr. 1-2 Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu .....</i>	13
<i>Obr. 1-3 Část kompozitu, deformovaná tahovým jednoosým napětím .....</i>	14
<i>Obr. 1-4 Rozdíl mezi nanokompozitem (vlevo) a mikrokompozitem (vpravo) .....</i>	16
<i>Obr. 1-5 1D, 2D a 3D uspořádání vláken .....</i>	17
<i>Obr. 1-6 Laminátová konstrukce skateboardu a sendvičová konstrukce s voštinovým jádrem .....</i>	18
<i>Obr. 1-7 Částicové, vláknové a laminární [1] .....</i>	18
<i>Obr. 1-8 Diagram TTT .....</i>	20
<i>Obr. 1-9 Typy vláken (skelné, uhlíkové, kevlarové) .....</i>	21
<i>Obr. 1-10 Kompozitní materiály pro skateboardy, lyže, snowboardy .....</i>	22
<i>Obr. 2-1 Složení lyže [8] .....</i>	23
<i>Obr. 2-2 Sendvičová konstrukce lyže Sporten AHV 06 GS (12/13) [10] .....</i>	24
<i>Obr. 2-3 Krabicová konstrukce lyží od výrobce Völkl [11] .....</i>	25
<i>Obr. 2-4 Capová konstrukce lyže značky Sporten Raptor [12] .....</i>	25
<i>Obr. 2-5 Technologie Dualtec u lyže Rossignol Pursuit kombinuje capovou konstrukci spolu s vertikálními bočnicemi [13] .....</i>	26
<i>Obr. 2-6 Beta konstrukce firmy Atomic [14] .....</i>	26
<i>Obr. 2-7 Konstrukce snowboardu s dřevěným jádrem [15] .....</i>	27
<i>Obr. 2-8 Technologie sidewalls vlevo, konstrukce s CAP vpravo [16] .....</i>	28
<i>Obr. 2-9 Konstrukce skateboardu dle podélného prohnutí desky (concavu) [18] .....</i>	29
<i>Obr. 3-1 Schéma ručního laminování .....</i>	30
<i>Obr. 3-2 Ruční laminování .....</i>	31
<i>Obr. 3-3 Nanášení sprejem .....</i>	31
<i>Obr. 3-4 Schéma lisování se vstřikem – RTM .....</i>	32
<i>Obr. 3-5 Forma pro technologii RTM .....</i>	33
<i>Obr. 3-6 Skladba technologicky potřebných materiálů .....</i>	33
<i>Obr. 3-7 Vakuová infúze .....</i>	34
<i>Obr. 3-8 Vakuové lisování prepregu v autoklávu .....</i>	35
<i>Obr. 3-9 Voštinový sendvič .....</i>	35
<i>Obr. 3-10 Schéma výrobní linky pultruzních profilů [19] .....</i>	36
<i>Obr. 3-11 Schéma navíjení .....</i>	37

<i>Obr. 3-12 Schéma výroby SMC materiálu</i> .....	38
<i>Obr. 3-13 Lis na SMC materiály</i> .....	38
<i>Obr. 5-1 Zkoumané skateboardy</i> .....	42
<i>Obr. 5-2 Skateboard č. 1 – skladba, výztuž na horní straně</i> .....	43
<i>Obr. 5-3 Skateboard č. 2 – při ohybové zkoušce</i> .....	43
<i>Obr. 5-4 Skateboard č. 3 – Při ohybové zkoušce</i> .....	44
<i>Obr. 5-5 Skateboard č. 4 – Při ohybové zkoušce</i> .....	44
<i>Obr. 5-6 Schéma zkoušky tříbodovým ohybem</i> .....	45
<i>Obr. 5-7 Zkušební stroj ZWICK 1456</i> .....	47
<i>Obr. 5-8 Graf závislosti zatěžující síly na poměrné deformaci</i> .....	49
<i>Obr. 5-9 Skateboardy po provedené zkoušce</i> .....	49
<i>Obr. 5-10 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 1</i> .....	50
<i>Obr. 5-11 Skateboard 1 a 2 při provádění zkoušky</i> .....	50
<i>Obr. 5-12 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 2</i> .....	51
<i>Obr. 5-13 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 3</i> .....	51
<i>Obr. 5-14 Křivka závislosti síly na deformaci u skateboardu č. 4</i> .....	52
<i>Obr. 5-15 Skateboard 3 a 4 při provádění zkoušky</i> .....	52
<i>Obr. 6-1 Vyroběný pár lyží</i> .....	53
<i>Obr. 6-2 Návrh vlastní konstrukce v porovnání s konstrukcí lyže Sporten Guru</i> .....	53
<i>Obr. 6-3 Obrázky vláknových materiálů</i> .....	54
<i>Obr. 6-4 Materiály od firmy Sporten</i> .....	55
<i>Obr. 6-5 Obrázek výztuže špičky a paty spolu s použitým lepidlem</i> .....	55
<i>Obr. 6-6 Schéma struktury lyže A</i> .....	56
<i>Obr. 6-7 Schéma struktury lyže B</i> .....	57
<i>Obr. 6-8 Výroba formy</i> .....	58
<i>Obr. 6-9 Příprava materiálů před lepením</i> .....	59
<i>Obr. 6-10 Postup lepení lyží</i> .....	60
<i>Obr. 6-11 Opracování po vytažení lyže z formy</i> .....	60
<i>Obr. 6-12 Závěrečné opracování</i> .....	61
<i>Obr. 6-13 Průběh zkoušky při stanovení konstanty pružení středu</i> .....	63
<i>Obr. 6-14 Průběh zkoušky při stanovení torzní konstanty přední a zadní části lyže</i> .....	64
<i>Obr. 6-15 Průběh zkoušky cyklickým namáháním</i> .....	65

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Tabulka naměřených hodnot .....</i>	48
<i>Tab. 2 Rozlišení naměřených křivek .....</i>	48
<i>Tab. 3 Stanovení konstanty pružení středu .....</i>	63
<i>Tab. 4 Stanovení torzní konstanty pružení přední části lyže.....</i>	63
<i>Tab. 5 Stanovení torzní konstanty pružení zadní části lyže .....</i>	64
<i>Tab. 6 Index únavy konstanty pružení středu .....</i>	65



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$E$	Modul pružnosti
$F_{MAX}$	Maximální síla
$\varepsilon$	Deformace
$y$	Průhyb
$F_{LOM}$	Síla při přelomení
$W$ při $F_{MAX}$	Práce při maximální síle
$W$ při $F_{LOM}$	Práce při lomové síle
$a$	Tloušťka tělesa
$b$	Vzdálenost podpěr