

# **Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur Vakuovou infuzí pod pružnou folií**

Bc. Daniel Fabriger

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel FABRIGER**  
Osobní číslo: **T080362**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur pomocí vákuové infuze pod pružnou folií**

Zásady pro vypracování:

- 1. Technologie výroby kompozitních materiálů s polymerními matricemi.**
- 2. Princip infuzních technologií, matrice, výtzuže a pomocné materiály.**
- 3. Návrh technologického postupu výroby konkrétního výrobku pomocí technologie Vacuum foil infusion (VFI).**
- 4. Výroba konkrétního výrobku pomocí VFI.**
- 5. Infuzní strategie. Ekonomické zhodnocení výroby.**
- 6. Shrnutí poznatků.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitu. Brno, 1999.
- [2] Reinhart, T. J.: Engineered materials handbook. Composites. Vol. 1., ASM
- [3] Kořínek, Z.: Kompozity. dostupné na: [www.volny.cz/korinek](http://www.volny.cz/korinek)
- [4] Ehrenstein, G. W.: Polymérní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.
- [5] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 1988.
- [6] [www.rtmcomposites.com](http://www.rtmcomposites.com)
- [7] [www.resininfusion.com](http://www.resininfusion.com)
- [8] [www.airtech.lu](http://www.airtech.lu)

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

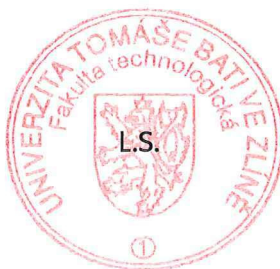
Datum zadání diplomové práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **3. června 2011**

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ..... Obor: .....

## 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 .....

.....

---



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá technologií výroby sendvičových kompozitních struktur vakuovou infuzí pod pružnou folií. Teoretická část definuje kompozitní materiály, popisuje jejich jednotlivé složky a zabývá se popisem technologiemi výroby kompozitních sendvičových materiálů. Praktická část je zaměřena na popis technologie vakuové infuze pod pružnou folií, návrhem technologického postupu výroby konkrétního výrobku a jeho zhodnocením.

Klíčová slova: vakuová infuze, kompozitní materiál, sendvič, výztuž

## **ABSTRACT**

This Master thesis studies the vacuum foil infusion technology of sandwich composite. The theoretical section defines composite materials, describes each components and deals with the description of technologies of composite sandwich materials. The practical part is focused on the description of vacuum foil infusion , designing technological proces of production of a particular product and its appreciation.

Keywords: vacuum foil infusion, composite material, sandwich, reinforcement

Chtěl bych poděkovat za cenné rady, připomínky a čas svému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D a Ing. Vladimíru Rusnákovi za pomoc při výrobě vzorků a konzultacích. Dále patří poděkování také firmě Form s.r.o., která celou experimentální část finančně zaštitila. Velký dík patří mým rodičům za materiální i morální podporu během celého studia.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	14
1.1.1 Úloha matrice .....	15
1.1.2 Úloha výztuže.....	16
1.1.3 Forma výztuže .....	16
1.2 SENDVIČOVÉ KOMPOZITNÍ KONSTRUKCE .....	16
1.2.1 Význam sendvičové struktury .....	17
1.2.2 Vlastnosti sendvičové konstrukce .....	18
1.2.3 Pevnost a Tuhost v Ohybu .....	18
1.2.4 Druhy sendvičových jader.....	20
1.2.4.1 Balzové jádro .....	20
1.2.4.2 Voštiny.....	21
1.2.4.3 Pěny .....	23
1.2.4.4 3D Tkaniny .....	26
1.2.5 Využití sendvičových jader.....	27
1.2.6 Tkaniny .....	29
<b>2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH STRUKTUR</b> .....	<b>32</b>
2.1 STŘÍKÁNÍ (SPRAY LAY-UP) .....	32
2.2 RUČNÍ KLADENÍ (HAND LAY-UP).....	33
2.3 VFI (VACUUM FOIL INFUSION).....	34
2.4 NAVÍJENÍ VLÁKEN .....	35
2.5 PULTRUZE.....	36
2.6 VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVÁNÍ - RTM (RESIN TRANSFER MOULDING) .....	37
2.7 VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVÁNÍ ZA POMOCÍ VAKUA - VARTM (VACUUM ASSISTED RTM).....	38
2.8 SPECIÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	38
<b>3 SIMULACE VFI POMOCÍ MKP</b> .....	<b>40</b>
3.1 VÝHODY POUŽITÍ MKP SOFTWARE.....	40
3.2 KOMERČNĚ DOSTUPNÉ SIMULAČNÍ PROGRAMY .....	40
3.3 RTM- WORX OBECNĚ POSTUP SIMULACE .....	41
3.3.1 Darcyho zákon .....	41
3.3.2 Stanovení Permeability výztuže .....	42
3.3.3 Strategie umístění vtoku 1.....	42
3.3.4 Strategie umístění vtoku 2.....	43
3.3.5 Pravidla pro simulaci.....	44
3.3.6 Příklad použití simulace v praxi.....	44
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>46</b>
<b>4 VAKUOVÁ INFUZE KOMPOZITNÍCH SENDVIČOVÝCH STRUKTUR POMOCÍ PRUŽNÉ FOLIE</b> .....	<b>47</b>
4.1 VAKUOVÁ INFUZE .....	47
4.1.1 Bod gelace, doba gelace (želatinace) a doba zpracovatelnosti .....	48

4.1.2	Pomocné materiály a komponenty použité při technologii VFI .....	49
<b>5</b>	<b>VÝROBA VZORKŮ .....</b>	<b>56</b>
5.1	VZOREK 1.....	58
5.2	VZOREK 2.....	71
5.3	VZOREK 3.....	78
5.4	VZOREK 4.....	82
5.5	VZOREK 5.....	87
5.6	VZOREK 6.....	91
5.7	VZOREK 7.....	96
5.8	VZOREK 8.....	102
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>115</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>118</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>120</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>124</b>

## ÚVOD

Tlak na snižování hmotnosti dopravních prostředků nutí konstruktéry snižovat hmotnost i v oblasti průmyslu kolejových vozidel. Znamé a doposud nejčastější velkoplošné partie (nad 5m<sup>2</sup>) vyráběné z kompozitu jsou elegantní přední čela kolejových vozidel (Endcabs). V poslední době přibývají i jiné velkoplošné konstrukce z kompozitů – nejčastěji střešní segmenty o různých plochách (až do 20m<sup>2</sup>), příčky v interiéru, podlahové nebo velkoplošné boční obkladové konstrukce.

V USA se objevují projekty výroby skeletu nákladních vagonů z kompozitů vyrobených právě vakuovou infuzí. Taktéž i lokální výrobce nákladních vagonů Tatravagonka 3 Poprad uvažoval o použití kompozitů pro střechy nákladních vagonů, avšak pro možné problémy s údržbou a neznalostí technologie oprav takovýchto konstrukcí v nákladní železniční dopravě zatím od tohoto počínu upustil. Technologie vakuové infuze kterou se zabývám v předložené v diplomové práci se taktéž uplatňuje i v leteckém průmyslu. Vhodným příkladem popisované technologie jsou nákladové dveře vojenského letounu Airbus A400M vyrobené německým sdružením Premium AEROTEC (plocha výrobků cca. 7x4m). Dle slov presidenta společnosti p. Hans Lonsingera trval vývoj a ověření technologie výroby tohoto produktu 3 až 4 roky. Rozmach vakuové infuze nastal v posledním desetiletí i díky možnosti predikce procesu metodou MKP. Objevují se první specializované programy pro RTM a infuzi – PAM-RTM, RTM-Works nebo LIMS – UI. Velký vliv má i nárůst výroby větrných elektráren a dále průnik této technologie (spolu s technologií „advanced RTM“) do leteckého průmyslu. Z výzkumu technologie metodou „pokus-omyl“ se stává uznávaná technologie řazená na špičku technologii zpracování kompozitů.

Diplomová práce se zabývá výrobou stropního krycího panelu pro vlakovou kabinu (plocha výrobku cca 2 x 0,4m) výše zmíněnou technologií výroby vakuovou infuzí. V teoretické části popisuje definicí kompozitních materiálů, jejími výhodami a základními složkami které tvoří kompozitní materiál. V další části se diplomová práce zabývá sendvičovými kompozitními konstrukcemi a jejich významem v dopravním průmyslu, protože v praktické části se experimentálně zabýváme výrobou kompozitní sendvičové konstrukce. V experimentální části diplomová práce popisuje výrobu konkrétního výrobku pomocí vakuové infuze s různými sendvičovými jádry, tkaninou, pryskyřicí. Vyhodnocoval se vliv těchto materiálů na kvalitu finálního výrobku. V závěru jsou zhrnuty doporučení a dosažené výsledky z jednotlivých vakuových infuzí.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Pro definování kompozitního materiálu neexistuje jen jedna definice která by jej jednoznačně definovala. Autoři používají různé definice. pomocí kterých lze lépe pochopit podstatu kompozitního materiálu. Například Bareš a jiní ve své publikaci uvádějí tyto definice:

Kompozity jsou složené materiály, u nichž se po smíšení materiálu se zcela odlišnými vlastnostmi, vytvoří jediná struktura. Jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídatnými, nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy. [1]

Kompozit je název pro heterogenní materiál složený nejméně ze dvou různých materiálových složek, jehož vlastností nedosahuje nejen žádná složka kompozitu samostatně, ale mnohdy ani vlastností, které by se daly předpokládat prostým součtem vlastností těchto složek.[2]

Kompozitem je obecně vzato každý vícefázový materiál, ve kterém jsou obě fáze (složky) významně zastoupeny (min. 5 objemových.%) a tím je docíleno lepší kombinace vlastností.[3]

Dnešnímu pojetí kompozitních materiálů jako moderních konstrukčních materiálů s mimořádnými vlastnostmi (a bohužel i cenou) lépe vyhovuje definice, charakterizující kompozity jako dvou a vícefázové materiály, které byly vytvořeny uměle, jejich konstituenty (fáze) jsou chemicky odlišné a mají zřetelné rozhraní).[3]

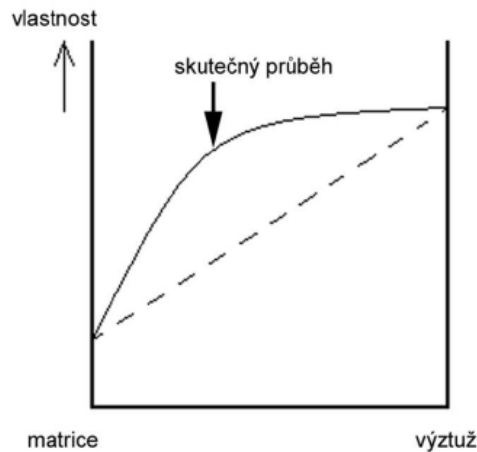
### **Synergismus**

Popis synergismu vyjadřuje definice podle Bareše [1] z níž vyplývá, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [4]

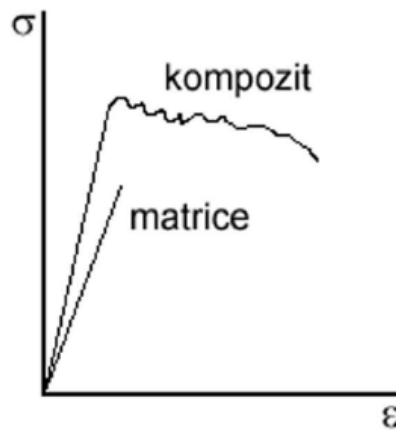
Je běžné, že příroda využívá synergických účinků různorodých materiálů pro dosažení lepších vlastností a vytváří materiály připomínající materiály kompozitní. Lze například porovnávat vrstvenou strukturu epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny se strukturou bambusového stonku. Příklady z přírody nacházíme nejen u mikrostruktury, ale i při aplikaci principů lehčených konstrukcí.



Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolností proti náhlému křehkému porušení. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [5]

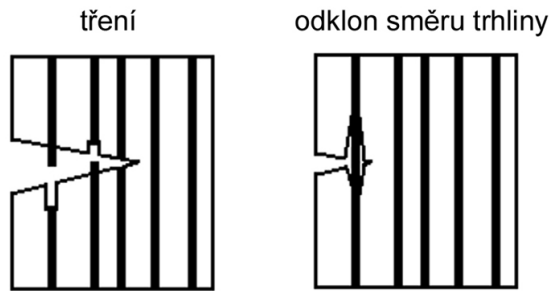


Obr. 1: Synergické chování složek kompozitu.[5]



Obr. 2: Tahový diagram křehké matrice a kompozitu.[5]

Uvedené chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlinka je bržděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde jednak k odklánění směru šíření trhliny, jednak k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny (viz obr.3.). Kvalita rozhraní mezi matricí a výztuhou má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu.

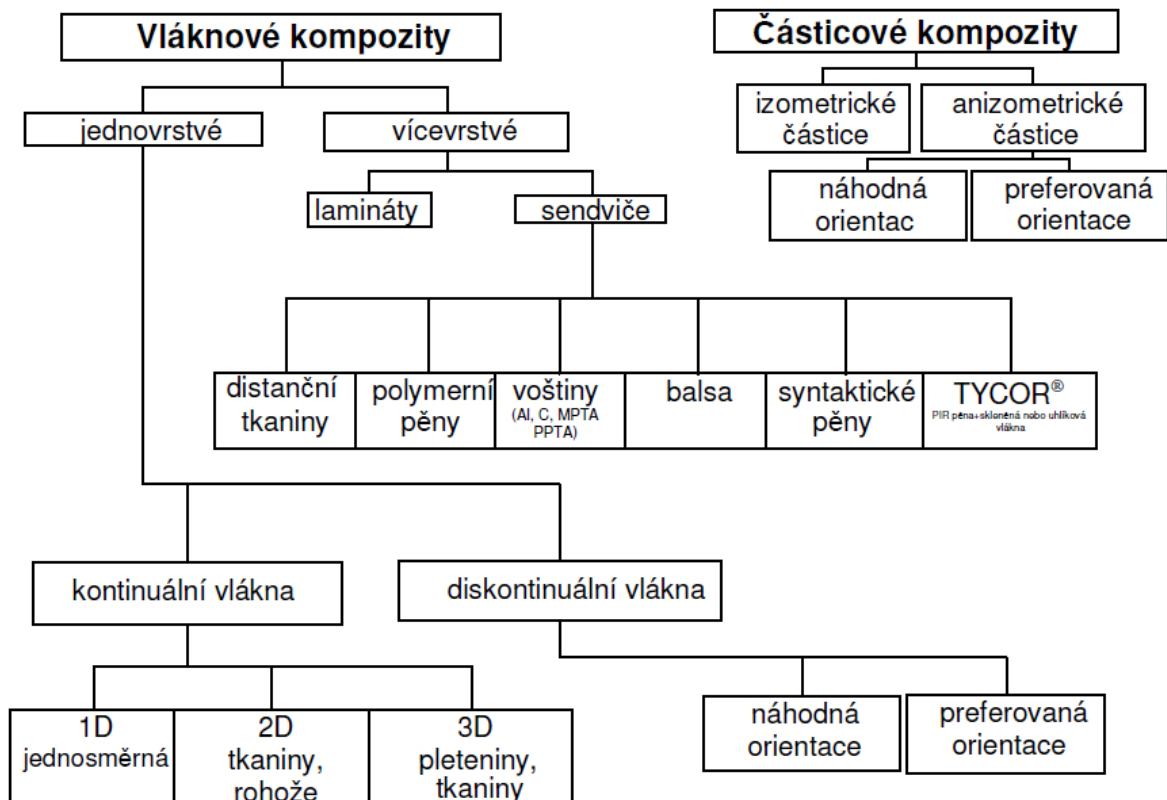


Obr. 3: Jevy na rozhraní matrice a výztuhy[5]

### 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit dle mnoha kritérií. V praxi jsou nejobvyklejší rozdělení dle geometrického charakteru výztuže a typu matrice.[6]

Rozdělení mikrokompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže je patrné z následujícího schématu.



Obr. 4: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže[6]

**Kompozity lze dále rozdělit podle:**

- **typu matrice**
  - s kovovou maticí (MMC – Metal Matrix Composites)
  - s keramickou maticí (CMC – Ceramic Matrix Composites)
  - s polymerní maticí (PMC – Polymer Matrix Composites)
- **druhu dispersní (zpevňující) fáze** (kovová, skleněná, keramická, polymerní, monokrystalická vlákna aj.)
- **tvaru dispersní fáze**
  - částicové (s částicemi malými, nebo velkými)
  - vláknové (s dlouhými (poměr délka/průměr je  $>100$ ) nebo krátkými (poměr délka/průměr je  $<100$ ) vlákny)
  - strukturní (vrstvené)
- **podle struktury matrice a dispersní fáze**
  - nanokompozity
  - mikrokompozity
  - makrokompozity
- **použití**
  - vysoké pevnosti (při běžných teplotách)
  - žárovevné materiály
- **speciální kompozitní materiály** (např. elektromagnetické, elektrody pro odporové svařování, vysoce zatěžované elektrické kontakty,

### 1.1.1 Úloha matrice

Úlohou matrice v kompozitním profilu, je spojovat výztuže dohromady, zajistit správné rozmístění výztuže v příčném řezu, aby byly zajištěny dobré mechanické vlastnosti.

Spojité složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna, se nazývá matrice. Polymerní matrice jsou výrazně poddajnější než vlákna. Pevnost v tahu je u všech matric menší, než pevnost v tahu vláken (u polymerních matric až o dva řády). Druh matrice určuje také další vlastnosti, jako je odolnost proti korozi, elektricko-izolační vlastnosti, odolnost proti teplotě a ohni.[5]

### 1.1.2 Úloha výztuže

Úkolem výztuže v kompozitním materiálu je především zajistit zvýšení mechanických vlastností, jako je pevnost a tuhost. Pro splnění těchto požadavků, musí být splněny určité podmínky. Typ a způsob uložení výztuže má klíčový vliv na vlastnosti kompozitního materiálu.

Musí být splněny tyto podmínky:

- Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice
- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice
- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno

### 1.1.3 Forma výztuže

Vyztužující materiály všeho druhu, od tkanin na bázi skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken nebo jejich kombinací o různé gramáži a stylu tkaní, s různou orientací až po speciální prošívání nebo složené rohože.

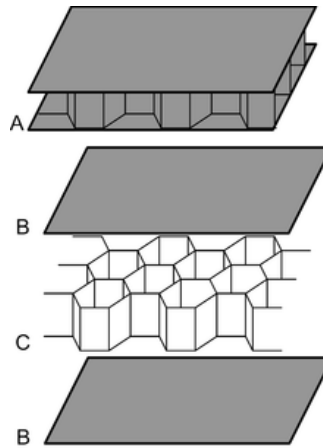
Forma výztuže může být např. ve formě:

- Vláken (krátká, dlouhá)
- Rohoží
- Rovingů
- Tkanin
- Úpletů
- Trojrozměrné tkaniny (3D Tkaniny)

## 1.2 Sendvičové kompozitní konstrukce

Sendvičové materiály tvoří speciální třídu kompozitních materiálu. Vznikají ze tří materiálových vrstev. Dvě z nich jsou tenké vnější vrstvy, které obklopují třetí vrstvu jádro

z obou stran. Jádro se vyznačuje nízkou hmotností, tato vlastnost představuje hlavní výhodu sendvičového materiálu. [7]



Obr. 5: A - Sendvičový panel, B - vnější vrstvy, C – jádro[7]

Historicky byl princip použití dvou vrstev materiálů, mezi kterými bylo jádro, představen v DELAU okolo roku 1820. První rozsáhlé použití sendvičových materiálů bylo během II. Světové války.[8]

V letadle „Mosquito“ byl použit sendvič a to hlavně z nedostatku jiných materiálů během války v Anglii. Povrchové vrstvy byly vyrobeny z dýhy a jádro z balzového dřeva.

První teoretické popisy sendvičových materiálů se objevily během II. světové války. Během 50. let se vývoj převážně soustředil na voštinové materiály. Voštinové materiály byly nejvíc používány v leteckém průmyslu. Byly s tím ovšem spjaty i problémy a to převážně s korozí. Na konci 50. a během 60. let se začaly vyrábět lehčené plasty, jako vhodný materiál pro jádro sendvičové struktury. Na začátku byly používány nejprve měkké materiály pro jejich izolační vlastnosti jako např. polystyren, polyuretan. Později bylo možné produkovat tvrdší lehčené plasty s vyšší hustotou. Dnes existuje velké množství druhů lehčených, sendvičových materiálů pro použití do kompozitních sendvičových struktur. [9]

### 1.2.1 Význam sendvičové struktury

Mnoho nových technologií, či konstrukcí žádá kombinaci vlastností, které nelze u konvenčních materiálů (kovů, keramik, polymerů) docílit.

Letečtí konstruktéři požadují konstrukční materiály s nízkou specifickou hmotností, které mají ale současně vysokou pevnost, tuhost, odolnost proti abrazi a korozi, lomovou houževnatost apod. Takové a obdobné požadavky lze splnit pouze synergickým účinkem dvou nebo více fází či materiálů s různými vlastnostmi [10]

### 1.2.2 Vlastnosti sendvičové konstrukce

Efektivní struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými potahy zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím smykové síly mezi potahy.

Sendvičové konstrukce se uplatňují převážně v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich hlavních předností, a to vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Sendviče však lze nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jedinými přínosy.[3]

Mezi další výhody patří:

- únavová odolnost
- odolnost proti šíření trhlin
- odolnost proti rázům
- tepelná odolnost a odolnost proti ohni
- tlumení a tepelná a akustická izolace

Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra.[11]

### 1.2.3 Pevnost a Tuhost v Ohybu

V následující tabulce můžeme vidět porovnání celistvého materiálu a struktury s jádrem. Lze vidět, že s použitím sendvičového materiálu a vhodnou volbou tloušťky můžeme docílit značného zvýšení tuhosti a pevnosti v ohybu. Sendvičové konstrukce vykazují vysokou tuhost a pevnost v ohybu při zachování nízké hmotnosti. Z tabulky vyplývá, že tuhost můžeme při zachování stejné hmotnosti zvýšit 37-krát, a pevnost v ohybu okolo 9-ti násobku.[16]

	Celistvý materiál	Síla jádra $t$	Síla jádra $3t$
tuhost	1.0	7.0	37.0
pevnost v ohybu	1.0	3.5	9.2
hmotnost	1.0	1.03	1.06

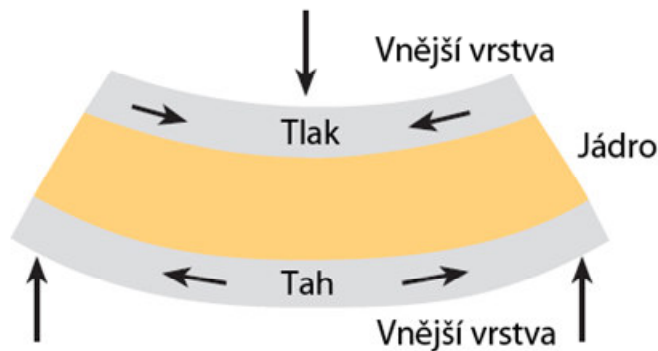
Obr. 6: Porovnání pevnosti v ohybu a tuhosti[8]

Na obr.7 vidíme sendvičovou kompozitní strukturu pod ohybovým zatížením. Vnější vrstvy jsou tuhé a vnitřní vrstva (tzv. distanční) je hrubší a zpravidla méně pevná. Na obrázku je zatížení, z kterého můžeme vidět, že horní vnější vrstva je zatížena na tlak, kdežto spodní vnější vrstva je zatížena na tah. Z toho vyplývá, že jedním z nejdůležitějších vlastností jádra je jeho pevnost ve smyku a tuhost. Kromě toho, zejména při použití lehké, tenké laminátové výztuže (vnější vrstvy sendvičového materiálu), musí být jádro schopné přenést zatížení tlakem, aniž by došlo ke zborcení.[26]

Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky. Výhodou je, že se zvětšováním tloušťky sendviče dochází k velmi malému nárůstu jeho hmotnosti - zvětšuje se pouze tloušťka lehkého jádra, které obvykle mívá hustotu okolo 80 kg.m<sup>-3</sup>. Pevnost v ohybu také roste se vzdáleností potahů, ale při dimenzování sendviče je nutné zároveň posuzovat smykovou pevnost jádra. Obecně lze říci, že pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou.[27]

O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka potahů. Pevnost v tlaku jádra roste s jeho hustotou.

Z porovnání pevností pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě. Ovšem při volbě vhodného jádra sendviče je nezbytné zohlednit všechny faktory.



Obr. 7: Zatížení sendvičové konstrukce na ohyb[12]

#### 1.2.4 Druhy sendvičových jader

Význam sendvičové struktury spočívá v tom, že mezi vnějšími vrstvami přenášejících zatížení na tah a tlak, je jádro které přenáší smykové zatížení. Sendvičová jádra jsou vyráběna z různých materiálů a různých typu konstrukcí. Vždy záleží na tom, jaké chceme výsledné vlastnosti sendvičové konstrukce a dle toho volíme materiál, typ konstrukce jádra, velikost (tloušťku).

##### 1.2.4.1 Balzové jádro

Balza je velký (až 30 m), rychle rostoucí strom. Plody jsou malvice. Roste v Jižní Americe, 95 % komerční produkce pochází z Ekvádoru. Struktura dřeva se vyznačuje velkými buňkami, které jsou vyplněny vodou. Po vysušení buňky obsahují vlákna celulózy. Tento přírodní kompozit má hustotu 40 až 340 kg/m<sup>3</sup> (obvykle 160 kg/m<sup>3</sup>). Balzové dřevo nehoří, spíše pomalu doutná. Oproti polymerním pěnám teplem neměkne a vyznačuje se i menší tepelnou vodivostí. Oproti voštinám (“honeycomb”) jsou buňky uzavřené, takže například sendvičové panely lze vyrábět technikou infuze pryskyřice. [15]





Obr. 8: Balsové jádro

#### 1.2.4.2 Voštiny

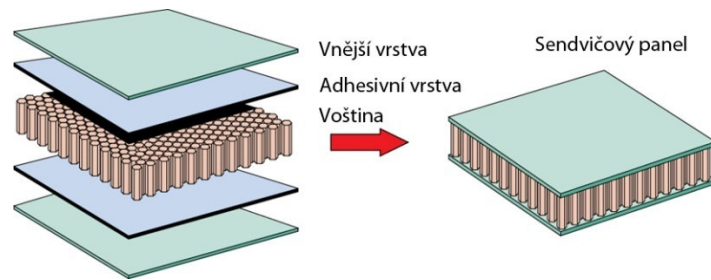
Voštinové materiály se používají jako jádro s různou výškou, velikostí a tvarem buněk v sendvičových kompozitech. Koncept vynalezl Norman de Buynes ve Velké Británii a nechal jej patentovat v roce 1938 jako hliníkovou voštinu pro sendvičové kompozity. Průmyslově se vyrábí od roku 1945. Označení voština je odvozeno z podobnosti se šestihrannou strukturou pláství včelího medu. [11]

##### Výroba voštin

Voštiny se formují z plošného materiálu několika různými technologiemi. Jako výchozí materiál se používají skleněná, aramidová, nebo uhlíková fólie, nebo textilie a hliníkový plech. [13,14]

Jeden z moderních výrobních postupů sestává z vřapování folie (příčné vlny) – stříhání folie – spojováním dvou listů vzniká panel s šestihrannými dutinami v příčném směru – nanášení pryskyřice a sušení – řezáním panelu v podélném směru se tvoří voštinové plásty s určitou tloušťkou. [16,25]

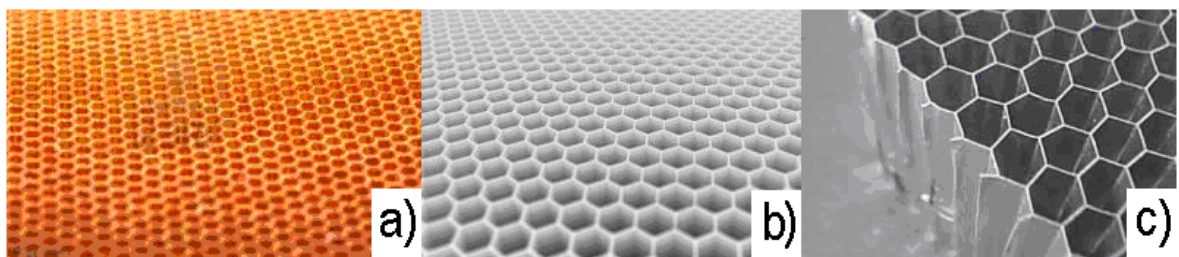
Velmi důležitá je vazba *Povrchová vrstva – jádro*. Voštiny jsou k potahu přilepeny. Při výrobě sendvičů se používá fólie lepidla, kterou se voštiny překryjí před přiložením potahů. Při zvýšené teplotě se fólie roztaví a spojí oba prvky. [15]



Obr. 9: Struktura kompozitní sendvičové konstrukce[16]

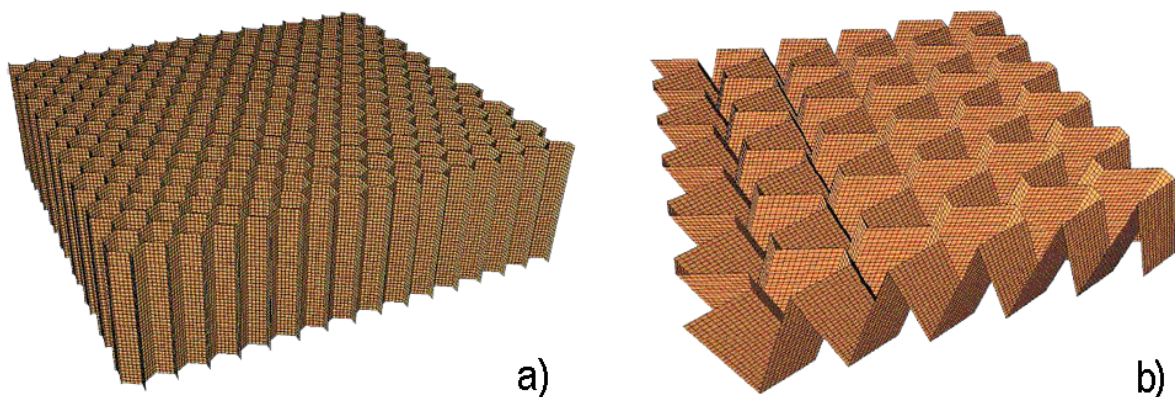
### Materiály voštin

Voštiny z aramidových vláken (Kevlar®) slepených fenolovou pryskyřicí. Stěny voštin mají vzhled papíru, buňky mají průměr od 3,2 do 5 mm, hustotu 32-96 kg/m<sup>3</sup> a tlakovou pevnost 1-7 MPa. [17]



Obr. 10: a) Voština z aramidu(Kevlar®), b) Voština z PP, c) Voština z Hliníku[16]

Z odborné literatury jsou známy také jiné než šestiúhelné tvary voštin, např. skládané, nebo pyramidové [6,17]



Obr. 11: Voština a) Honeycomb, b)Skládaná voština[16]

### Využití voštin

Využití voštin souvisí s využitím sendvičových kompozitních materiálů. Voštiny se uplatňují v leteckém, automobilovém, železničním a dnes i ve stále více expandujícím stavebním průmyslu.

#### **1.2.4.3 Pěny**

Polymerní pěny jsou dvoufázové systémy se spojitou termoplastovou, nebo reaktoplastovou maticí, v níž je ve značném objemovém podílu od 50 do více než 90% dispergovaná plynová fáze. Protože polymerní pěny jsou fázově heterogenní, lze je považovat za kompozitní systém. [16]



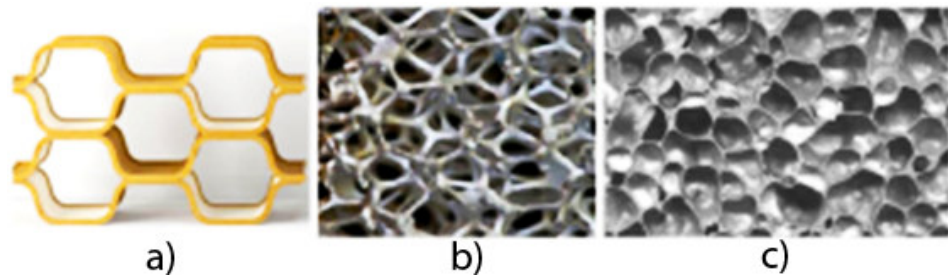
Obr. 12: Pěny[16]

Dnes můžeme zpracovávat téměř jakýkoli materiál do buňkové struktury, jako např. kovy, keramické materiály, sklo a většinu polymerů.[16]

### Výroba Pěn

Polymerní pěny se vytvářejí vakuovou expanzí, nebo vytlačováním taveniny polymeru do vakuové komory, ale také jednoduchým mícháním nebo tlakovým foukáním ply-

nu do taveniny polymeru. Struktura polymerních pěn je tvořena buď uzavřenými, nebo otevřenými buňkami. [55]



Obr. 13: a) Honeycomb, b) pěna s Otevřenými buňkami, c) pěna s Uzavřenými buňkami[9]

### Materiály Pěn

Pěny jsou jednou z nejčastějších forem nosného materiálu. Mohou být vyrobeny z různých syntetických polymerů, z polyvinylchloridu (PVC), polystyrenu (PS), polyuretanu (PU), polyetherimidu (PEI) a styreneacrylonitrilu(SAN).[22]

Mohou být dodány v rozmezí hustot z méně než 30kg/m<sup>3</sup> na více než 300kg/m<sup>3</sup>, ačkoli jsou v nejvíce používané hustoty pěny pro kompozitní struktury v rozmezí 40 - 200 kg/m<sup>3</sup>. Jsou také k dispozici v různých tloušťkách, obvykle od 5mm do 50mm. [16]

### PVC

Pěny z polyvinylchloridu jsou jedny z nejpoužívanějších pěn pro jádro. Jsou výhodné pro vyváženou kombinaci statických a dynamických vlastností a dobrou odolností proti absorpci vody.

Existují dva hlavní typy pěnového PVC:

- Síťované (*Příčně a Lineárně*)
- Nesíťované

## PUR

Je náhrada překližky, je málo dražší, ale o mnoho lehčí. Je však také velmi křehká. Pěna se dá velmi dobře opracovat na požadovaný tvar. V dnešní době jsou často využívány pro tepelnou izolaci, hlukovou izolaci.

## PET

Recyklovatelný termoplast, tvarovatelný za tepla. Výborné mechanické vlastnosti, odolnost vůči teplu, zpracovatelnost i s prepregami.

## PS

Přestože se polystyrénové pěny hojně využívají ve výrobě plachetnic, surfových prken, kde uplatňují svou výhodu nízké hmotnosti ( $40\text{kg/m}^3$ ), nízké ceny, nejsou používány ve vysoce pevnostních konstrukčních aplikacích. Nemohou být použity v systému, kde použijeme jako matici Polyesterovou pryskyřici.

## SAN

Pěny kopolymeru SAN se chovají podobným způsobem jako pěny PVC – příčně síťované, ale mají mnohem větší protažení a houževnatost. PVC používají změkčovadla při výrobě, kdežto kopolymer SAN má vlastnosti, které vycházejí z polymeru samotného, proto se vlastnosti z věkem tak výrazně nemění.

## PEI

Polyetherimidová pěna (PEI) je zástupce dalšího materiálu pěny s typickými vlastnostmi. Vlastnosti tohoto materiálu vynikají především odolností proti požáru a odolností proti provozní teplotě. Použití na tepelné a protipožární konstrukční aplikace v rozmezí teplot ( $-194^\circ\text{C}$  do  $+180^\circ\text{C}$ ) [16]

### Vlastnosti Pěn

Poměr tlakové pevnosti k hmotnosti je nejvýznamnější vlastnost, její výborný poměr tlakové pevnosti k hmotnosti, který je kombinací buněčné struktury s převážně plynovými dutinami a mechanických vlastností materiálu, ze kterého je buněčné těleso vyrobené. [16]

Schopnost absorbovat rázovou energii a tlumení kmitů. Tato vlastnost vyplývá z testů osového tlakového zatížení. Tlaková křivka má nelineární tvar. Stlačení při relativně konstantním zatížení je závislé na materiálu a hustotě buněk. Dosahuje poměrně vysokých hodnot 60-80%.

Hodnoty Modulu pružnosti se pohybují v rozmezí 0,5 až 500 MPa.

Vlastnosti polymerních pěn jsou kromě vlastností základní strukturní fáze polymeru ovlivněny objemovým podílem plynu a základní strukturní charakteristikou, podílem tloušťky stěny „t“ a velikosti buňky „l“, tj. podíl t/l. Pěnovky jednoho a téhož polymeru se mohou vyrábět v několika strukturních modifikacích.[28]

- U polymerních pěn s otevřenými buňkami platí:

$$\frac{\rho}{\rho_S} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad [18] \quad (1)$$

t ... tloušťka stěny

l ... velikosti buňky

$\rho$  ... hustota pěny

$\rho_s$  ... hustota polymeru v pevné fázi

- Poměr hustot se pohybuje v rozmezí od 0,005 u pěn velmi lehčených až po 0,5 u hustých tuhých pěn.
- Lze stanovit vztah mezi modulem pružnosti kompaktního polymeru  $E_s$  a modulem pružnosti polymerní pěny  $E$  ve tvaru:

$$E = E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \quad [18] \quad (2)$$

#### 1.2.4.4 3D Tkaniny

Tyto tkaniny se vyrábějí pouze se skleněnými vlákny pro pryskyřice (UP nebo VE). Dodávají se ve stlačeném stavu, s vlákny fixovanými pojivem rozpustným v pryskyřici. Po styku s rozpouštědlem pryskyřice (obvykle monomerní styren) dojde k expanzi tkaniny ve směru kolmém k jejímu povrchu. Distanční tkaniny jsou výrazně levnější než voštiny, umožňují snadnou výrobu tenkých profilů s proměnnou tloušťkou na rozdíl od voštiny z hliníkové fólie nebo z aromatických polyamidů (Kevlar) ve fenolformaldehydové matici,

které se do potřebného tvaru obrábějí na frézce s vysokými otáčkami speciálním jednobřítým nástrojem. Pásky distanční tkaniny se uplatňují např. při výrobě navíjených nádrží pro ekologicky nebezpečné látky. Uvnitř distanční tkaniny mohou být instalována čidla, která při úniku obsahu do meziprostoru varují obsluhu.[19]

### 1.2.5 Využití sendvičových jader

Velký rozsah vlastností Voštin, Polymerních pěn, 3D Tkanin jim uděluje širokou škálu požití, kde by se klasické materiály uplatnily s obtížemi.

Velké využití je v průmyslu:

- Kosmickém
- Leteckém
- Vojenském
- Automobilovém
- Stavebním
- Lodním
- Sportovním

Lepší využití hybné síly, vyšší efektivita dopravy díky redukcí hmotnosti dopravních prostředků:

- v autě 75% spotřebovaného paliva je v přímé úměře k jeho hmotnosti
- na každých 10 % uspořené hmotnosti se ekonomické využití paliva zvýší o 6-8%
- to představuje snížení produkce oxidu uhličitého o 20 kg na kilogram uspořené hmotnosti v průběhu celé životnosti auta. [16]





Obr. 14: Sendvičová struktura střechy autobusu[16]

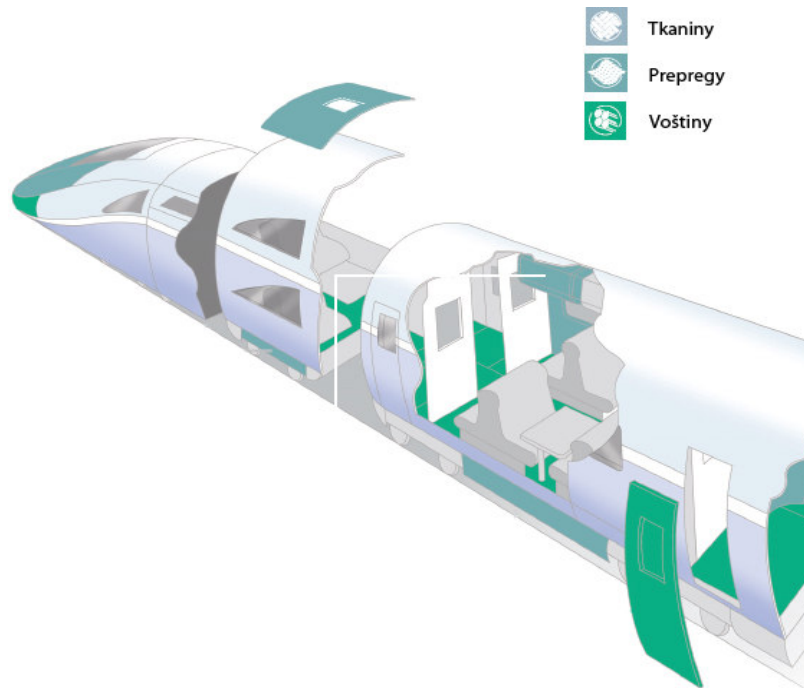


Obr. 15: Pagani Zonda – Velké využití sendvičových pevnostních struktur. a laminátových krycích panelů



Obr. 16: North American XB-70 in Flight EC68-2131[16]





Obr. 17: Využití Sendvičových a laminátových struktur ve vlaku od firmy HEXEL. [20]

Velké využití je v průmyslu:

- Kosmickém
- Leteckém
- Vojenském
- Automobilovém
- Stavebním
- Lodním
- Sportovním

### 1.2.6 Tkaniny

Rovingové tkaniny mají různou textilní vazbu. Vedle požadavku na tuhost a pevnost kompozitu o vhodné vazbě rozhoduje i tvarová členitost forem.[41]

Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří tři základní typy vazeb:

- Plátnová (angl. Plain)
- Keprová (angl. Twil)

- Atlasová (angl. Satin)

### Plátnová vazba

Plátnová vazba je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování, když prameny (nebo rovingy) v osnově i útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramenec útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy (tzv. vyvážená plátnová vazba). Volnější a tím i poddajnější plátnovou vazbu vytvářejí dva a více pramenů útku procházejícího pod dvěma nebo více nitěmi osnovy (košíková vazba, angl. „basket“). [12]

### Košíková vazba

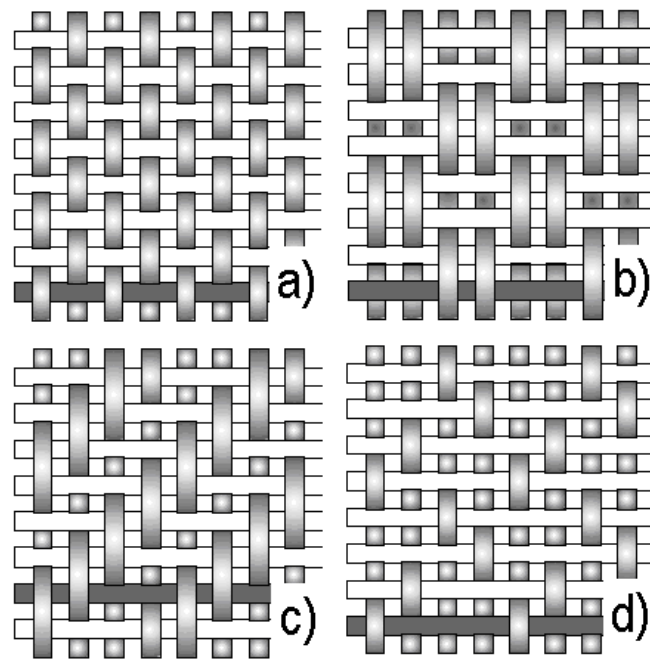
V zásadě je stejná jako plátnová vazba, s výjimkou zdvojených vláken které jsou střídavě prokládány. Košíková vazba je ploší, silnější, ale méně stabilní než plátnová vazba. [12]

### Keprová vazba

Keprová vazba je vytvořena, když útek překříží minimálně 2 prameny osnovy než opět projde pod jedním nebo více prameny osnovy. V další řadě se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Na tkanině je tak vytvářen diagonální vzor. Pokud je použita vazba např. 3/1, znamená to, že jeden pramen osnovy je překryt třemi prameny útku a jedním pramenem na spodní straně (vzniká lomený vzor). Tkanina s keprovou vazbou je ohebnější, ovšem pouze při měkké povrchové úpravě vláken. [12,19]

### Atlasová vazba

atlasová vazba je nejméně pevnou textilní vazbou. Jeden pramen osnovy je překryt čtyřmi a více prameny útku svrchu a jedním pramenem ze spodní strany. Počet pramenů osnovy překrytých útkem udává tzv. vaznost atlasu (5 až 12). Povrch tkaniny je hladký a lesklý, s dlouhými ploškami, v nichž vlákna leží rovnoběžně s povrchem. Vazba umožňuje dosáhnout vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje minimální zvlnění vláken. S atlasovou tkaninou je tedy možno získat kompozit s větší pevností a tuhostí než při použití běžných tkanin. [12,19]



Obr. 18: a) Plátnová vazba, b) Košíková vazba, c) Keprová vazba, d) Atlasová vazba[12]

## 2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

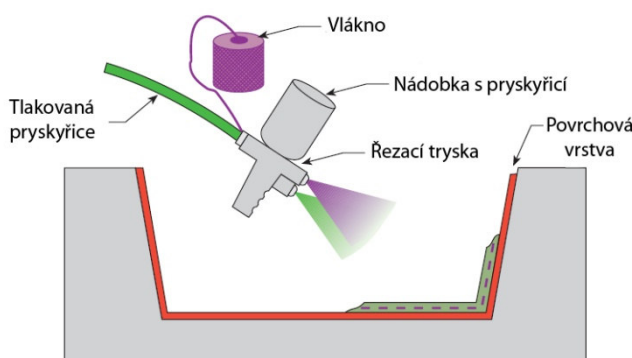
Pro laminátové a kompozitní sendvičové struktury jako celku existuje mnoho možností, jak ovlivnit výsledné vlastnosti výrobku, jako například tuhost, pevnost, houževnatost, tepelnou odolnost, ale také náklady na výrobu a cenu. Můžeme využít jak specifických vlastností různých materiálů, tak způsob výroby k dosažení požadovaných vlastností. Vzhledem k tomu je třeba posuzovat technologický postup při výrobě vyztužených plastů za velmi podstatný faktor, který v zásadě určuje jak jeho konečné vlastnosti, tak i ekonomiku výroby. V této kapitole bude popsáno několik používaných výrobních technologií pro výrobu laminátových a kompozitních sendvičových struktur.

Proto je třeba věnovat volbě technologie značnou pozornost. Určující faktory pro volbu technologie. Výrobní technologie je dána především charakterem výrobku a její volba se řídí několika zásadními faktory:

- sériovost dílce, velikost a členitost výrobku, kvalita povrchu, požadované vlastnosti, zejména pevnost a hmotnost, limit nákladů[12]

### 2.1 Stříkání (Spray Lay-Up)

Vlákna se rozsekají ve stříkací pistoli, kde se smíchají s pryskyřicí. Primárně se používá Polyesterová pryskyřice a jako vlákna se používají výhradně skleněná.



Obr. 19: Technologie Stříkáním[12]

Výhody

- Nízká cena nástroje
- Rychlý způsob nanášení vláken s pryskyřicí
- Dlouho používaná metoda

### Nevýhody

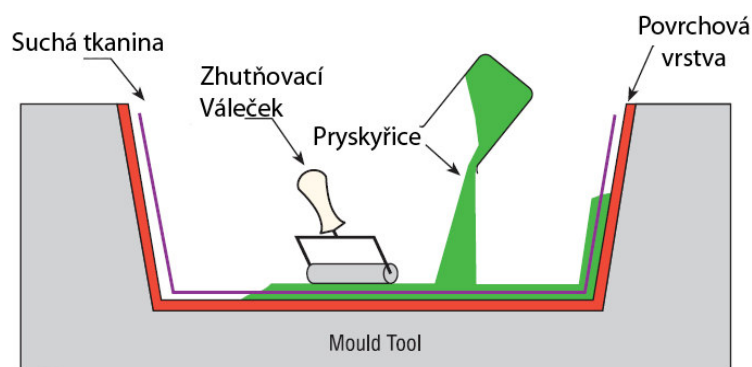
- Laminát obsahuje velké množství pryskyřice – velká hmotnost
- Pouze krátká vlákna – omezené vlastnosti
- Pryskyřice musí mít nízkou viskozitu – kompromis mezi mechanickými a tepelnými vlastnostmi
- Pryskyřice má vyšší obsah styrenu – je škodlivější

### Použití

- Lehce zatěžované panely – např. u karavanů
- Aerodynamické kryty u nákladních automobilů
- Vany , sprchové vany

## 2.2 Ruční kladení (Hand Lay-up)

Pryskyřice je do kompozitních materiálů vpravována ručně. Děje se tak za pomoci ručních otočných válečků, štětců. Pryskyřici můžeme použít např. epoxidovou, polyesterovou, vinylesterovou, fenolickou. Vyztužující vrstvy z vláken jsou ve formě tkanin, pletenin, rohoží. Jádra můžeme použít jakékoli, např. pěnové, voštinové, 3D tkaniny.[12]



Obr. 20: Technologie ručního laminování[12]

### Výhody

- Široce používané po mnoho let
- Velký výběr dodavatelů materiálů
- Mnoho druhů materiálů
- Nízká cena nástroje
- Nižší obsah pryskyřice oproti metodě Stříkáním

### Nevýhody

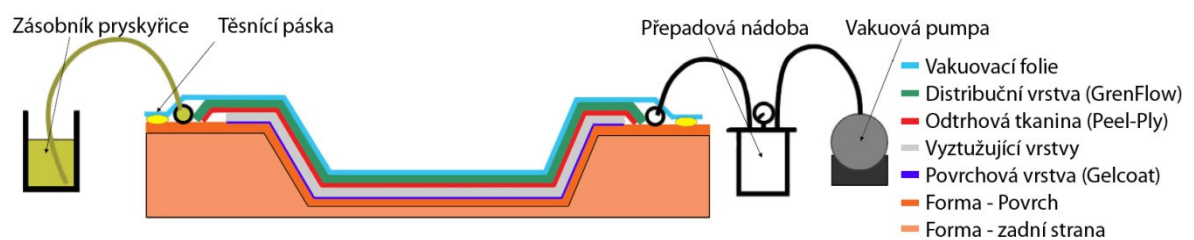
- Namíchání pryskyřice a kvalita laminátové struktury je velmi závislá na zkušenostech
- Nelze dosáhnout nízkého podílu pryskyřice a výztuže
- Ochrana zdraví a bezpečnost
- Výrobu je těžké provozovat dle zákonů bez drahých odsávacích systémů
- Pryskyřice má nízkou viskozitu – pronikání do oblečení.

### Použití

- Krycí panely např. autobusů, vlaků a jiných výrobků
- Výroba lodí
- Architektonické lišty

## 2.3 VFI (Vacuum Foil Infusion)

Vakuová infúze pod pružnou fólií je technologie, která využívá podtlaku k prosycení suchých vrstev kompozitní (sendvičové) struktury. Jde v podstatě o vylepšení výše zmíněné technologie ručního laminování. Materiály kompozitní struktury jsou do formy vkládány suché. Následně jsou vloženy pomocné materiály pro tok matrice (pryskyřice) a vytvoření vakua.[22]



Obr. 21: Schéma Vakuové infuze pod pružnou fólií[22]

### Výhody

- Vyšší obsah výztuže oproti standardnímu ručnímu laminování
- Nižší hmotnost
- Vyšší pevnost, tuhost výsledného výrobku
- Lepší ochrana zdraví a bezpečnost (během vytvrzování pryskyřice brání folie unikání těkavých látek)

#### Nevýhody

- Podpůrné materiály pro technologii jako odpad
- Náročné z hlediska zkušeností obsluhy

#### Použití

- Lodě
- Letadla
- Komponenty zatížené pevnostně
- Sendvičové struktury

## 2.4 Navíjení vláken

Stroje pro šroubovicové navíjení je možno přirovnat k soustruhům. Navíjení rovinných smočených v pryskyřici (obvykle se v pryskyřici brodí pouze kotouč a přes jeho horní povrch se vedou vlákna) je používáno při výrobě rotačních i nerotačních nádob s konvexními povrchy. Tato technologie je primárně používaná pro duté komponenty obvykle kruhového, nebo oválného průřezu [12.,22]

#### Výhody

- Reprodukovatelné mechanické vlastnosti výrobků
- Možnost počítačem řízené navíjení
- Lze orientovat vlákna ve směru zatížení
- Není sekundární proces převodu vlákna na tkaninu

#### Nevýhody

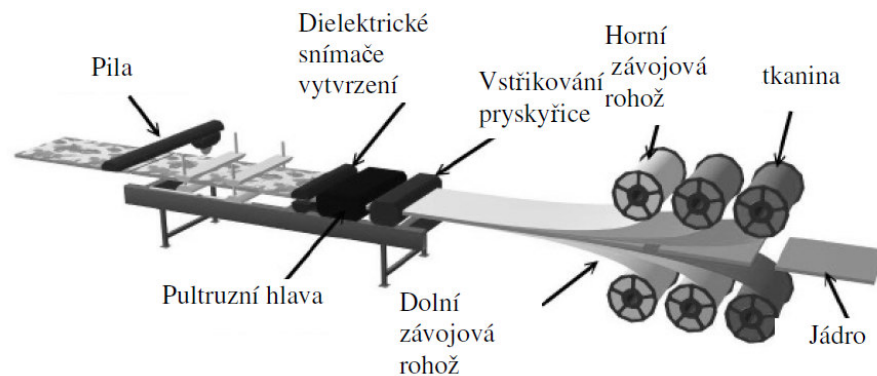
- Pouze konvexně tvarované komponenty
- Velké komponenty – velké náklady na nástroj (trn)
- Musí být použita nízkoviskózní pryskyřice

#### Použití

- Trubky kruhových a konvexních tvarů
- Plynové láhve, protipožární nádoby

## 2.5 Pultruze

Při klasické pultruzi je výztuž kontinuálně impregnována tekutou UP nebo VE pryskyřicí a vtahována do tvarovací a vytvrzovací hlavy. V ohřívané části vytvrzovací hlavy (mikrovlnný ohřev pryskyřice (pro skleněná vlákna) nebo indukční ohřev (pro uhlíková vlákna) je pryskyřice vytvrzena a hotový profil je odtahován housenkovými pásy nebo dvojicí střídavě popojíždějících vozíků a řezán na potřebnou délku. Stroje obvykle mívají horizontální uspořádání. [11,10]



Obr. 22: Technologie Pultruze[21]

### Výhody

- Rychlý způsob výroba proto ekonomický
- Kontrolovaný obsah pryskyřice
- Velmi dobré konstrukční vlastnosti
- Velký obsah výztuže

### Nevýhody

- Omezení na konstantní, nebo téměř konstantní průřez součásti
- Může být drahé vyhřívání matrice

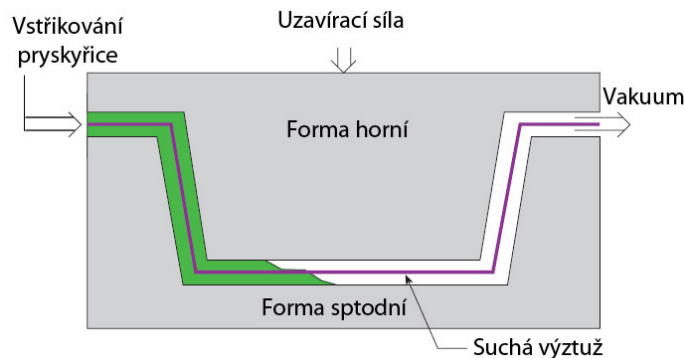
### Použití

- Profily
- Lze vyrábět i sendvičové panely
- Křídla bezpilotních letadel
- Nosné prvky letadel, střešní konstrukce
- Žebříky, rámy



## 2.6 Vysokotlaké vstřikování - RTM (Resin Transfer Moulding)

Jde o technologii s uzavřenou formou, při které se při použití UP a VE pryskyřic do okolního prostoru neuvolňuje reaktivní rozpouštědlo. Ohřátá pryskyřice a ohřáté tvrdidlo se pomocí nízkotlakých čerpadel dopravují do mísící hlavy bezprostředně před injektáží směsi do ocelové nebo hliníkové formy. Někdy je vstřikování pryskyřice podporováno vakuem. Tato technologie je známá jako VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion). [10,22]



Obr. 23: Technologie RTM – Vstřikování podporované vakuem do uzavřené formy[12]

### Výhody

- Oba povrchy výrobku jsou hladké (vzhledové)
- Rozměry jsou přesné
- Možnost využít programy konečných prvků pro simulaci toku pryskyřice

### Nevýhody

- Formy mohou být drahé a těžké – musí odolávat tlakům uvnitř formy
- Obecně spíše pro menší komponenty
- Nedostřiknuté oblasti zvyšují náklady na šrotaci

### Použití

- Komponenty v Letecké, Automobilové, Železniční dopravě[12]

## 2.7 Vysokotlaké vstříkávání za pomoci vakua - VARTM (Vacuum Assisted RTM)

Pryskyřice s malou viskozitou (většinou s reaktivním ředidlem) teče do dvoudílné formy, ve které je před-tvarovaná výztuž ("preform"). Tok pryskyřice je vyvolán jak vstříknutím, tak podtlakem. Běžnější je použití jednodílné formy. Druhá strana formy je tvořena fólií, filmem, nebo vakem[10]

### Výhody

- Nižší náklady na formu (druhá strana je fólie, vak)
- Možnost výroby velkých komponentů
- Formy pro standardní nástroje mohou být modifikovány pro tuto technologii
- Možnost výroby sendvičové struktury v jedné operaci

### Nevýhody

- Pryskyřice musí být nízké viskozity – snižují se mechanické vlastnosti
- Nedostříknuté oblasti zvyšují náklady na šrotaci
- 

### Použití

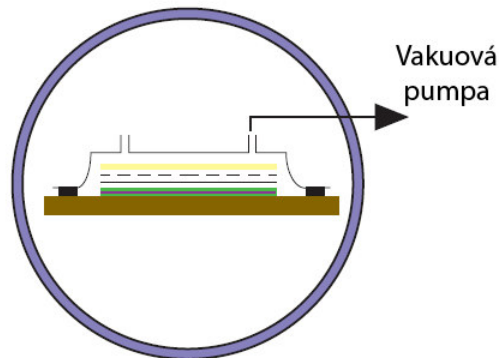
- Jachty
- Panely vlaků, kamionů, Autobusů, atd.

## 2.8 Speciální zařízení

### Autokláv

Jedná se o nejnákladnější a nejsložitější technologii pro sériovou výrobu velkorozměrných konstrukcí. Výchozím materiálem jsou vždy prepregy, vyžadující vytvrzování za zvýšených teplot. Skladba vrstev je prakticky stejná, jako při lisování vakuem, forma pokrytá pružnou fólií nebo plachetkou se umístí do vyhřívaného autoklávu, provede se nejprve evakuace podtlakem cca 0.8 bar a pak se autokláv natlakuje na cca 6 bar. Obsah výztuže se pak pohybuje přes 60%. [21,22]

Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice (120° až 200°C). Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregů k sobě a je tak zaručen minimální obsah pryskyřice (přetlak je v desetinách MPa)



Obr. 24: Autokláv[12]

#### Výhody

- Lze dosáhnout vysokého obsahu výztuže
- Obsah pryskyřice lze přesně stanovit – jsou stanoveny výrobcem materiálu
- Náklady na tkaniny minimalizovány použitím jednosměrných tkanin
- Technologie je šetrná ke zdraví
- Chemickým složením pryskyřice lze ovlivnit mechanické a tepelné vlastnosti
- Potenciál pro automatizaci

#### Nevýhody

- Vyšší náklady na materiály
- Drahá údržba a opravu autoklávu
- Pomalý provoz
- Omezená velikost výrobku
- Sendvičové materiály musí být schopny odolávat teplotám a tlakům v procesu

#### Použití

- Konstrukční prvky Letadel
- Závodní a sportovní komponenty u automobilů (F1)
- Sportovní potřeby: Lyže, Tenisové rakety, atd. [12]

### 3 SIMULACE VFI POMOCÍ MKP

Nejdůležitější otázkou při použití simulačního software je správné rozhodnutí, kdy simulaci použít a jaké jsou kritéria. Využití simulačních softwarů je do značné míry omezeno také tím, že tyto programy jsou drahé a vyžadují nemalé finanční investice, jak na nákup simulačního softwaru, tak na zajištění kvalifikovaného personálu pro obsluhu tohoto programu. Každý simulační projekt je obecně jinak časově náročný, co se týče přípravy i samotného výpočtu.

Je velice důležité pochopit filozofii simulačního programu tak, abychom byli schopni využít na plno jeho potenciál.[18]

#### 3.1 Výhody použití MKP softwaru

Vakuová infuze je výhodná technologie zejména pro výrobu velkých, vysoce kvalitních kompozitních dílů. Vakuová infuze je také jedna ze specifických technologií, která přináší lepší podmínky při výrobě, zejména čistějšího prostředí a snížení emisí např. oproti standardnímu ručnímu laminování. I přes tyto výhody, bylo přijetí této technologie pomalé. A to zejména díky velkým rizikům spojených s metodou *pokus a omyl*, které sebou na začátku výroby přinášejí značné náklady.

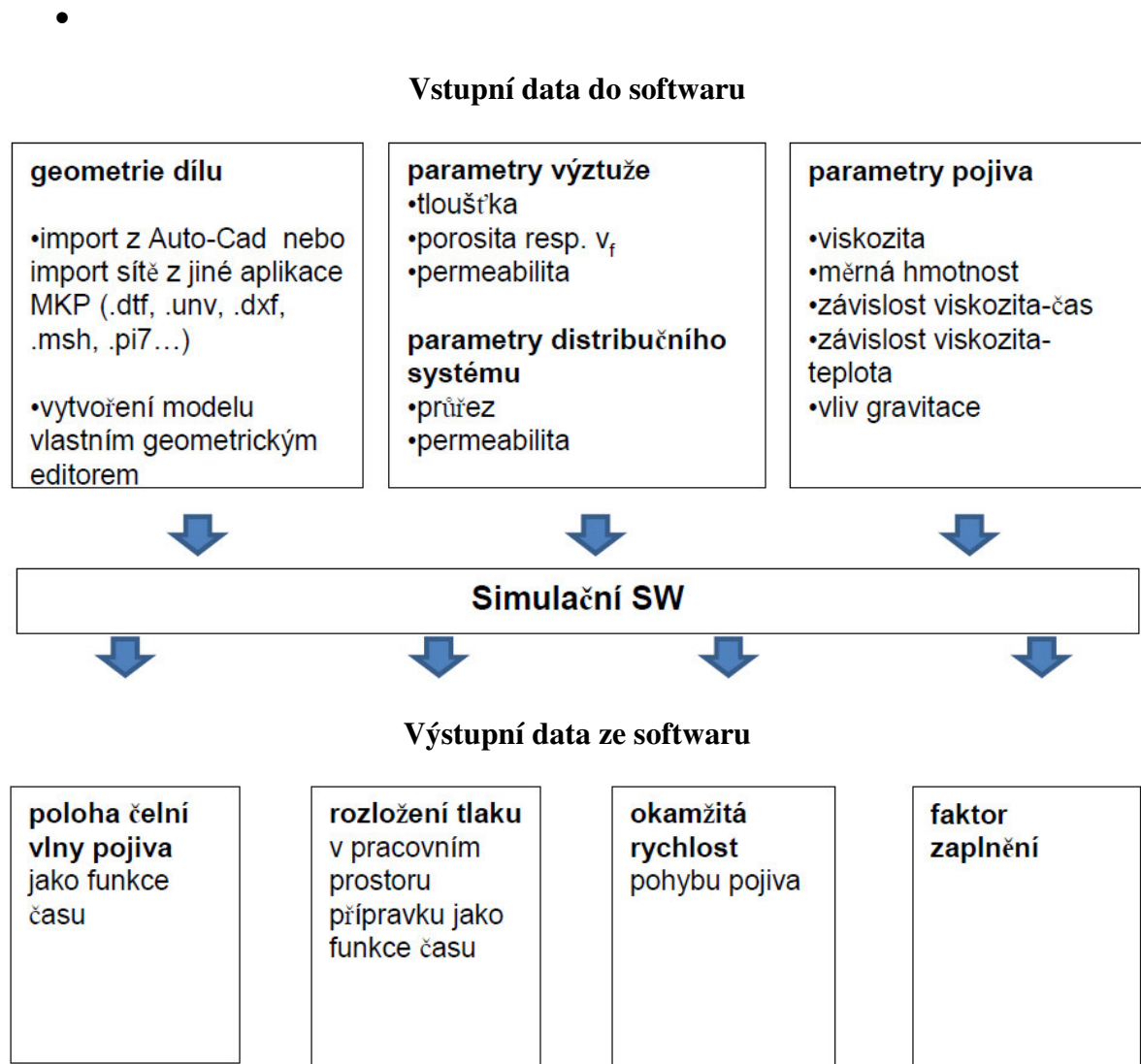
Softwary MKP se snaží nahradit metodu *pokus a omyl* a to proto, aby se snížily náklady při zavádění do výroby a pro celkovou optimalizaci procesu, efektivního využití materiálů a času.[18]

#### 3.2 Komerčně dostupné simulační programy

- RTM – Worx ( firma Polyworx, Nizozemsko)
- PAM – RTM (firma ESI Group, Francie)
- LIMS – UI ( University of Delaware, USA)

### 3.3 RTM- Worx Obecně postup simulace

Každý MKP program má své jedinečné prostředí ve kterém můžeme pracovat. Obecně lze postupy v MKP programech popsat v několika bodech.



Obr. 25: Schéma simulace v simulačním softwaru MKP[6]

#### 3.3.1 Darcyho zákon

Je nejčastěji požívaný teoretický podklad pro simulaci infuzních procesů.

$$\frac{Q}{A} = -\frac{K \cdot \Delta p}{\eta \cdot L} \quad [18]$$

(3)

Q	objemový průtok	[m <sup>3</sup> /s]
A	plocha	[m <sup>2</sup> ]
η	viskozita	[Pa.s]
L	délka	[m]
Δp	tlakový spád	[Pa]
K	Permeabilita výztuže	[m/s]

### 3.3.2 Stanovení Permeability výztuže

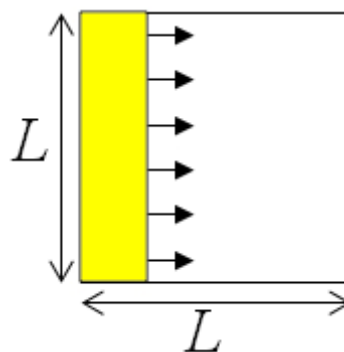
Permeabilitu výztuže „K“ je nutné experimentálně stanovit pro přesnější výpočet v simulačním MKP softwaru.

$$t_{fill} = C \cdot \frac{\phi \eta L^2}{2 K \Delta p} \quad [18] \quad (4)$$

t <sub>fill</sub>	čas plnění	[s]
C	konstanta umístění vtoku	

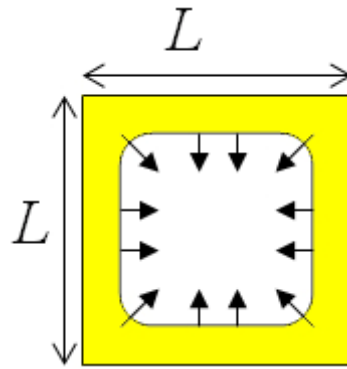
### 3.3.3 Strategie umístění vtoku 1

Podél hrany  $C = \frac{1}{2}$  [18] (5)



Obr. 26: Umístění vtoku podél hrany[18]

Okolo celého obvodu  $C = \frac{1}{16}$  [18] (6)



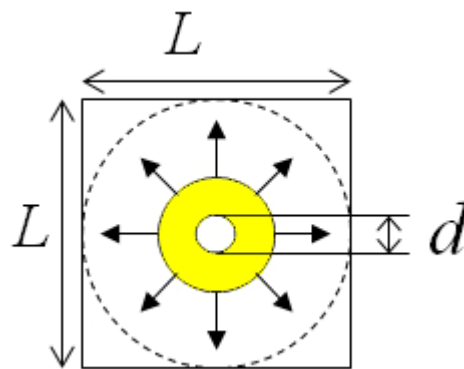
Obr. 27: Umístění vtoku po obvodu[18]

Jednobodové

$$C = \frac{1}{16} \left[ \varepsilon^2 + 2 \ln \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) - 1 \right], \quad [18]$$

(7)

$$\varepsilon = d/L$$



Obr. 28: Umístění vtoku ve středu[18]

### 3.3.4 Strategie umístění vtoku 2

Vstupy:

- Geometrické: rozměry, velikost otvoru
- Výztuž: pórovitost, permeabilita (propustnost)
- Pryskyřice: viskozita

Výstupy:

- Průběh plnění v čase  $x(t)$
- Čas plnění

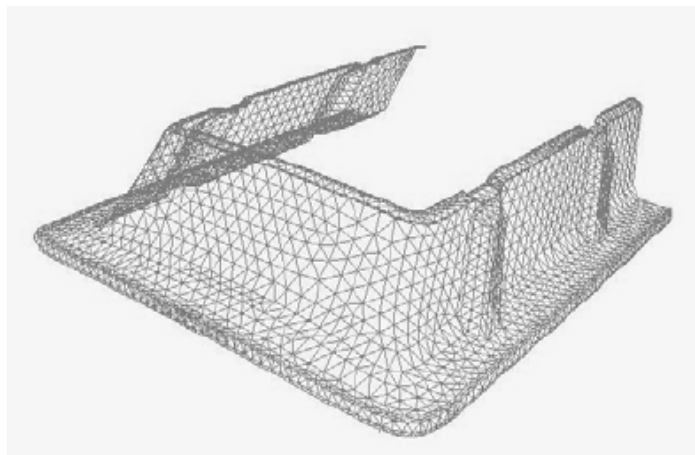
- Plnění podél hran, nebo horní a dolní vrstvy
- Čas gelování pryskyřice

### 3.3.5 Pravidla pro simulaci

- Zjednodušit geometrii výrobku (odstranit nejmenší detaily)
- Počet elementů je doporučeno držet v rozmezí 1000 až 5000
- Definovat místa vtoku pryskyřice
- Definovat místa vakuového napojení
- Editace hadic a spojovacích elementů
- Místo vstupu pryskyřice do formy může být nepřesné, je citlivé na velikost jednotlivých elementů. Použít malé kruhové elementy.
- Pokud je to nutné, použít další body a křivky pro vytvoření požadované hustoty sítě
- Použít kontrolu kvality sítě
- Použít optimalizaci sítě je-li to nutné
- Vždy přepočítat, pokud změníme síť, vlastnosti tkaniny, nebo pryskyřice[6.18]

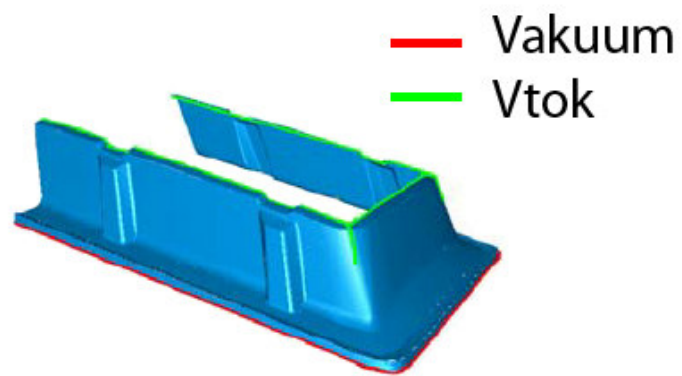
### 3.3.6 Příklad použití simulace v praxi

#### Příklad 1



Obr. 29: Vytvořená síť na daném výrobku





Obr. 30: Základní vstupní data

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

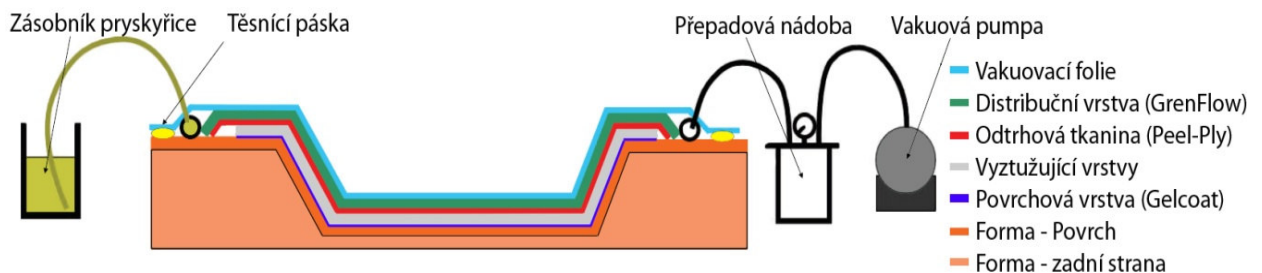
## 4 VAKUOVÁ INFUZE KOMPOZITNÍCH SENDVIČOVÝCH STRUKTUR POMOCÍ PRUŽNÉ FOLIE

### 4.1 Vakuová infuze

Cílem této diplomové práce je návrh technologického postupu, při výrobě konkrétního výrobku pomocí Vakuové infuze pod pružnou fólií známé pod anglickým názvem Vacuum foil infusion (VFI).

V této kapitole bude samostatně popsána technologie Vakuové infuze pod pružnou fólií, princip této technologie spolu se speciálními materiály používaných při této technologii. Také zde budou popsány výhody a nevýhody technologie VFI, a použití pro konkrétní výrobky a konstrukce.

Vakuové infuze pod pružnou fólií (VFI) je metoda, pro výrobu kompozitních (sendvičových) struktur v uzavřené formě pomocí vakua pod pružnou fólií.



Obr. 31: Schéma Vakuové infuze pod pružnou fólií[22]

#### Princip metody

Vakuová infuze pod pružnou fólií je technologie, která využívá podtlaku k prosycení suchých vrstev kompozitní (sendvičové) struktury. Materiály kompozitní struktury jsou do formy vkládány suché. Následně jsou vloženy pomocné materiály pro tok matrice (pryskyřice) a vytvoření vakua. Vakuum je aplikováno před použitím pryskyřice.

#### Výhody

- Vyšší obsah výztuže oproti standardnímu ručnímu laminování
- Nižší hmotnost
- Vyšší pevnost, tuhost výsledného výrobku

- Lepší ochrana zdraví a bezpečnost (během vytvrzování pryskyřice brání folie unikání těkavých látek)

#### Nevýhody

- Podpůrné materiály pro technologii jako odpad
- Náročné z hlediska zkušeností obsluhy

#### Použití

- Lodě
- Letadla
- Komponenty zatížené pevnostně
- Sendvičové struktury

Vakuová infúze pod pružnou fólií je technologie, která využívá podtlaku k prosycení suchých vrstev kompozitní (sendvičové) struktury. Jde v podstatě o vylepšení výše zmíněné technologie ručního laminování. Materiály kompozitní struktury jsou do formy vkládány suché. Následně jsou vloženy pomocné materiály pro tok matrice (pryskyřice) a vytvoření vakua.[29]

#### **4.1.1 Bod gelace, doba gelace (želatinace) a doba zpracovatelnosti**

Vytvrzením se mění kapalná pryskyřice na pevnou hmotu. Jedním ze základních znaků tohoto procesu je želatinace. Stav vytvrzování, při kterém vzniká první molekula, je bod gelace.

V praxi to znamená, že pryskyřice již není rozpustná v rozpouštědlech, tj. že již není vzhledem ke své konzistenci dále zpracovatelná jako tekutá hmota.

Doba gelace (želatinace) se určuje technologicky přímo jako čas, ve kterém již nelze vytáhnout tyčinku z reagující pryskyřice. Tento časový údaj, je typickým údajem používaným v praxi pro určení gelace.

Pojmy doba zpracovatelnosti a doba želatinace popisují prakticky stejný jev, tj. dobu, ve které by měla být zpracována směs jednotlivých složek po jejich smísení. To platí pro reaktivní pryskyřice, které jsou používány jako matrice pro kompozity, vícesložková lepidla a povlaky.[19]

#### 4.1.2 Pomocné materiály a komponenty použité při technologii VFI

Úspěšnost vakuové infuze se opírá o několik pomocných materiálů, které jsou po infuzi odděleny od výrobku. Stává se z nich odpad. Pomocné materiály díky svým vlastnostem, jsou nezbytné pro Vakuovou Infuzi. Vlastnosti a popis materiálů je specifikován níže u každého zvlášť.

##### **Odtahová tkanina (Peel-Ply)**

Obvykle Nylonová tkanina, která je umístěna na suchých výztužích sendvičové konstrukce (laminátu) jako první vrstva. Po infuzi slouží k oddělení všech pomocných materiálů, které jsou položeny na ní, např. distribuční síť *GreenFlow*, rozvod pryskyřice *Resin Track*.

Některé vlastnosti popisují níže.

<u>Materiál:</u>	PA66/PE
<u>Max. Teplota použití:</u>	160 - 210°C
<u>Hmotnost:</u>	50 - 125 g/m <sup>2</sup>
<u>Šířka role:</u>	1,47m / 1,50m / 1,56m / 1,64m / 1,74m



Obr. 32: Pohled na odtahovou tkaninu - Peel-Ply[23]

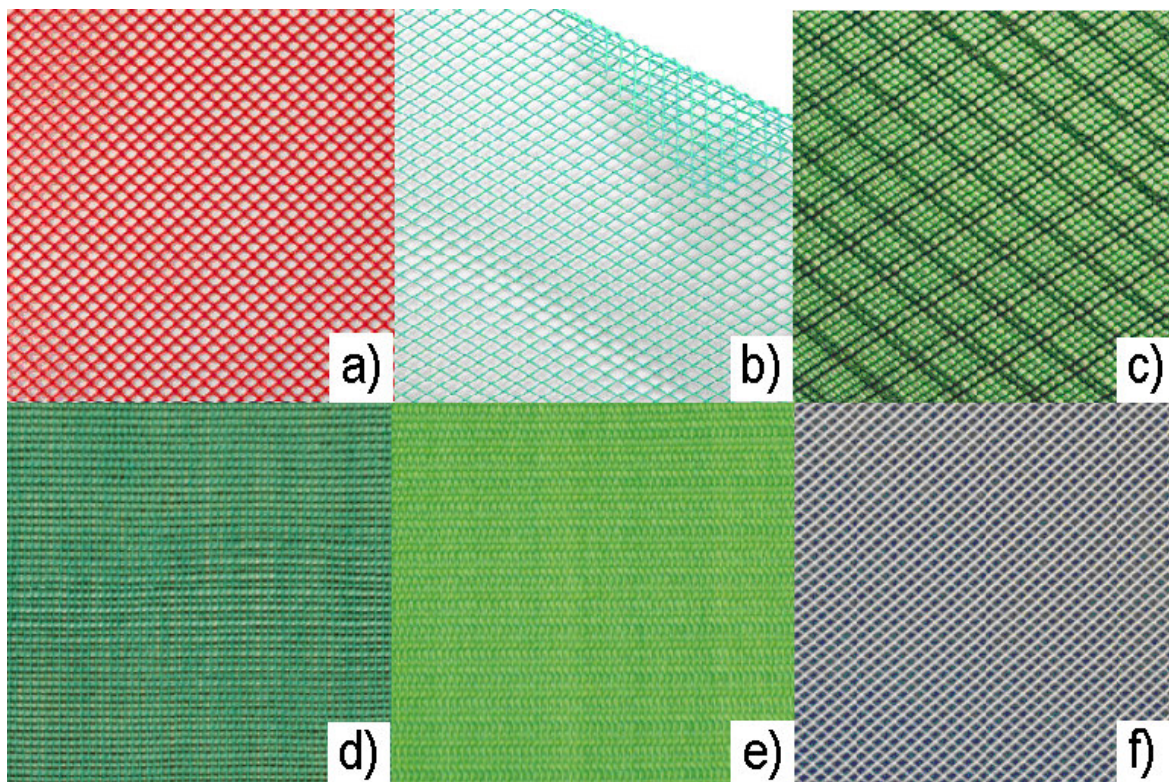
##### **Distribuční médium pryskyřice**

###### Rozvodná síť - tkanina

V kompozitní struktuře teče pryskyřice pouze za působení vakua poměrně pomalu a proto se používá rozvodná tkanina. Rozvodná tkanina slouží k rychlejší distribuci pryskyřice, tím ke zkrácení časů zaplnění kompozitní struktury pryskyřicí. Existuje však více

druhů rozvodné tkaniny, kterou vybíráme dle požité technologie, pryskyřice, ceny a také členitosti povrchu výrobku.

Rozvodné tkaniny lze rozdělit dle materiálu, maximální teploty použití, technologie, pryskyřice, hmotnosti. Firmy, které se zabývají výrobou těchto materiálů mají ve své nabídce více druhů které mají detailně popsány v materiálových listech. Proto se tu nebudu zabývat detailními informacemi.



Obr. 33: Druhy rozvodných tkanin firmy AIRTECH[123]

a)Resinflow 60, b)Greenflow 75, c)Resinflow 100, d)Resinflow 90 HT,  
e)Greenflow 185, f)Knitflow 40

### Resintrak

Tento specifický technický materiál pomáhá k rozvodu pryskyřice při vakuové infuzi pod pružnou folii. Jeho použitím zrychlíme proces infuze – tedy i zkrátíme čas zatečení pryskyřice a zlevníme tím proces. Zároveň jeho použití je velice vhodné pro dopravu pryskyřice do méně přístupných míst, míst s vyšším odporem proti tečení. Obecně použitím tohoto pomocného materiálu zkrátíme čas a zlevníme výrobu.

Resintrak je velice specifická pletenina vyrobená ze 100% Polyesteru. Konstrukce je navržena tak, aby umožnila co největší tok pryskyřice a nedošlo ke zborcení, nebo stla-

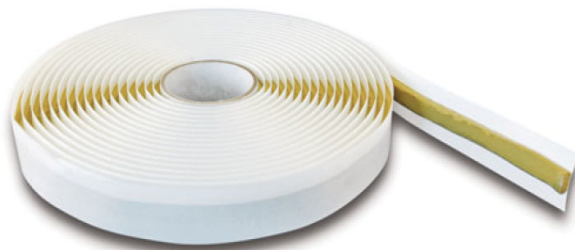
čení resin tracku vlivem vakua. Materiál se velice jednoduše stříhá na požadovaný rozměr a také se dodává i s oboustrannou lepící páskou Airhold 10 CBS, která umožní nalepit resintrack na kolmé stěny. Všechny tyto popsané materiály jsou od firmy AIRTECH.[23]



Obr. 34: Resin Track[23]

#### **Těsnící páska (žlutá) - AT-200Y Sealant Tape.**

Těsnící víceúčelová páska s vysokou přilnavostí pro použití jako těsnícího materiálu mezi nástrojem (formou) a vakuovou folií. Snadno se odstraňuje z kovových i nekovových materiálů. Lze použít do teplot až 204°C.[23]



Obr. 35: Těsnící páska AT-200Y[23]

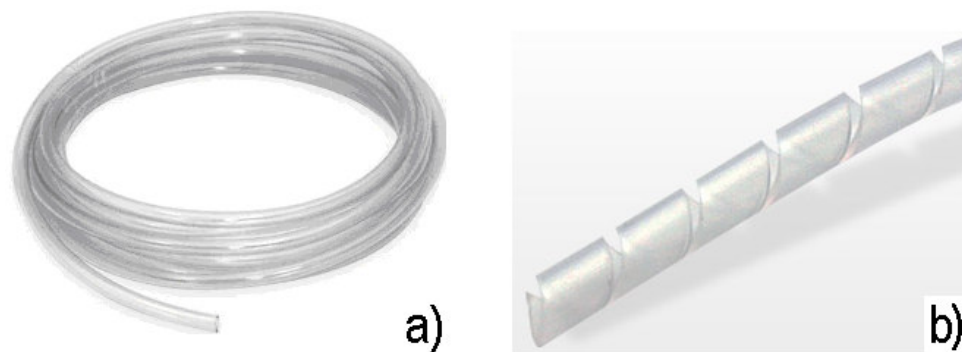
#### **Hadice pro dopravu pryskyřice a vytvoření vakua**

Hadice slouží pro dopravu pryskyřice a odvod vakua. Je vyrobena z PE a používají se nejčastěji o průměru 10 / 12,5mm. Průměr hadice volíme společně s konektorem pro připojení na systém vakua. Dle materiálového listu firmy AIRTECH je maximální teplota použití do 121°C.

Spirálová hadice slouží k rozvodu pryskyřice do míst která jsou obtížněji přístupná. Také se používá obvodu formy k vytvoření vakua a k odsávání přebytečné pryskyřice do rezervoáru. Nečastěji se používají průměry 10 / 12,5mm. V nabídce výrobců je však i více průměrů a délek.



Firma AIRTECH nabízí dvě varianty z hlediska použití maximálních teplot. Polyethylenová (PE) do teploty 121°C, Nylonová (NTF) do teploty 177°C.



Obr. 36: a) Přívodní hadice pryskyřice, b) Spirálová hadice[23]

### **Konektor RIC (Resin Infusion Connector)**

Slouží jako levné propojení uzavřené formy a přívodu pryskyřice do vakua. Liší se velikostí průměru hadic (přívodní, rozvodné), které mají být na konektor napojeny. Nabídka firem (AIRTECH), které se zabývají výrobou konektorů nabízí více konstrukčních možností.



Obr. 37: Konektor pro napojení pryskyřice do systému infuze[23]

### **Vakuování folie (Vacuum foil)**

Průhledná folie která slouží k uzavření formy a rovnoměrnému rozložení tlaky na povrch kompozitní struktury. Folie je velmi flexibilní, odolná proti roztržení, neporézní, odolná vůči pryskyřici. Existuje mnoho druhů, lišících se zejména maximální teplotou procesu.





Obr. 38: Vakuum Foil[23]

### Fixační lepidlo AIRTAC 2

Při pokládání suché výztuže do formy a pomocných materiálů – např. odtrhové tkaniny, rozvodné tkaniny, resintraku, může být praktické použít lepidla ve spreji. Pomáhá dočasně umístit a zafixovat materiály na vodorovných, svislých plochách nebo detaily. [23]



Obr. 39: Fixační lepidlo AIRTAC 2[23]

### Vývěva – Vakuová pumpa

Vývěva vytváří vakuum v uzavřené formě nutné pro čerpání pryskyřice ze zásobníku do suchých vrstev kompozitu. V tomto případě je forma uzavřená pružnou vakuovací folií.

Nejdůležitější vlastností vývěvy je její schopnost (výkon) pro vytvoření potřebného vakua (0,8 – 1,0)bar.



Obr. 40: Vakuová pumpe[[23]

### Rezervoár pryskyřice

Pokud by se pryskyřice při procesu vakuování dostala až do vývěvy, s největší pravděpodobností by došlo k jejímu zničení. Proto se mezi formou a vývěvou umísťuje rezervoár pryskyřice. Ten zabrání, aby se pryskyřice dostala do vývěvy. Na rezervoáru můžeme nejčastěji nalézt i tlakoměr.



Obr. 41: Rezervoár pryskyřice Airtech RB451[23]

### Zásobník pryskyřice

Pryskyřice spolu s tužidlem je pod tlakem nasávána do vakuovaného prostoru ze Zásobníku pryskyřice. Pryskyřice je ze zásobníku nasávána pomocí hadice a vhodném průměru.

### Měřidlo podtlaku

Bývá umístěno na rezervoáru pryskyřice, jak je zobrazeno na obr.41, nebo mezi vakuovou vývěvou a rezervoárem. Rozsah stupnice by měl být 0 – 1,2+ bar.



Obr. 42: Měřidlo podtlaku[23]

## 5 VÝROBA VZORKŮ

Výrobek, který jsme vyráběli, je sériový produkt firmy FORM s.r.o. a jedná se o stropní krycí panel ve vlakové kabině. Tento stropní krycí panel je ve firmě FORM s.r.o. vyráběn sériově, pomocí technologie ručního laminování.

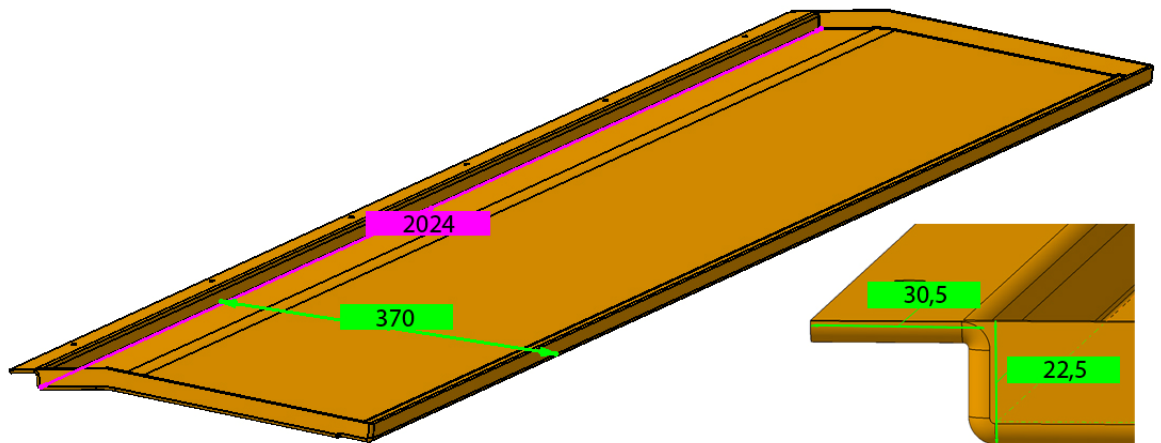
V Praktické části této diplomové práce se zabývám návrhem postupu výroby konkrétního výrobku. Díky experimentálnímu vyrábění chceme získat cenné praktické zkušenosti s technologií vakuové infuze pod pružnou folií (dále jen VFI) a navrhnout postup výroby.

V každém popisu výroby jednotlivého výrobku (vzorku), se budu zabývat návrhem skladby kompozitní struktury, jejich materiálům a změnám v postupu výroby oproti výrobě předešlého vzorku. Volba materiálů, struktury, změna postupu, závisí vždy na poznacích a získaných zkušenostech po každém vyrobeném kuse.

Mechanické a fyzikální vlastnosti výrobku vyráběného pomocí ručního laminování.

Rozměry: d x š x v (2024 x 400,5 x 22,5)

Hmotnost: 5,30 kg



Obr. 43 Rozměry 3D Cad modelu z Catia V5

### Příprava formy před procesem výroby

Používaná forma pro naše experimenty je sériová a slouží k výrobě ručním laminováním. Forma proto není zcela uzpůsobená k výrobě pomocí technologie VFI. Pokud bychom chtěli vhodnější formu, bylo by třeba zvětšit šířku okrajů pro aplikaci pomocných

materiálů. Rozdíl by tedy byl pouze ve velikosti šířky okraje. Širší okraj pomůže ke snadnější aplikaci pomocných materiálů.

### *GELCOAT*

Tento epoxidový gelcoat je možné nanášet stříkáním a je možné jej aplikovat i jako nátěr štětcem. Vytváří hladkou pohledovou vrstvu v závislosti na povrchu formy. Povrch nevyžaduje po vyjmutí z formy žádné další úpravy. Vhodné pro díly z epoxidů po provedení testu také pro většinu polyesterových a vinylesterových pryskyřic. Povrch se vytváří přímo ve formě což vede k finanční úspoře. K probarvování je možné použít pigmentové pasty do epoxidů. Čirý gelcoat je možné natírat i štětcem nesmí se však při natírání ředit - může poškodit separátor. Pro ředění se použije ředidlo pro epoxidový stříkací gelcoat. Pro vytvrzení gelcoatu použijte tužidlo H 100 v poměru 100:40(váhově) Doporučená max. tloušťka gelcoatu 0,05-0,2 mm. V případě většího nátěru je gelcoat měkký obtížně a dlouho se vytvrzuje. Tento gelcoat lze úspěšně použít jako topcoat - nátěr k uzavření vnitřní vrstvy laminátů a také pro vodě odolné nátěry dřeva.[30]

Před vlastní výrobou je třeba mít připravenou formu pro kladení materiálů. Na tvarovou dutinu formy je nanесena nástřikem povrchová vrstva výrobku gelcoat. Nástřik se provádí tak, že okraje formy se překryjí páskou, aby nedošlo ke znečištění okrajů formy, poté pomocí stříkací pistole je nanесena vrstva gelcoatu. Okraje se zakryjí proto, aby se později na ně mohly aplikovat (přilepit) pomocné materiály pro technologii VFI.

## 5.1 Vzorek 1

Skladba struktury a základní vlastnosti stavby sendvičové struktury jsou uvedeny v tabulce.

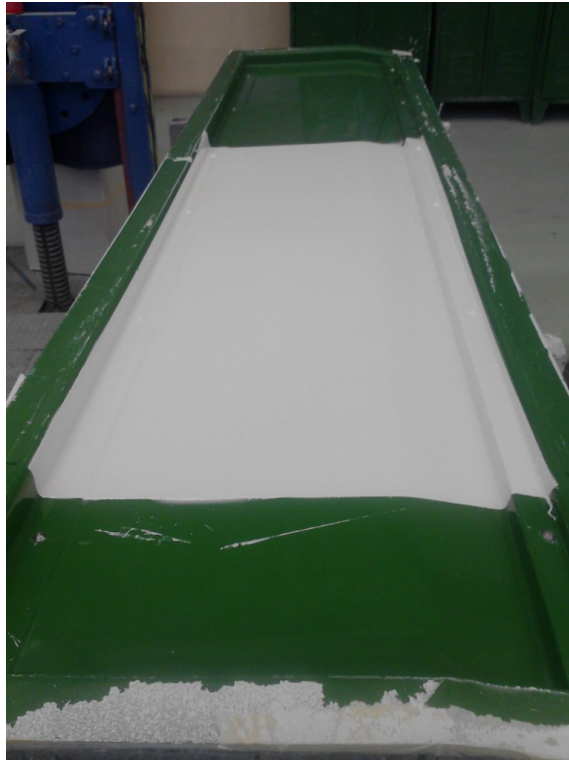
Vzorek č. 1	
Skladba	2-1-2
Počet vyztuž. vrstev	4
Materiál vyztuž. vrstev	Glass fabric 204g/m <sup>2</sup>
Sandwich	ANO
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resinrak	materiál 1 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	AROPOL Polyesterová G105E 4kg
Tvrdidlo	BUTANOX 2 %
infúze 100%	ANO
infúze 100% [min]	4:00
počátek gelování 100% [min]	16:00

Tab. 1: Sendvičová konstrukce vzorek č.1

### Příprava

Jelikož je tento výrobek na první výrobní pokusy velký, bude se nejprve vyrábět pouze část výrobku. Vybrána byla středová část bez bočních okrajů.

Na tvarovou dutinu formy 6 hodin před samotnou výrobou (položením jednotlivých vrstev materiálů) je nanášena nástřikem povrchová vrstva gelcoat. Povrchová vrstva je nanášena ve středu formy v délce 105cm. Jako první výrobek se bude vyrábět pouze část. Je to z toho důvodu, abychom vyzkoušeli technologii VFI na jednodušším tvarovém povrchu a získali zkušenosti pro výrobu složitějších výrobků.



Obr. 44: Nástřik povrchové vrstvy Gelcoat

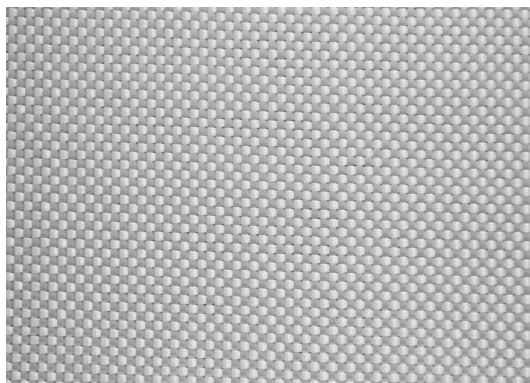
### **Očekávání**

Při výrobě prvního kusu jsou očekávány především první získané zkušenosti, poučit se z chyb a v případě neúspěšné výroby, získané poznatky aplikovat na další vzorcích.

### **Volba materiálů**

#### Výztuž

Materiál výztuže je zvolen: Skelná tkanina: Glass fabric 204g/m<sup>2</sup>-plein RT 200



Obr. 45: Skelná tkanina: Glass fabric 204g/m<sup>2</sup>-plein RT 200

#### Sendvičový materiál

Materiál sendviče je zvolen: Pěnové PVC Herex C 70.55, tl. 5 mm. 8000x2000

### Pryskyřice

Byla zvolena Polyesterová pryskyřice AROPOL G 105E

### Pomocné materiály

Při výrobě jsem používal pomocné materiály, které byly dostupné ve firmě FORM s.r.o. Tyto materiály jsou přímo určeny pro Infuzní technologii pod pružnou vakuovací folií.

- Odtrhová tkanina Peel-Ply, rovodná tkanina Greenflow 75, oboustranná lepicí páska Airhold CBS 10, žlutá těsnicí páska Sealant Tape AT-200Y, plná a spirálová hadice, kolínka typu „T“ a „L“, vakuovací folie.

### Pomocné nářadí

- Kleště, ulamovací nůž, nůžky, Rezervoár pryskyřice Airtech RB451, centrální vývěvový systém firmy Form s.r.o.

### **Postup výroby**

Na povrchovou vrstvu formy nastříkán gelcoat, popsáno v kapitole - příprava formy.

- Položena první vrstva tkaniny. Vrstva tkaniny pokládána tak, že nejprve byla položena střední část profilu výrobku tj. největší rovná plocha. Boky jsou zakládány jednotlivě zvlášť.





Obr. 46: První vrstva výztuže

- Nástřik lepidla Airtac 2. Nástřik se provádí proto, aby druhá vrstva skelné tkaniny držela po celou dobu instalace všech vrstev kompozitní sendvičové struktury a pomocných materiálů.
- Tvarové (krajní části výrobku) položeny vždy ke každé vrstvě zvlášť.



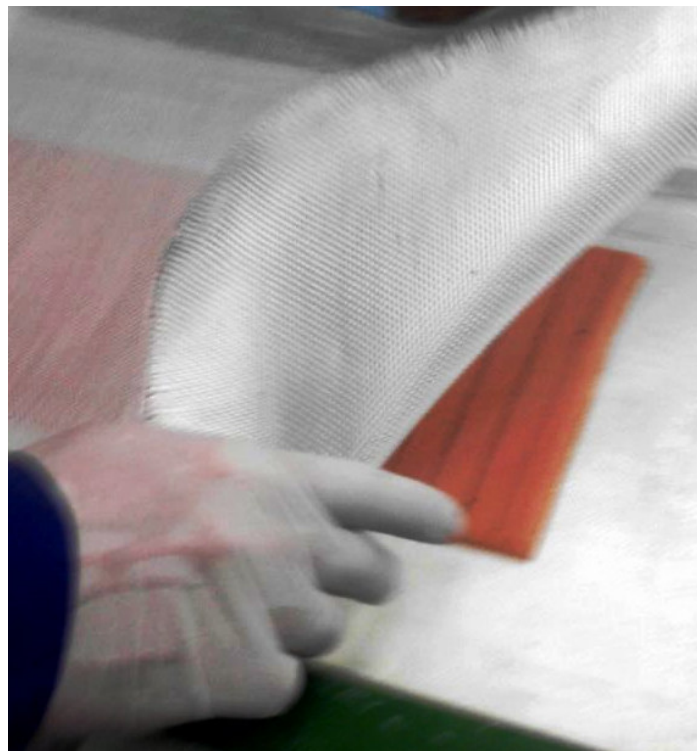
Obr. 47: Položení krajní části výztuže

- Položena 2 vrstva tkaniny



Obr. 48: První a druhá vrstva výztuže

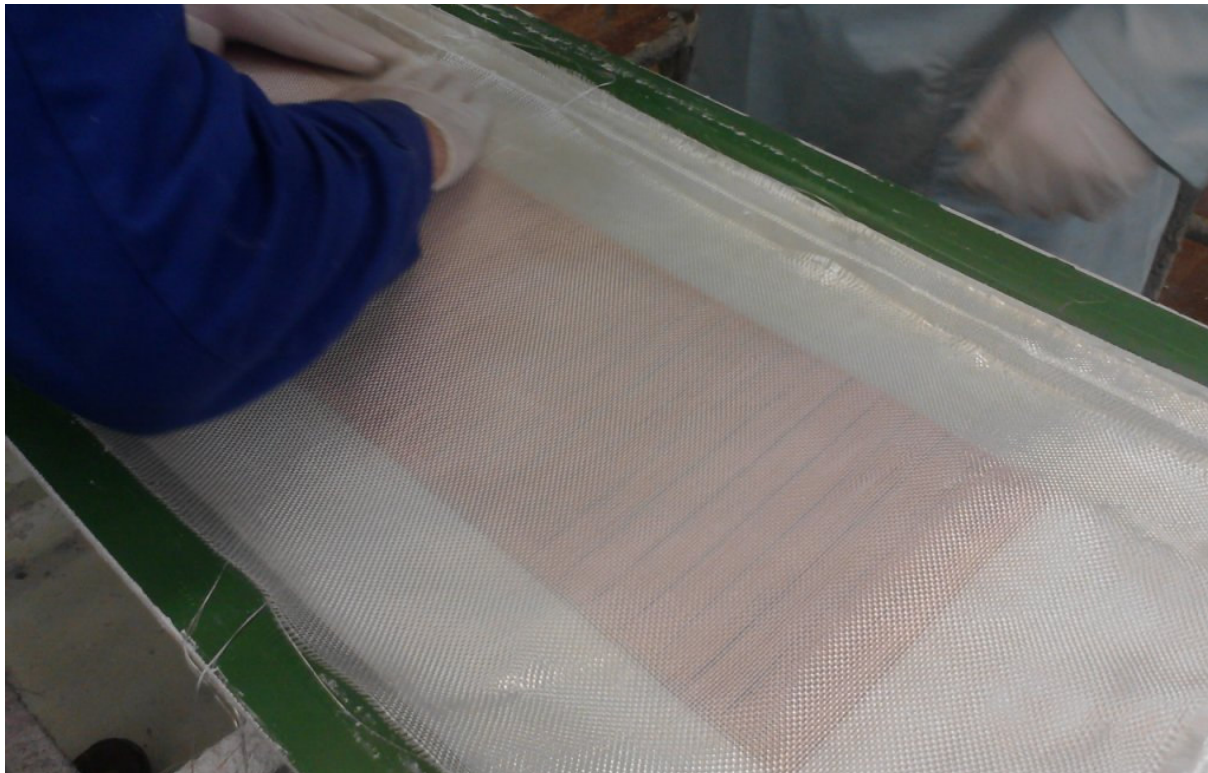
- Na tyto dvě vrstvy tkaniny položen Sendvič (PVC pěna) o rozměrech 800 x 200 x 5mm. V sendvičové PVC pěně vytvořen rastr 20 x20mm děr špendlíkem o Ø1mm. Sendvič na délku vystředěn od okrajů 100mm.



Obr. 49: Sendvičové jádro mezi 2 a 3 vrstvou

- Poté položeny 2 vrstvy tkaniny. Pomocí nástřiku lepidla Airtac 2 mezi jednotlivými vrstvami jsme zajišťovali ustálenou polohu jednotlivých vrstev. U obou vrstev byl

změněn nástřih a to tak, že šířka tkaniny se rovná celé šíři profilu. Boky již nejsou kladeny zvlášť. Tato změna pozitivně ovlivňuje časové nároky na stříhání a pokládání skelné tkaniny.

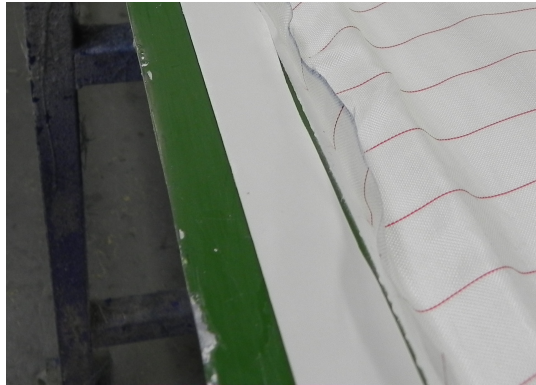


Obr. 50: Pohled na sendvičové jádro a třetí vrstvu výztuže

- Vrstvy tkaniny pokud zasahují na okraj formy kde přijdou pomocné materiály odstříhneme. Na formě jsou naznačeny hranice budoucího výrobku. Stačí když tkanina tuto hranici přesahuje o 5mm.

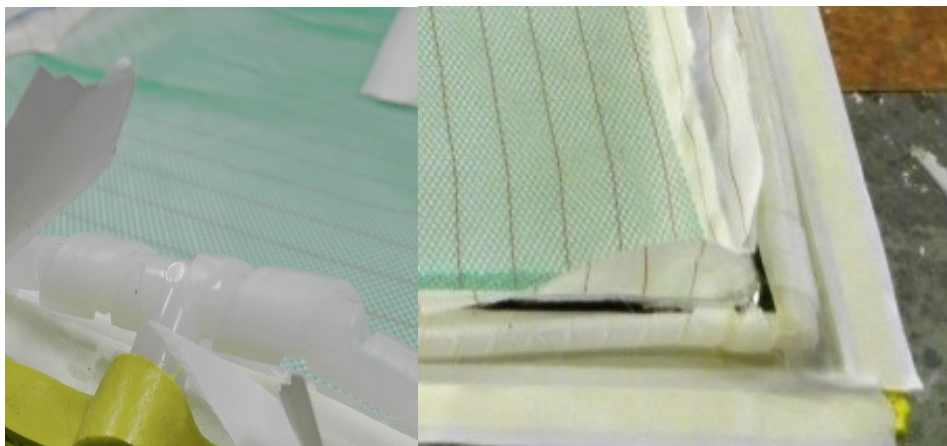
#### Pomocné materiály

- Na vnitřek vnějšího okraje formy je nalepena oboustranná lepicí páska Airhold 10 CBS. Oboustranně lepicí páska je rozstřižena napůl. Jednak z důvodu šetření pomocným materiálem a jednak z důvodu toho, že okraj formy není dostatečně široký pro aplikaci pomocných materiálů. Tato forma slouží k výrobě ručního laminování, proto jsou okraje užší než by byla potřeba.



Obr. 51: Nalepení oboustranné lepicí pásky Airhold 10 CBS

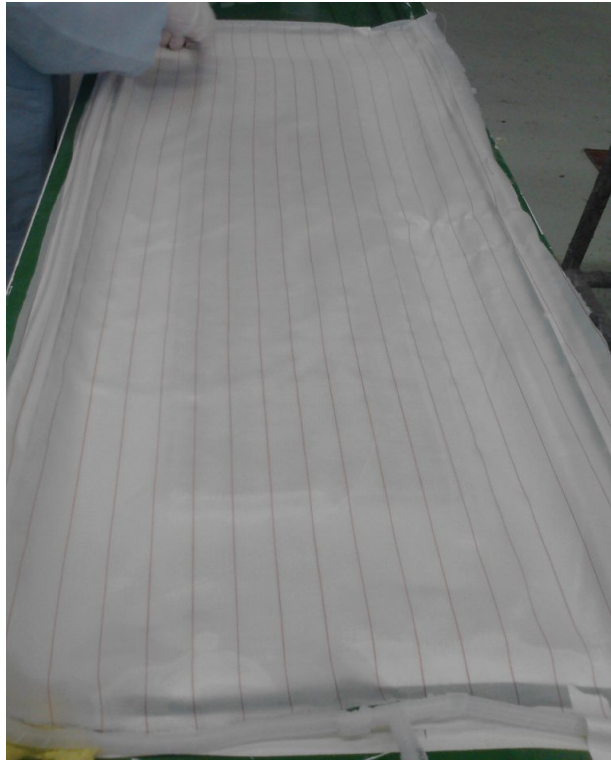
- Na pásku Airhold 10 CBS jsou přilepeny odsávací spirálové hadice. Hadice jsou v rozích propojeny Polyethylenovými „L“ kolínky. Pro napojení na systém k re-zvoáru bylo použito Polyethylenového „T“ kolínka.



Obr. 52: Napojení „T“ kolínka a přichycení spirálové hadice

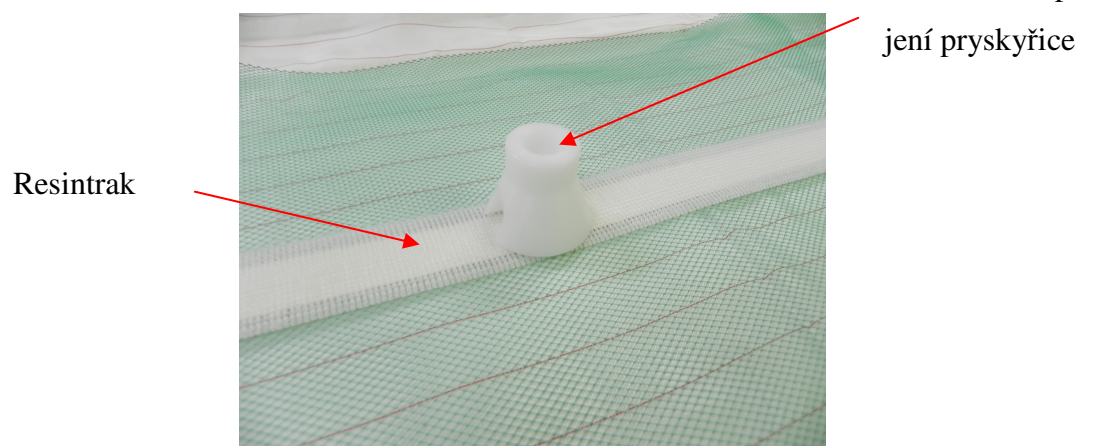
- Peel-Ply je odtrhová tkanina. Je položena jako první z pomocných materiálů na vrstvy sendvičové kompozitní konstrukce. Tkanina musí těsně přiléhat v rozích, aby nedocházelo vytváření vzduchových kapes a k jejich následnému vyplnění pryskyřicí. Přebytek pryskyřice vede ke zvýšení hmotnosti a větší spotřebě pryskyřice. Tkanina také musí z části překrývat odsávací spirálové hadice, které jsou po okrajích formy.





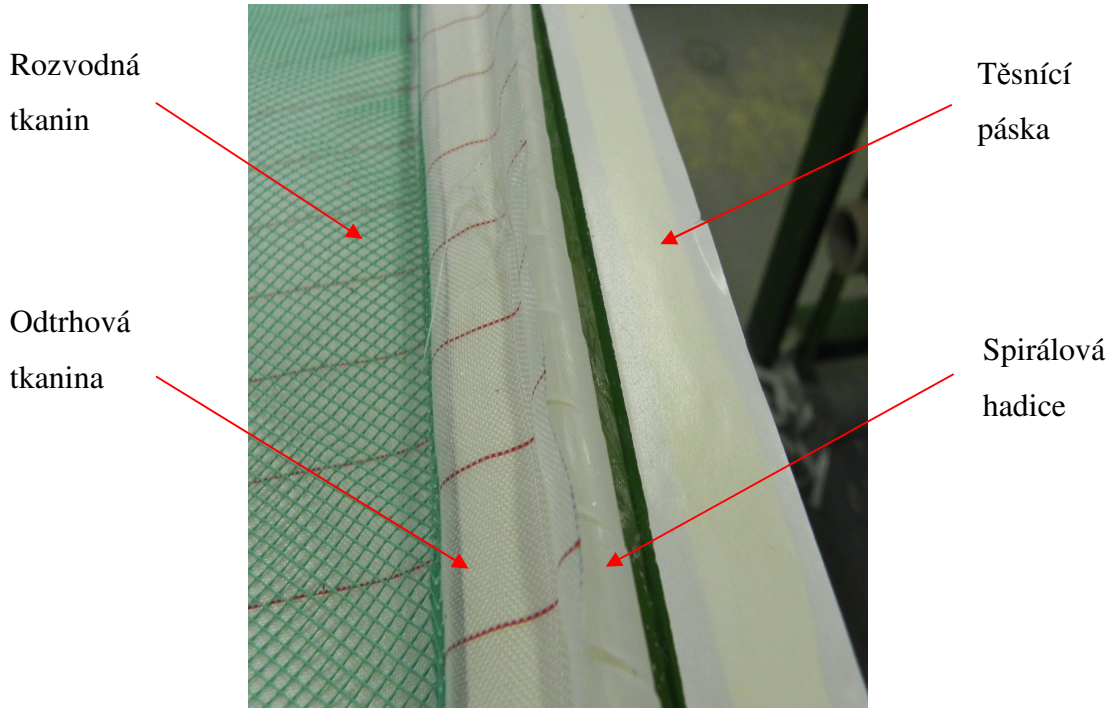
Obr. 53: Položení vrstvy odtahové tkaniny Peel-Ply

- Na vrstvu Peel Ply se pokládá Greenflow, který slouží k rozvodu pryskyřice. Musí být všude tam, kde chceme výsledný výrobek pryskyřicí prosytit. Greenflow je po celé délce vkuse, co se týče bočního profilu, tak je rozdělen na několik částí.
- Na Greenflow je v podélném směru umístěn Resintrak. Délka 800mm a 100 od každého konce na délku. Na šířku vystředěn.



Obr. 54: Vrstva rozvodné tkaniny GF, Resintrak, Konektor napojení pryskyřice

- Po samotném obvodu okraje formy je nalepena žlutá těsnící páska AT-200Y Sealant Tape obr.48. Jejím úkolem je později celou soustavu utěsnit, proto důkladně dbáme na její nalepení a čistotu povrchu na který se lepí.



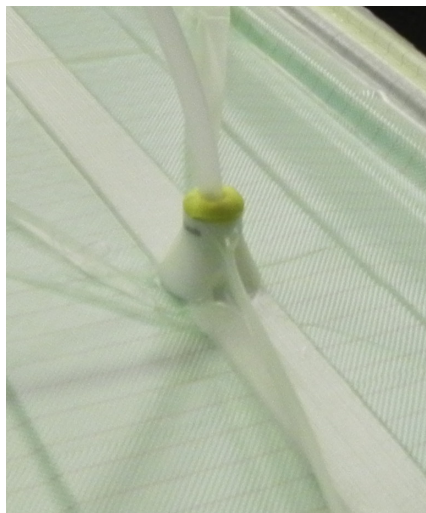
Obr. 55: Pomocné materiály

- Před fixací pružné vakuované folie umístíme do středu Resin Track konektor napojení přívodní hadice pryskyřice (RIC – Resin Infusion Connector) obr.45.
- Na tuto těsnící pásku je fixovaná pružná vakuovaná folie. Podél stran je okraj folie fixován rovnoběžně s hranou formy. V rozích se vytvoří tzv. „Ucha“ která se na závěr zatěsní žlutou těsnící páskou AT-200Y Sealant Tape. Při jakémkoli fixování s těsnící páskou musíme dbát na 100% těsnost. Při fixování folie na pásku musíme zaručit, aby folie byla dostatečných rozměrů, jelikož musí být volná (nenapnutá). Je to základní požadavek na aplikaci folie spolu s její těsností. Folie se při použití vakuu přisaje na povrch výrobku (na pomocné materiály). Pokud bude vakuovaná folie volná, dosáhneme jejího plného pokrytí všech rohů a členitých tvarů.



Obr. 56: Vakuovací folie přilepená těsnící páskou

- Napojení vakuovacího systému tj. Vývěvy napojenou na Rezervoár a rezervoár na připravenou formu s výztužemi, provedeme pomocí Polyethylenové hadice o průměru 8mm. Hadici po spojení s Konektorem RIC přes vakuovací folii zatěsníme žlutou těsnící páskou.

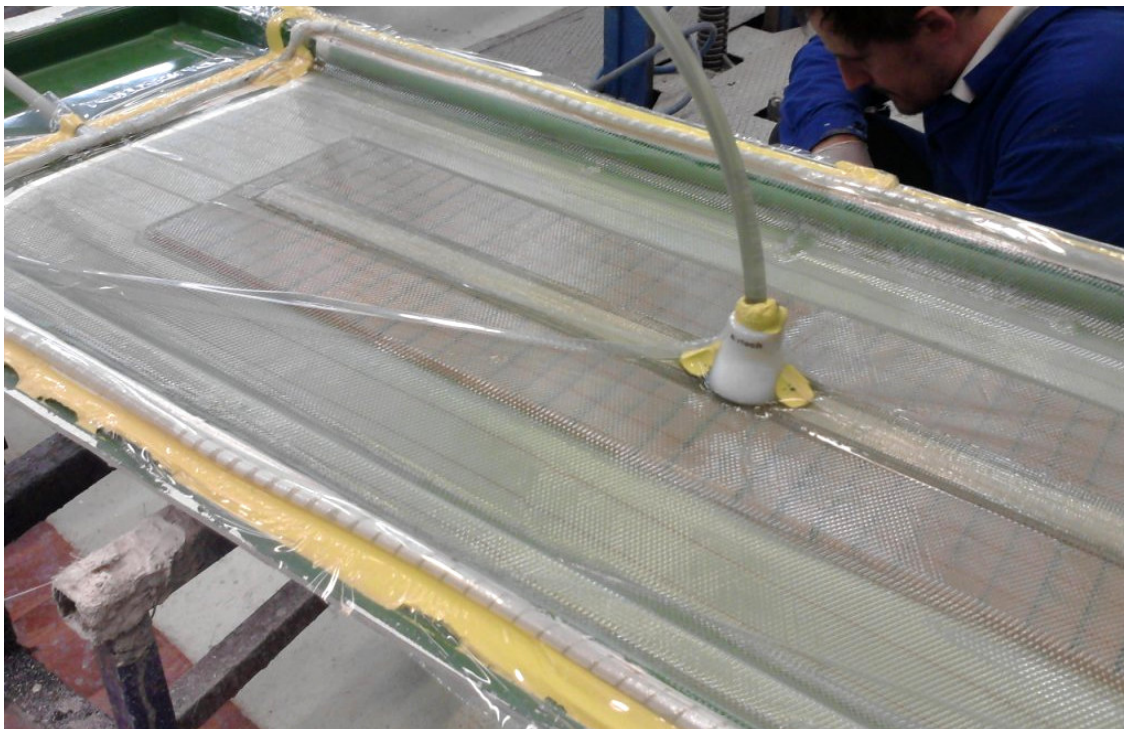


Obr. 57: RIC konektor napojený na vakuum

- Přívodní hadci jejíž druhý konec je volný sepne speciálními kleštěmi, aby se do prostoru nenasával vzduch



- Necháme působit podtlak
- Kontrolujeme poslechem a hmatem úniky vzduchu do prostoru vakua. Netěsnosti zaslepíme žlutou těsnící páskou AT-200Y Sealant Tape.
- Necháme působit podtlak až stoupne na hodnotu 0,8 bar a přitom sledujeme možné úniky vzduchu.
- Po zatěsnění necháme podtlak dále působit a navážíme si pryskyřici a tužidlo. Množství je uvedeno vždy v tabulce pro jednotlivé vzorky.
- Pryskyřici smícháme v nádobě s tužidlem – promícháme
- Přívodní hadici vložíme do nádoby s pryskyřicí a tužidlem, odpojíme kleště stlačující přívodní hadici pryskyřice s tužidlem a necháme začít proces infuze.



Obr. 58: Celkový pohled na zavakuovaný výrobek

### Zhodnocení

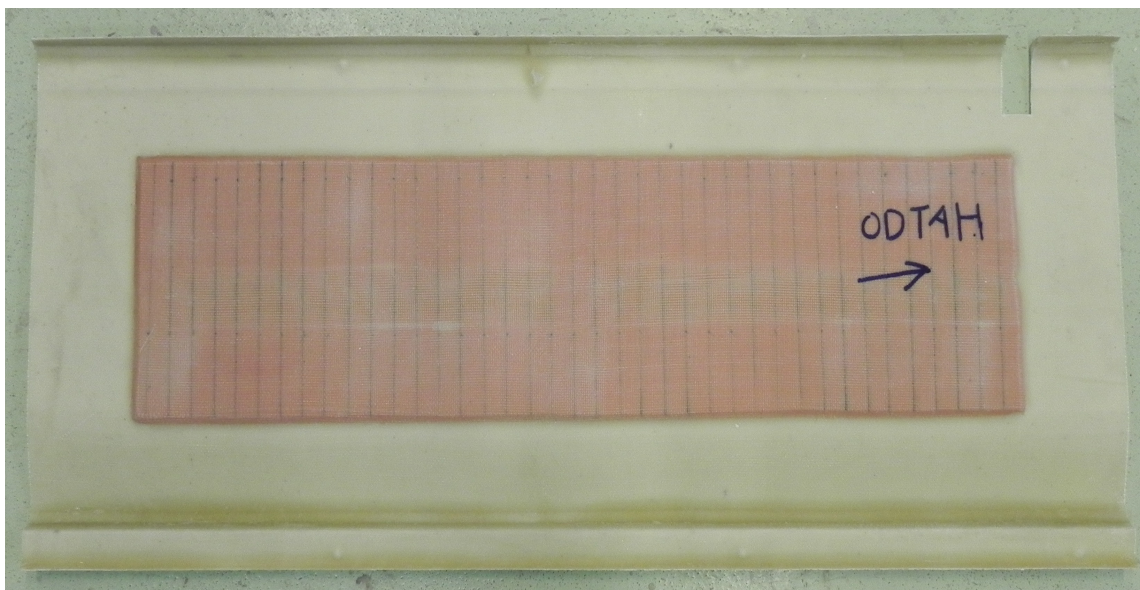
Při výrobě prvního vzorku jsme získali první zkušenosti s infuzní technologií pod pružnou vakuovaní folií. Při procesu infuze došlo ke 100% zaplnění. Výrobek se na první pokus s menšími výhradami zdařil. Lze vylepšit množství pryskyřice, přetoky pryskyřice po odtržení odtrhávací tkaniny Peel-Ply, které vzniknou v rozích, hranách.



Změna stříhu vrstvy 3 a 4 výztuže vedla ke zlepšení procesu pokládání jednotlivých vrstev. Jelikož stříhání úzkých okrajů ze skelné tkaniny nezaručuje potřebnou přesnost a homogenní rozložení výztuže. Úzké pásy tkaniny mají tendenci se rozplést.

Při ustavování tkaniny, jsme výztuže na kolmých stěnách a i tam kde bylo potřeba, fixovali sprayem Airtac 2. To ovšem vede ke znečištění prostředí. V druhém výrobku budeme proto zkoušet skelnou tkaninu SEARfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>. Tato tkanina má měrnou hmotnost, avšak nebude potřeba pokládat 4 vrstvy. Tato tkanina je samolepící a zároveň lepidlo v tkanině nezapáchá. Bude to zejména lepší pro čistější ovzduší při pokládání jednotlivých vrstev výztuže, sendviče, pomocných materiálů.

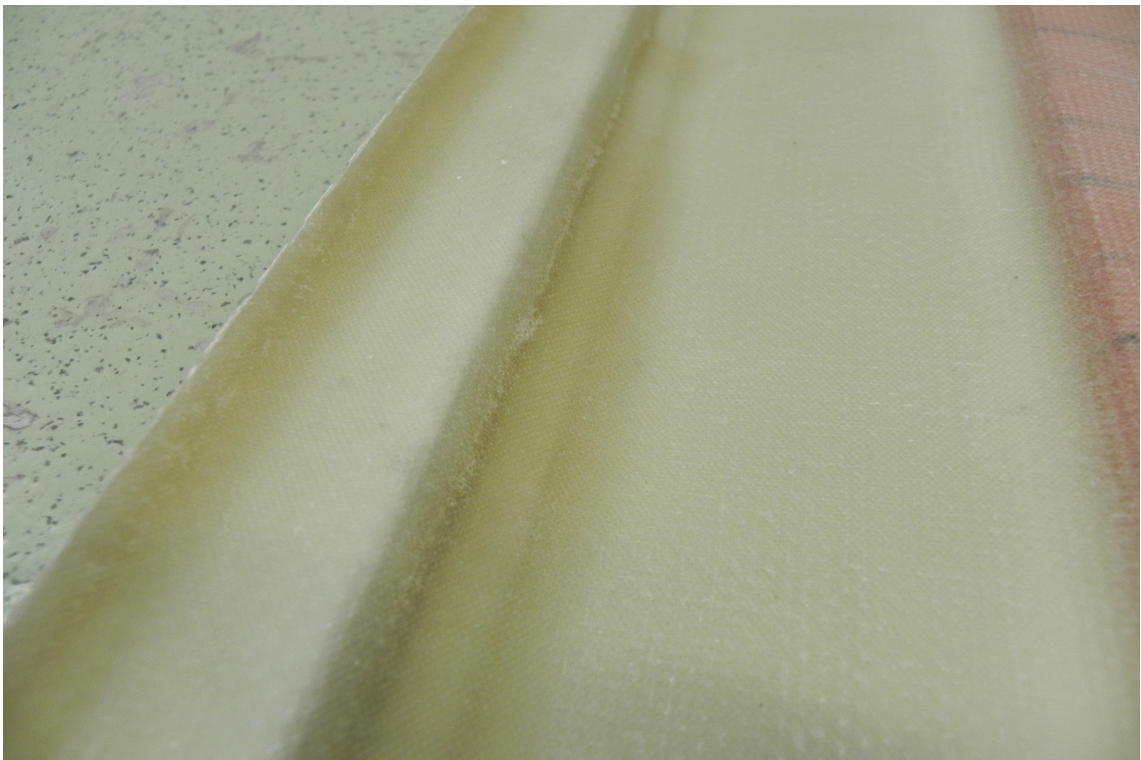
Zároveň je však zdůraznit, že výroba pomocí Vakuové infuze pod pružnou folií je mnohem čistější proces než klasické ruční laminování, kde je pracovník vystaven výparům z pryskyřice a musí proto nosit ochranné pomůcky.



Obr. 59: Nepohledová strana výrobku



Obr. 60: Pohledová strana výrobku



Obr. 61: Detail přetoků pryskyřice v hranách výrobku

## 5.2 Vzorek 2

Vzorek č. 2	
Skladba	1-1-1
Počet vyztuž. vrstev	2
Materiál vyztuž. vrstev	SAERfix UP ±45° 950g/m <sup>2</sup>
Sandwich	ANO
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resinrak	materiál 1 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	AROPOL Polyesterová G105E 4kg
Tvrdidlo	BUTANOX 2 %
infúze 100%	ANO
infúze 100% [min]	5:00
počátek gelování 100% [min]	16:00

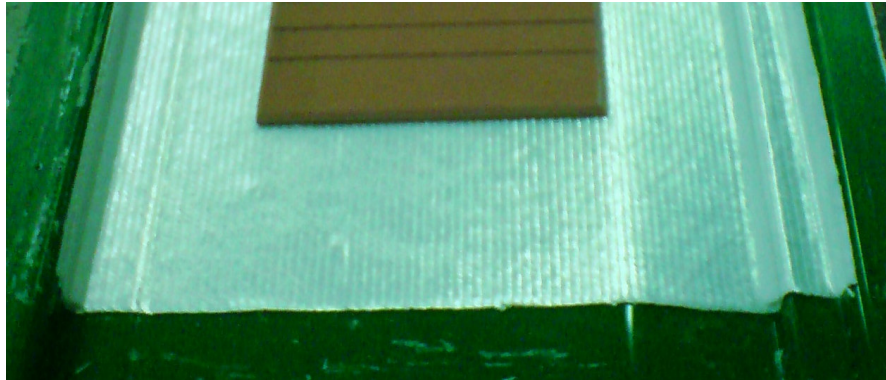
Tab. 2: Sendvičová konstrukce vzorek č.2

### Příprava

Na tvarovou dutinu formy 6 hodin před samotnou výrobou (kladením jednotlivých vrstev materiálů) je nanášena nástřikem Povrchová vrstva Gel Coat. Povrchová vrstva je nanášena ve středu formy v délce 170cm. Jako II. výrobek se bude opět vyrábět pouze část. Je to z toho důvodu, abychom vyzkoušeli technologii VFI na jednodušším tvarovém povrchu a získali zkušenosti pro výrobu sendvičových kompozitní struktury.

### Změny a očekávání

- Změna materiálu vyztuže na SAERfix UP ±45° (950g/m<sup>2</sup>)
- Změna počtu vrstev (skladby) ze 4 u prvního vzorku na 2 u druhého
- Nástřih po celé šířce a délce.



Obr. 62: Vrstva výztuže v jednom kuse po celé šířce

Předpokládá se, že skladba struktury bude jednodušší, vzhledem k počtu dvou vrstev výztuže. Předpokládá se i rychlejší a snadnější manipulace s tkaninou. Tkanina SEARfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup> je samolepící, proto nemusíme používat fixační lepidlo a nebude docházet k nežádoucím výparům, jako v případě fixačního lepidla.

#### **Volba materiálů**

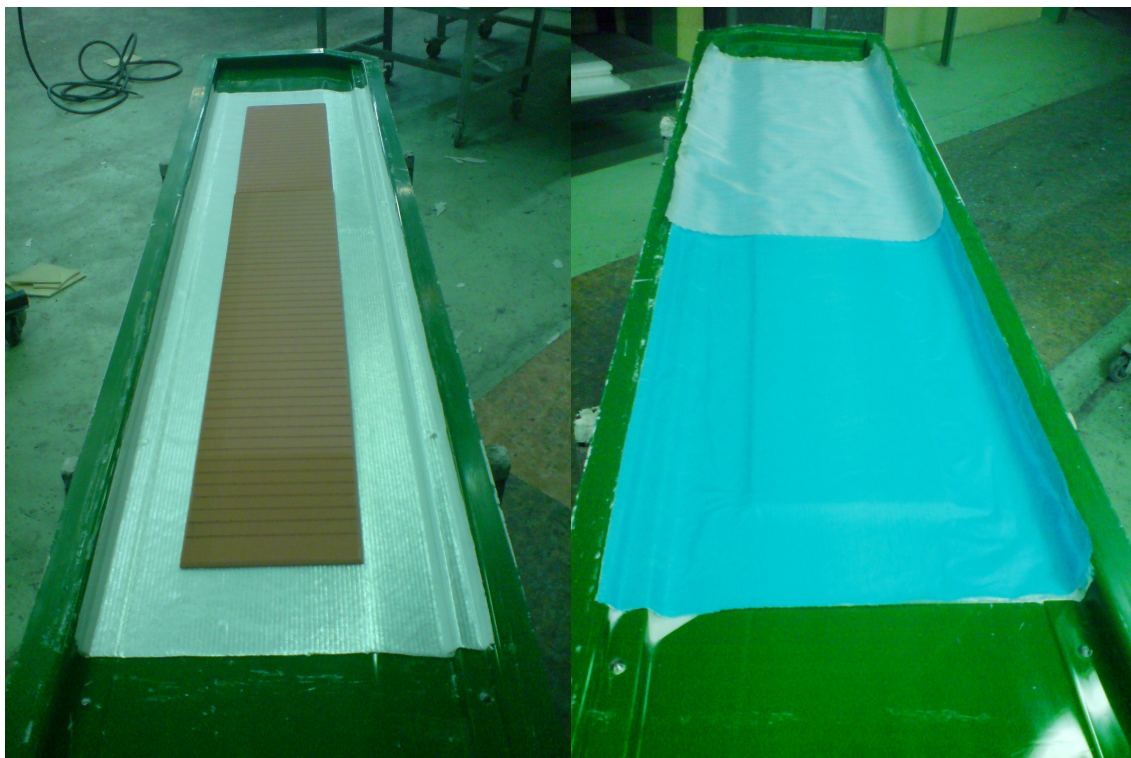
- Výztuž: SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>
- Sendvič: ANO – PVC Herex C 70.55, tl. 5 mm. 1800 x 200 x 5mm
- Pomocné materiály jsou stejné jako v předchozím případě.
- Pryskyřice: AROPOL Polyesterová G105E 4kg
- Tužidlo BUTANOX 2 %

#### **Postup výroby**

Na povrchovou vrstvu formy nastříkán GEL COAT viz výše popsáno v kapitole *Příprava formy*.

- Položena první vrstva samolepící tkaniny SAERFIX (BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC SF) ze skelných vláken řezaná na rozměry d x š 1630 x 445mm
- Nástřik lepidla Airtac 2.se neprovádí, jelikož tkanina je samolepící
- Na tuto vrstvu tkaniny položen Sendvič (PVC pěna) o rozměrech 1400 x 200 x 5mm. V sendvičové PVC pění vytvořen rastr 20 x 20mm děr špendlíkem o  $\varnothing 1$ mm. Sendvič na délkový rozměr vystředěn od okrajů 100mm. Na šířku dle Obr.





Obr. 63: Položen sendvič (*vlevo*), položena 2 vrstva (*vpravo*)

- Položena druhá vrstva samolepící tkaniny SAERFIX (BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC SF) ze skelných vláken řezaná na rozměry  $d \times š$  1630 x 445mm
- Tvarové (krajní boční části výrobku) položeny vždy ke každé vrstvě zvlášť.
- Vrstvy tkaniny pokud zasahují na okraj formy kde přijdou pomocné materiály odstříhneme. Na formě jsou naznačeny hranice budoucího výrobku. Stačí když tkani na tuto hranici přesahuje o 5mm.

#### Pomocné materiály

- Na vnitřek vnějšího okraje formy je nalepena oboustranná lepicí páska Airhold 10 CBS. Oboustranně lepicí páska je rozstřížena napůl. Jednak z důvodu šetření pomocným materiálem a jednak z důvodu toho, že okraj formy není dostatečně široký pro aplikaci pomocných materiálů. Tato forma slouží k výrobě ručního laminování, proto jsou okraje užší než by bylo potřeba.

- Na pásku Airhold 10 CBS jsou přilepeny odsávací spirálové hadice. Hadice jsou v rozích propojeny Polyethylenovými „L“ kolínky. Pro napojení na systém k rezervoáru bylo použito Polyethylenového „T“ kolínka.
- Peel-Ply je odtrhová tkanina. Je položena jako první z pomocných materiálů na vrstvy sendvičové kompozitní konstrukce. Tkanina musí těsně přiléhat v rozích, aby nedocházelo k vytváření vzduchových kapes a k jejich následnému vyplnění pryskyřicí. Přebytek pryskyřice vede ke zvýšení hmotnosti a větší spotřebě pryskyřice. Tkanina také musí z části překrývat odsávací spirálové hadice, které jsou po okrajích formy.
- Na vrstvu Peel Ply je položen Greenflow, který slouží k rozvodu pryskyřice. Musí být všude tam, kde chceme výsledný výrobek pryskyřicí prosytit. Greenflow je po celé délce vkuse, co se týče bočního profilu, tak je rozdělen na několik částí.
- Na Greenflow je v podélném směru umístěn Resintrak. Délka 1400mm Na délku i šířku vystředěn.
- Po samotném obvodu okraje formy je nalepena žlutá těsnicí páska AT-200Y Sealant Tape. Jejím úkolem je později celou soustavu utěsnit, proto důkladně dbáme na její nalepení a čistotu povrchu na který se lepí.
- Před fixací pružné vakuovací folie umístíme do středu Resintrak Konektor napojení přívodní hadice pryskyřice (RIC – Resin Infusion Connector).
- Na tuto těsnicí pásku je fixovaná pružná vakuovací folie. Podél stran je okraj folie fixován rovnoběžně s hranou formy. V rozích se vytvoří tzv. „Ucha“ která se na závěr zatěsní žlutou těsnicí páskou AT-200Y Sealant Tape. Při jakémkoli fixování s těsnicí páskou musíme dbát na 100% těsnost. Při fixování folie na pásku musíme zaručit, aby folie byla dostatečných rozměrů, jelikož musí být volná (nenapnutá) Je to základní požadavek na aplikaci folie spolu s její těsností. Folie se při použití vakuua přisaje na povrch výrobku (na pomocné materiály). Pokud bude vakuování folie volná, dosáhneme jejího plného pokrytí všech rohů a členitých tvarů.
- Napojení vakuovacího systému tj. Vývěvy napojenou na Rezervoár a rezervoár na připravenou formu s výztužemi, provedeme pomocí Polyethylenové hadice o prů-

měru 8mm. Hadici po spojení s Konektorem RIC přes vakuovací folii zatěsníme žlutou těsnicí páskou.

- Přívodní hadci jejíž druhý konec je volný sepneme speciálními kleštěmi, aby se do prostoru nenasával vzduch
- Necháme působit podtlak
- Kontrolujeme poslechem a hmatem úniky vzduchu do prostoru vakua. Netěsnosti zaslepíme žlutou těsnicí páskou AT-200Y Sealant Tape.
- Necháme působit podtlak až stoupne na hodnotu 0,8 bar a přitom sledujeme možné úniky vzduchu.
- Po zatěsnění necháme podtlak dále působit a navážíme si pryskyřici a tužidlo. Množství je uvedeno vždy v tabulce pro jednotlivé vzorky.
- Pryskyřici smícháme v nádobě s tužidlem – promícháme
- Přívodní hadici vložíme do nádoby s pryskyřicí a tužidlem, odpojíme kleště stlačující přívodní hadici pryskyřice s tužidlem a necháme začít proces infuze.

### Zhodnocení

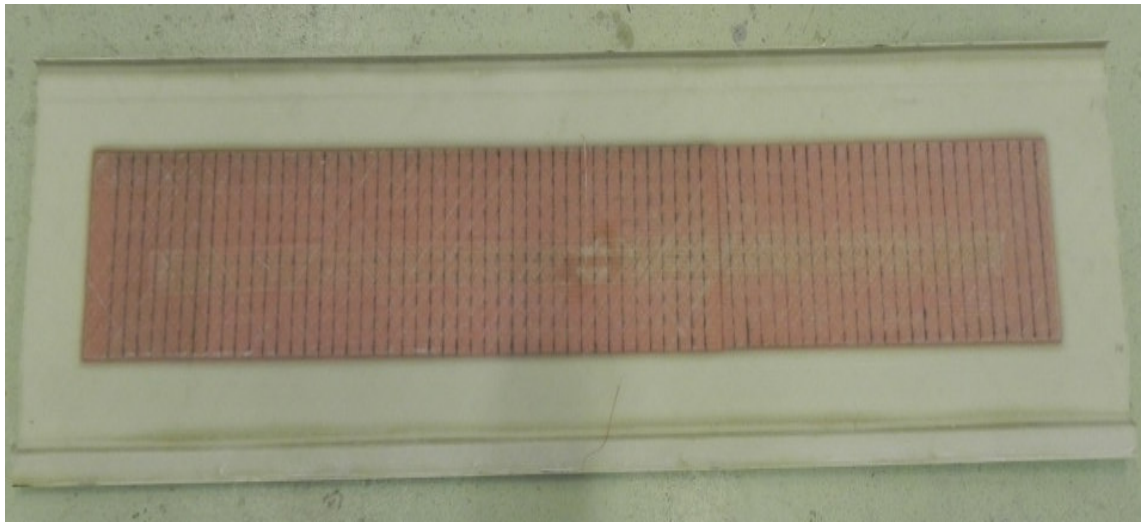
Při výrobě druhého výrobku jsme získali další zkušenosti s infuzní technologií pod pružnou vakuovací folií. Při procesu infuze došlo ke 100% zaplnění a s menšími výhradami se výrobek zdařil. Výrobek se svou velikostí přibližuje finálnímu celému výrobku. Zjistili jsme, že v procesu infuze, nedošlo k výraznému rozdílu mezi prvním a druhým výrobkem. Množství pryskyřice bylo dostačující, avšak pro výrobu dalšího stejného výrobku by bylo vhodné množství pryskyřice zmenšit z hlediska úspory.

Hlavní změna představovala změna materiálu výztuže na SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>. I když má materiál jiné vlastnosti než v předchozím případě, nebyly zpozorovány změny v procesu infuze.

Lze vylepšit množství pryskyřice, přetoky pryskyřice po odtržení odtrhávací tkaniny Peel-Ply, které vzniknou v rozích a hranách.

Změna stříhu vrstvy výztuže vedla ke zlepšení procesu stříhání jednotlivých vrstev. Jelikož stříhání úzkých okrajů ze skelné tkaniny prodlužuje čas stříhání, řezání – tedy pro-

dloužení času přípravy. Pro výrobu části výrobku (tedy středové části a jen částečné délky) je možné tento nástřih s výhodou použít.

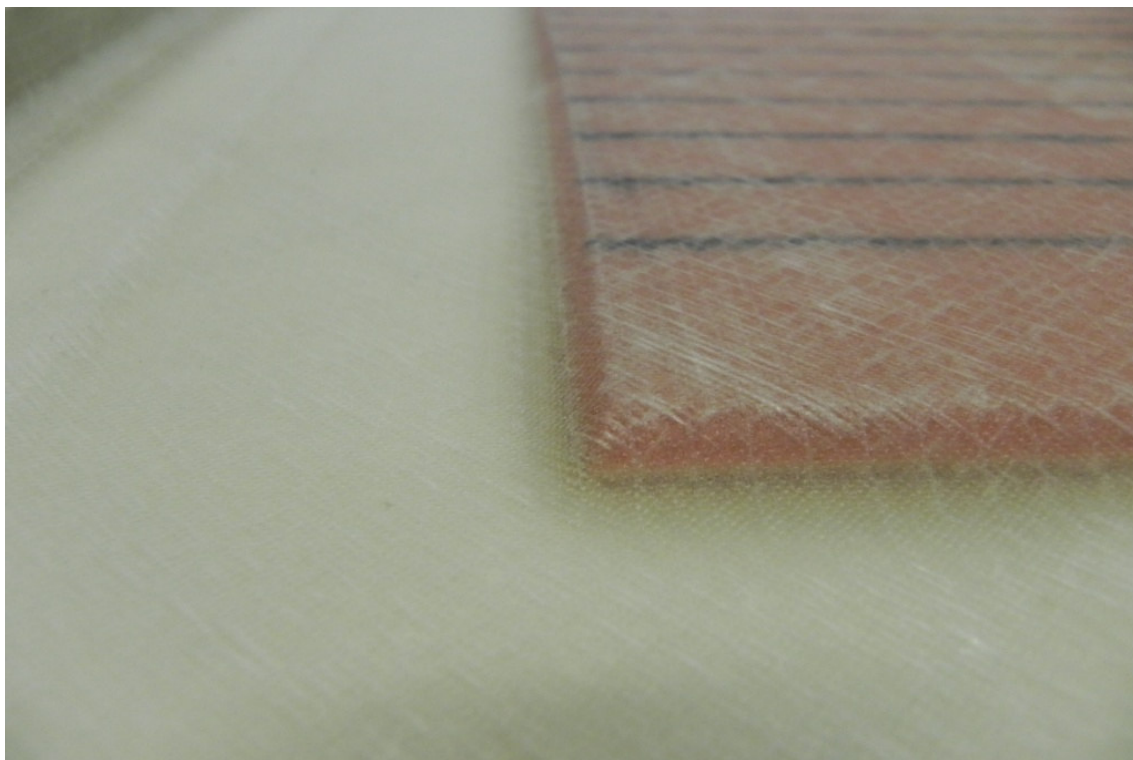


Obr. 64: Nepohledová strana výrobku



Obr. 65: Pohledová strana výrobku





Obr. 66: Detail sendviče

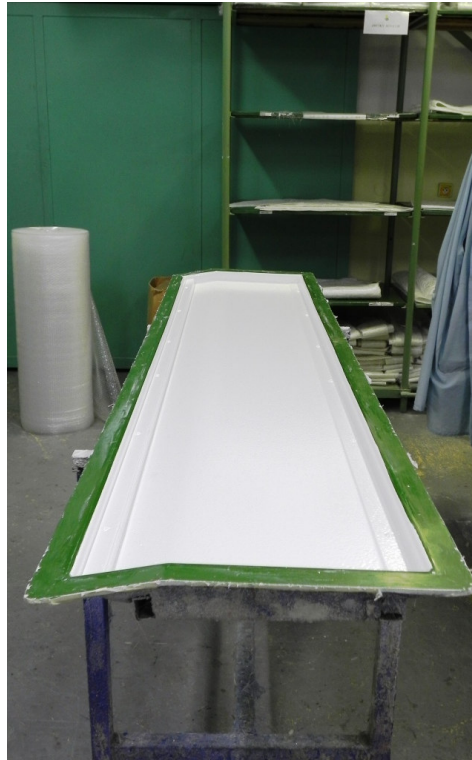
### 5.3 Vzorek 3

Vzorek č. 3	
Skladba	1-1-1
Počet vyztuž. vrstev	2
Materiál vyztuž. vrstev	SAERfix UP ±45° 950g/m <sup>2</sup>
Sandwich	ANO
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resinrak	materiál 1 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	DION Nehoř- lavá Polyeste- rová FR850- M850 4kg
Tvrdidlo	BUTANOX 2 %
infúze 100%	NE
infúze 100% [min]	neproběhla
počátek gelování 100% [min]	-

Tab. 3: Sendvičová konstrukce vzorek č.3

#### Příprava

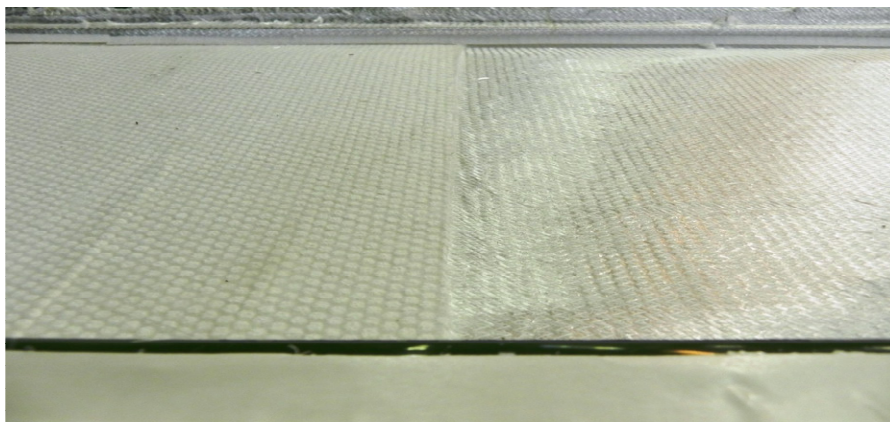
Na tvarovou dutinu formy 6 hodin před samotnou výrobou (kladením jednotlivých vrstev materiálů) je nanесena nástřikem Povrchová vrstva Gel Coat. Povrchová vrstva je nanесena na celou formu.



Obr. 67: Pohled na formu s gelcoatem

### Změny a očekávání

- Poprvé se vyráběl celý výrobek.
- Nástřih po celé šířce a délce.
- U vzorku 3 došlo ke změně materiálu sendviče z PVC pěny na COREMAT XM 2mm. Použit pouze na 1/2 výrobku.
- Poprvé se použila Polyesterová samozhášivá pryskyřice DION FR850-M850.



Obr. 68: Detail poloviny výrobku (vlevo se sendvičem, vpravo bez sendviče)

Došlo ke změně velikosti vyráběného výrobku, pryskyřice a sendvičového materiálu. Změnou pryskyřice se chceme přibližovat finálnímu výrobku s nehořlavou pryskyřicí. Změna sendviče je provedena pouze na jedné polovině, abychom simulovali výrobu dvou vzorků (jak se sendvičem, tak bez sendviče). Budeme zkoumat zatečení pryskyřice a nové jevy vznikající při těchto nových vstupech.

### **Volba materiálů**

- Výztuž: SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>
- Sendvič: ANO – COREMAT XM 2mm
- Pomocné materiály jsou stejné jako v předchozím případě.
- Pryskyřice: DION Nehořlavá Polyesterová FR850-M850 4kg
- Tužidlo BUTANOX 2 %

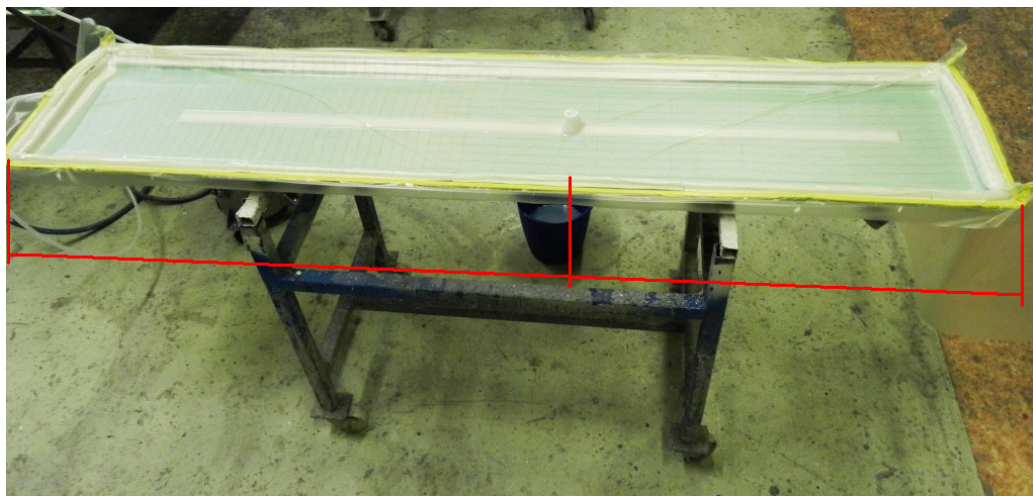
### **Postup výroby**

Na povrchovou vrstvu nastříkán gelcoat viz výše popsáno v kapitole - příprava formy.

- Položena první vrstva samolepící tkaniny SAERFIX (BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC SF) ze skelných vláken řezaná na rozměry d x š 2025 x 445mm
- Nástřik lepidla Airtac 2.se neprovádí, jelikož tkanina je samolepící
- Na tuto vrstvu tkaniny položen Sendvič Coremat XM 2mm o rozměrech 1000 x 320 x 2mm. Sendvič Coremat XM 2mm byl položen pouze na polovinu délky výrobku.
- Položena druhá vrstva samolepící tkaniny SAERFIX (BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC SF) ze skelných vláken řezaná na rozměry d x š 2025 x 445mm
- Tvarové (krajní boční části výrobku) položeny vždy ke každé vrstvě zvlášť.
- Vrstvy tkaniny pokud zasahují na okraj formy kde přijdou pomocné materiály odstihneme. Na formě jsou naznačeny hranice budoucího výrobku. Stačí když tkanina tuto hranici přesahuje o 5mm.

### **Pomocné materiály**

Konektor (RIC) pro připojení pryskyřice posunut nesymetricky ve prospěch poloviny se sendvičem. Další pomocné materiály nastaveny jako v předchozím případě.



Obr. 69: Nesymetrické umístění konektoru napojení

### Zhodnocení

Vzorek 3, byl vyroben poprvé jako celý a nikoliv jen jeho část. Jeho výroba nebyla úspěšná, jelikož nedošlo ke 100%-mu zatečení pryskyřice. Z obrázku je vidět, na které polovině výrobku je sendvič a na které ne. Tam kde není teče pryskyřice rychleji, avšak ani v případě poloviny bez sendviče nedošlo k zatečení před časem gelování.

Při pokládání jednotlivých vrstev výztuže se vyskytly komplikace. Nejvíce z důvodu nástřihového plánu, který nebyl vhodně zvolen. Zejména díky délce tkaniny se vyskytovaly problémy se založením. Při pokládání tak dlouhé tkaniny je potřeba dvou a více lidí. Je to nejvíce z toho důvodu, že tkanina je samolepící a při tak dlouhé tkanině, může tato vlastnost překážet. Pro další výrobek je třeba délku rozdělit a to nejlépe tak ,aby došlo ke svázání (překrytí) spojů. Při stříhání na menší rozměry může být čas stříhání delší než v případě delší rozměrů, ale při manipulaci s tkaninou jedním člověkem je kratší délka mnohem praktičtější a potažmo pro položení vrstev výztuže i rychlejší.

## 5.4 Vzorek 4

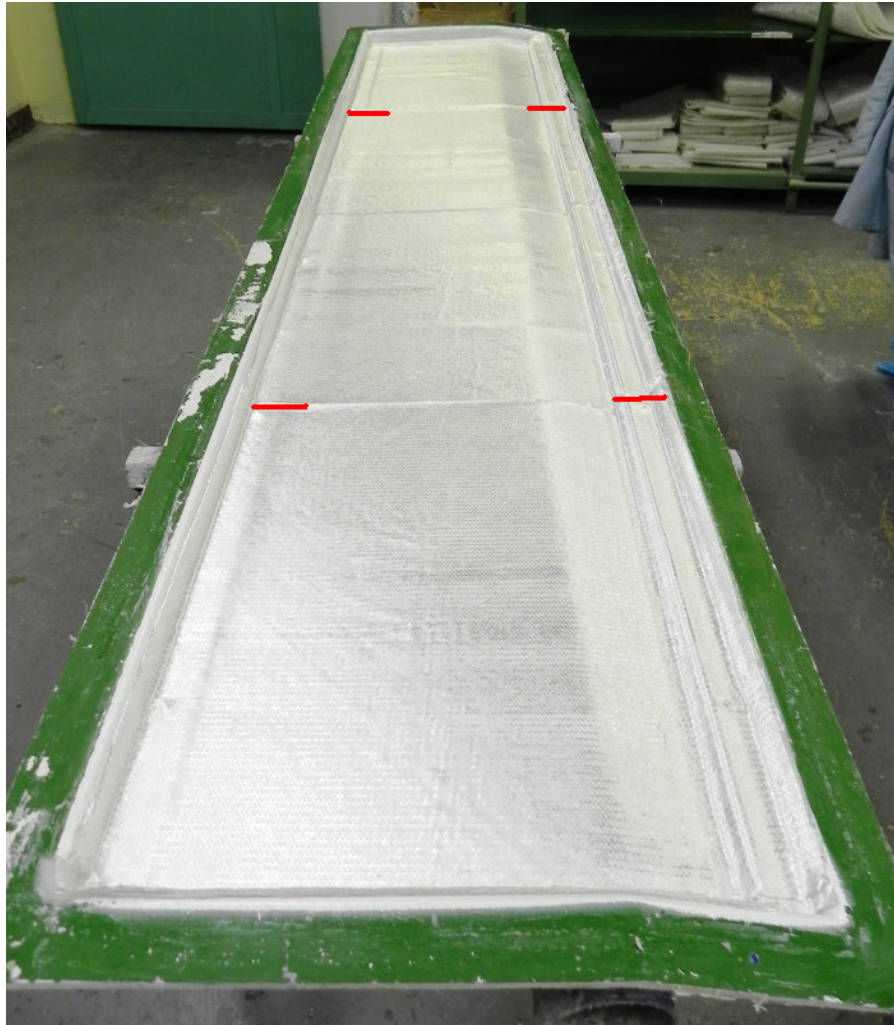
Vzorek č. 4	
Skladba	1-1/2-1
Počet vyztuž. vrstev	3
Materiál vyztuž. vrstev	SAERfix UP ±45° 950g/m <sup>2</sup>
Sandwich	NE
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resinrak	materiál 1 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	DION Nehoř- lavá Polyeste- rová FR850- M850 3kg
Tvrdidlo	BUTANOX 2 %
infúze 100%	NE
infúze 100% [min]	neproběhla
počátek gelování 100% [min]	-

Tab. 4: Sendvičová konstrukce vzorek č.4

### Změny a očekávání

- Nástřih po celé šířce, délkový rozměr poprvé rozdělen na 4/4 a 3/3. Je to z toho důvodu, aby se s tkaninou lépe manipulovalo a pokládalo na danou pozici ve formě. Na obr. ... naznačeno rozdělení 3/3.
- U vzorku 4 došlo ke změně sendviče, poprvé nebyl vůbec použitý.
- Lepší založení Grennflow.– lepší zatečení pryskyřice
- Zvětšení délky Resintraku – lepší zatečení pryskyřice
- Opět se použila Polyesterová samozhášivá pryskyřice DION FR850-M850.
- Snížení množství pryskyřice ze 4kg na 3kg





Obr. 70: Vrstva rozdělena na 3/3

Změnou nástřihu se očekává snadnější manipulace s tkaninou při zakládání než v předchozím případě. Jelikož byl v předchozím případě výrazný rozdíl v zatečení pryskyřice při infuzi mezi polovinou se sendvičem a bez, byl sendvič z tohoto pokusu vyloučen a Resintrak prodloužen. Zavedením těchto změn se očekává lepší zatečení.

#### **Volba materiálů**

- Výztuž: SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>
- Sendvič: NE
- Pomocné materiály jsou stejné jako v předchozím případě.
- Pryskyřice: DION Nehořlavá Polyesterová FR850-M850 3kg
- Tužidlo BUTANOX 2 %

#### **Postup výroby**

Na povrchovou vrstvu nastříkán Gelcoat viz výše popsáno v kapitole - příprava formy.

- Postupně pokládány po ¼ délky nastříhané kusy tkaniny ze skelných vláken, řezaná na rozměry 4x (d x š) 507 x 445mm.
- Položena první vrstva samolepící tkaniny SAERFIX (BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC SF).
- Sendvič v tomto výrobku není.
- Postupně pokládány po ¼ délky nastříhané kusy tkaniny ze skelných vláken, řezaná na rozměry 3x (d x š) 675 x 445mm.
- Položena první vrstva samolepící tkaniny SAERFIX (BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC SF).
- Tvarové (krajní boční části výrobku) položeny vždy ke každé vrstvě zvlášť.
- Vrstvy tkaniny pokud zasahují na okraj formy kde přijdou pomocné materiály odstříhneme.
- Na vnitřek vnějšího okraje formy je nalepena oboustranná lepicí páska Airhold 10 CBS.

#### Pomocné materiály

Pomocné materiály nastaveny jako v předchozím případě. Pouze jsou níže uvedeny rozdíly v nastavení pomocných materiálů.

- Greenflow jsme se pokusili lépe založit jako jeden nástřih (celek).
- Na Greenflow je v podélném směru umístěn Resintrak. Délka Resintraku je oproti předchozímu případu o 200mm delší. Konečná délka je 1600mm. Na délku i šířku vystředěn.
- Změna umístění Polyethylenového „T“ kolínka do rohu formy. Tímto se ušetří jedno PE kolínko. Také se nemusí provádět rozdělení boční odsávací spirálové hadice.





Obr. 71: Celkový pohled na zavakuovaný výrobek



Obr. 72: Detail napojení na rezervoár „T“ kolínkem v rohu formy

### Zhodnocení

Vzorek 4, byl vyroben celý jako druhý v pořadí. Jeho výroba nebyla úspěšná, jelikož nedošlo ke 100%-mu zatečení pryskyřice. Množství pryskyřice 3kg bylo dostatečné.

Pro lepší zatečení pryskyřice byl prodloužen Resintrak, lépe založený Greenflow – tzn. tam kde chceme aby byla pryskyřice musí být Greenflow, jinak pryskyřice mimo GF neteče. Ani tyto změny však nezaručily 100% zaplnění formy pryskyřicí.

Při plnění je vidět, že nehořlavá pryskyřice DION FR850-M850 teče hůře než hořlavá Polyesterová AROPOL Polyesterová G105E. Na příští další následující výrobek je potřeba použít i větší průměr přívodní hadice pryskyřice ze zásobníku. Prioritou však stále zůstává vyrobit další vzorek s nehořlavou pryskyřicí DION FR850-M850.

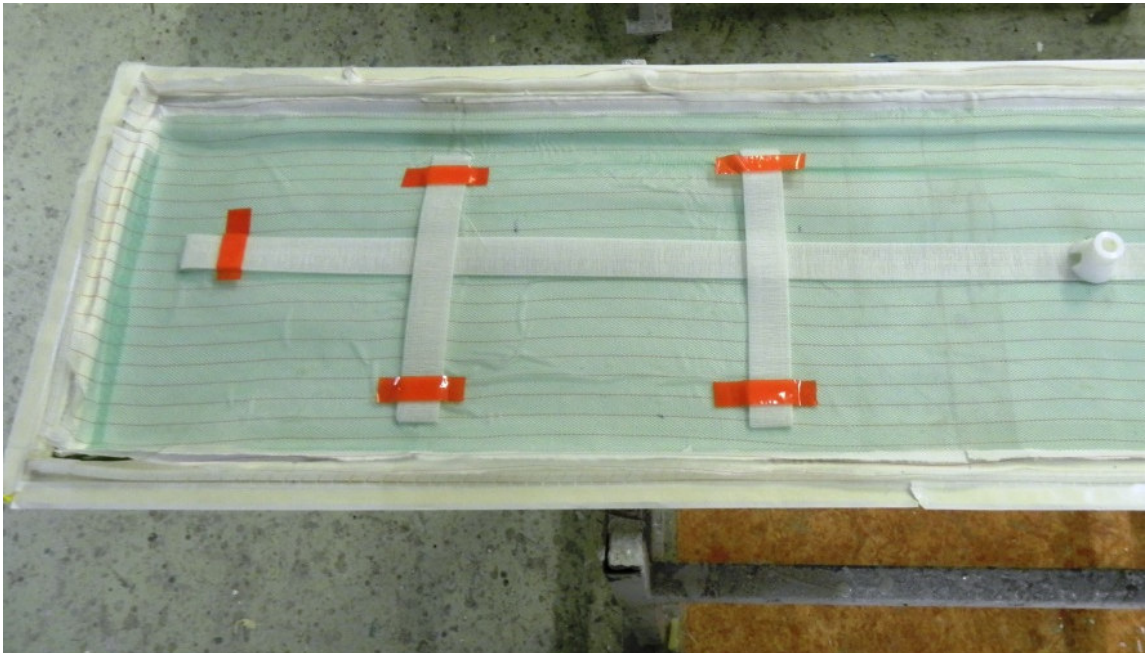
## 5.5 Vzorek 5

Vzorek č. 5	
Skladba	1-1
Počet vyztuž. vrstev	2
Materiál vyztuž. vrstev	SAERfix UP ±45° 950g/m <sup>2</sup>
Sandwich	NE
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resintrak	materiál 5 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	DION Nehoř- lavá Polyeste- rová FR850- M850 3,2kg
Tvrdidlo	BUTANOX 0,8 %
infúze 100%	ANO
infúze 100% [min]	14:00
počátek gelování 100% [min]	>20

Tab. 5: Sendvičová konstrukce vzorek č.5

### Změny a očekávání

- Nástřih po celé šířce, délkový rozměr rozdělen na 4/4 a 3/3 zachován.
- Sendvič opět nebyl použit.
- K Resintraku poprvé připojení dalších větví RT.
- Resintrak přilepen červenou lepicí páskou
- Zvětšení průměru přívodní hadice pryskyřice na 10mm
- Opět se použila Polyesterová samozhášivá pryskyřice DION FR850-M850.
- Zvýšení množství pryskyřice o 0,2kg
- Snížení množství Tvrdidla z 2% na 0,8% hm – prodloužený Gel Time



Obr. 73: Resinrak jedné poloviny výrobku s pomocnými větvemi

Zvětšením průměru přívodní hadice pryskyřice ze zásobníku, připojením dalších větví Resinraku pro přívod pryskyřice a snížením hmotnostních procent tvrdidla se očekává 100% zaplnění výrobku pryskyřicí.

#### **Volba materiálů**

- Výztuž: SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>
- Sendvič: NE
- Pomocné materiály jsou stejné jako v předchozím případě.
- Pryskyřice: DION Nehořlavá Polyesterová FR850-M850 3,2kg
- Tužidlo BUTANOX 0,8 %

#### **Postup výroby**

Postup výroby je stejný jako u předchozího výrobku 4. Budou zde však uvedeny změny provedené na výrobku 5.

#### Pomocné materiály

- Na Greenflow je v podélném směru umístěn Resintrak. Délka Resintraku je 1600mm jako v předchozím případě. Na délku i šířku vystředěn.
- Poprvé jsou připojeny další „boční“ větve Resintrak. Délka boční větví je 250mm. Jsou umístěny nesymetricky. Převažují na straně s větší členitostí (2 kolmé stěny). To proto, abychom podpořily lepší zatečení, jelikož je zde kladen největší odpor proti tečení pryskyřice
- Zvětšení průměru přívodní hadice pryskyřice na 10mm má také zajistit snadnější plnění

### Zhodnocení

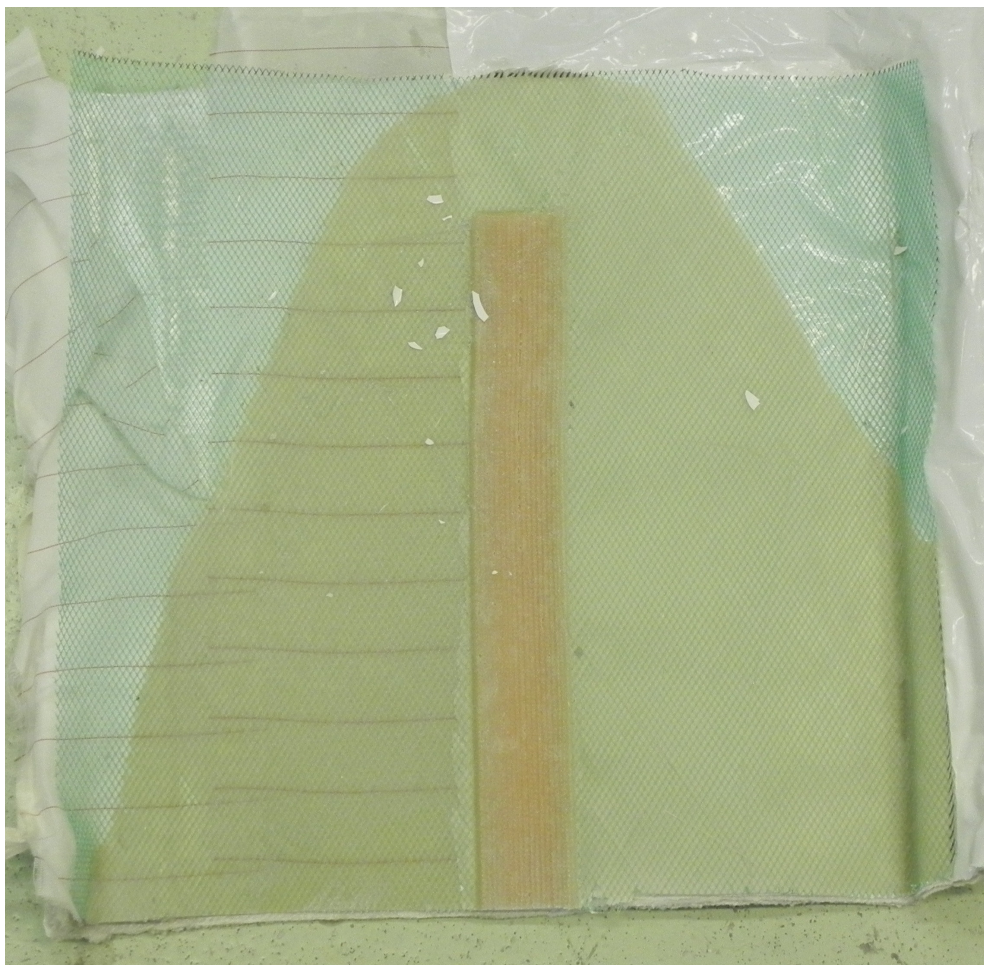
Z hlediska pozorování infuze zvenčí, došlo k plnému zaplnění. Avšak po vyndání výrobku s formy a sundání pomocných materiálů lze vidět nedostatečně zaplněná místa. Lze pozorovat prosycení pryskyřicí pouze pod Resintrakem. Tyto místa jdou vidět z nepohledové strany výrobku.

V místech kde není Resintrak se vyskytují neprosycená místa. Prázdna místa (vzduchové kapsy) jsou i mezi povrchovou pohledovou vrstvou a výztuží. Vyskytují se převážně v hranách výrobku.

Lze na výrobku pozorovat i opačný případ a to přebytek materiálu pryskyřice. Tyto přebytky negativně ovlivňují spotřebu materiálu a hmotnost výrobku. Nejvíce jsou tyto přebytky způsobeny nesprávným založením tkaniny Peel-Ply. Tato tkanina nebyla dobře založena v rozích a proto v těchto místech po odtržení tkaniny vznikají přebytky.

Po prozkoumání povrchu výrobku bylo zjištěno, že jeho hrany výztuž nevyplňuje dokonale. Je potřeba při příštím založení tkaniny dbát na větší důslednost.





Obr. 74: Detail neúspěšné infuze pryskyřice

## 5.6 Vzorek 6

Vzorek č. 6	
Skladba	1-1/2-1
Počet vyztuž. vrstev	2
Materiál vyztuž. vrstev	SAERfix UP ±45° 950g/m <sup>2</sup>
Sandwich	ANO/2
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resintrak	materiál 1/4 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	DION Nehoř- lavá Polyeste- rová FR850- M850 6kg
Tvrdidlo	BUTANOX 1 %
infúze 100%	ANO
infúze 100% [min]	14:00 a 17:30
počátek gelování 100% [min]	>20

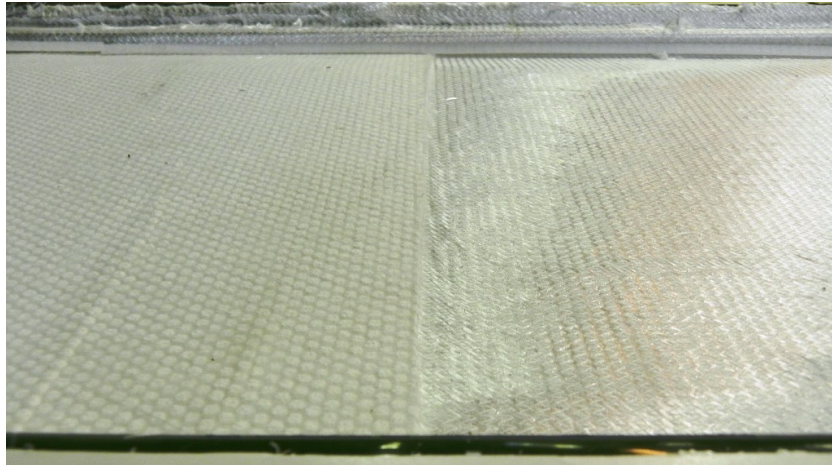
Tab. 6: Sendvičová konstrukce vzorek č.6

### Příprava

Vzorek 6(výrobek) byl vyráběn ihned po dokončení infuze výrobku 5.

### Změny a očekávání

- Změna nástřihového plánu po šířce, délkový rozměr rozdělen na 4/4 a 3/3 zachován.
- Byl použit sendvič COREMAT XM 2mm na jednu polovinu výrobku
- Resintraku stejný jako u vzorku 5.
- Přívodní hadice pryskyřice 10mm
- Opět se použila Polyesterová samozhášivá pryskyřice DION FR850-M850



Obr. 75: Detail polovin výrobku se sendvičem (vlevo) a bez sendviče (vpravo)

Jelikož je cílem vyrobit sendvičovou strukturu, použil jsem při výrobě opět sendvič. Pro dostatečné zaplnění struktury pryskyřicí jsem využil poznatků pro co nejlepší infuzi. Byly zvoleny dva typy materiálů sendviče. Tato volba zkoumá odlišnosti v zatečení, prostoupení vrstvami pryskyřicí.

- Dostatečný Gel Time
- Rozvětěný Resintrak
- Široká přívodní hadice pryskyřice
- Dostatečné pokrytí G.F.

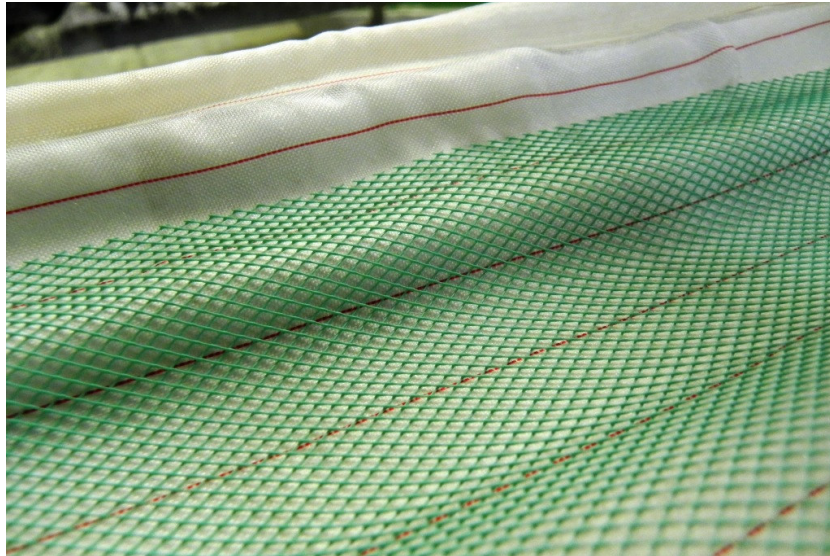
#### **Volba materiálů**

- Výztuž: SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>
- Sendvič: ANO – COREMAT XM 2mm
- Pomocné materiály jsou stejné jako v předchozím případě.
- Pryskyřice: DION Nehořlavá Polyesterová FR850-M850 6kg
- Tužidlo BUTANOX 1 %

#### **Postup výroby**

- Postup výroby je stejný jako v předchozím případě, liší se použitím sendviče COREMAT XM 2mm na jednu polovinu výrobku.





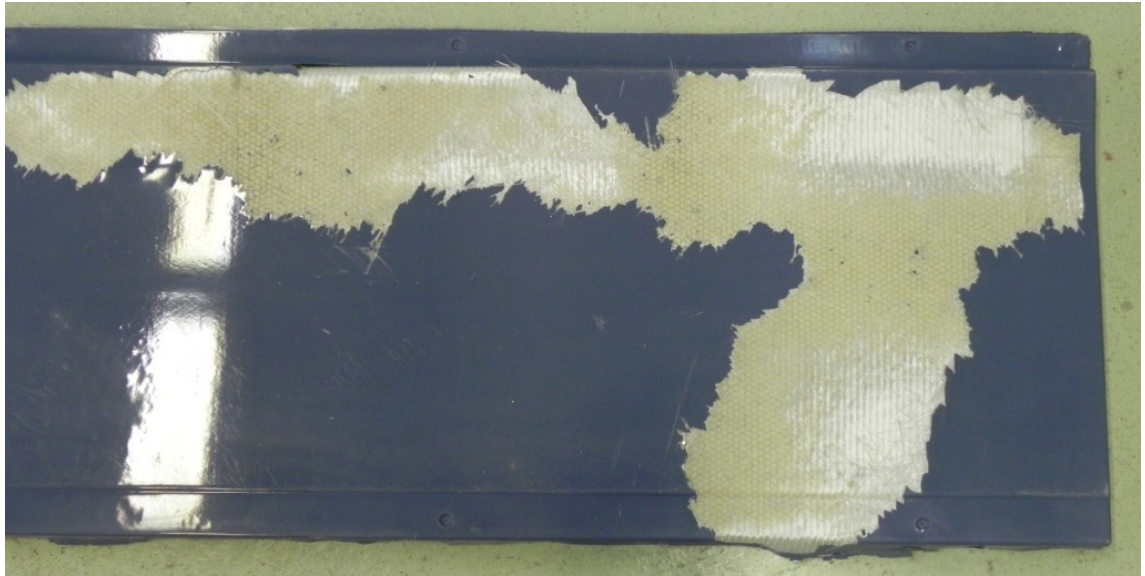
Obr. 76: Detail rozvodné tkaniny položené vcelku

### Zhodnocení

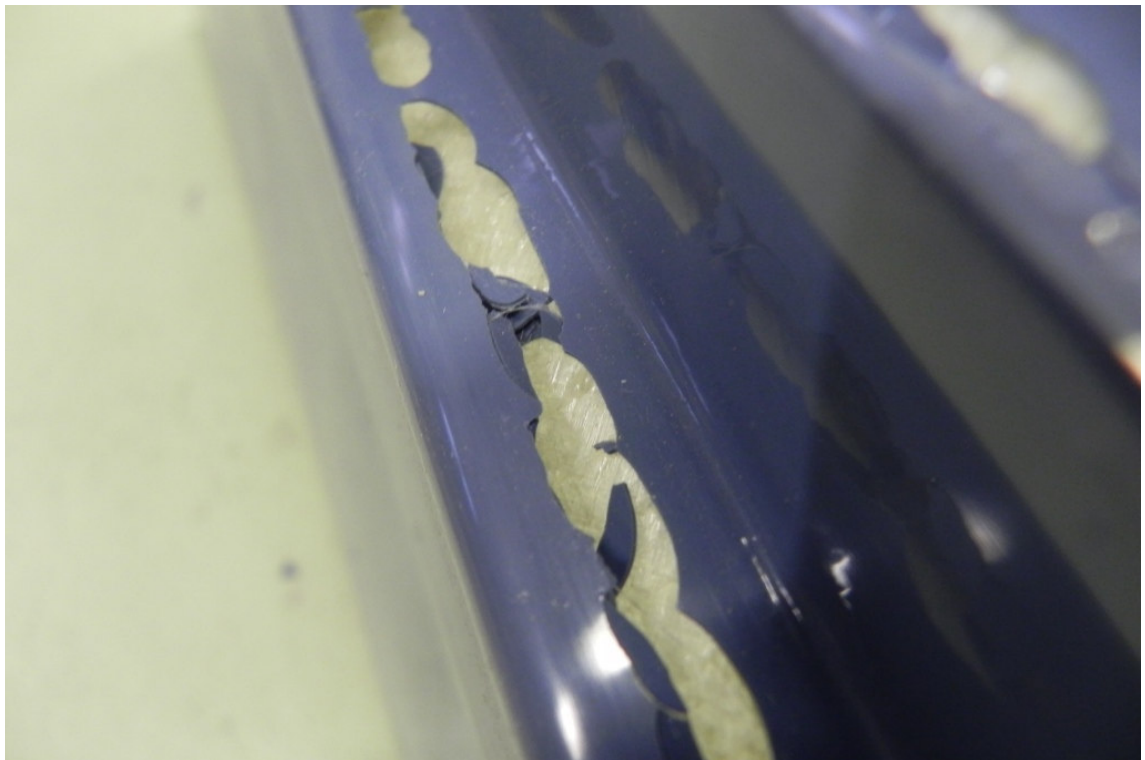
Z hlediska pozorování infuze zvenčí, došlo k plnému zaplnění. Avšak po vyndání výrobku s formy a sundání pomocných materiálů lze vidět nedostatečně zaplněná místa. Tyto místa jdou vidět z nepohledové strany výrobku. Prázdná místa (vzduchové kapsy) jsou i mezi povrchovou pohledovou vrstvou a výztuží. Vyskytují se převážně v hranách výrobku. Téměř se opakují stejné vady jako na výrobku 5.

Stejně jako na předešlém výrobku 5, lze pozorovat i tady opačný případ a to přebytek materiálu pryskyřice. Tyto přebytky negativně ovlivňují spotřebu materiálu a hmotnost výrobku. Nejvíce jsou tyto přebytky způsobeny nesprávným založením tkaniny Peel-Ply. Tato tkanina nebyla dobře založena v rozích a proto v těchto místech po odtržení tkaniny vznikají přebytky.

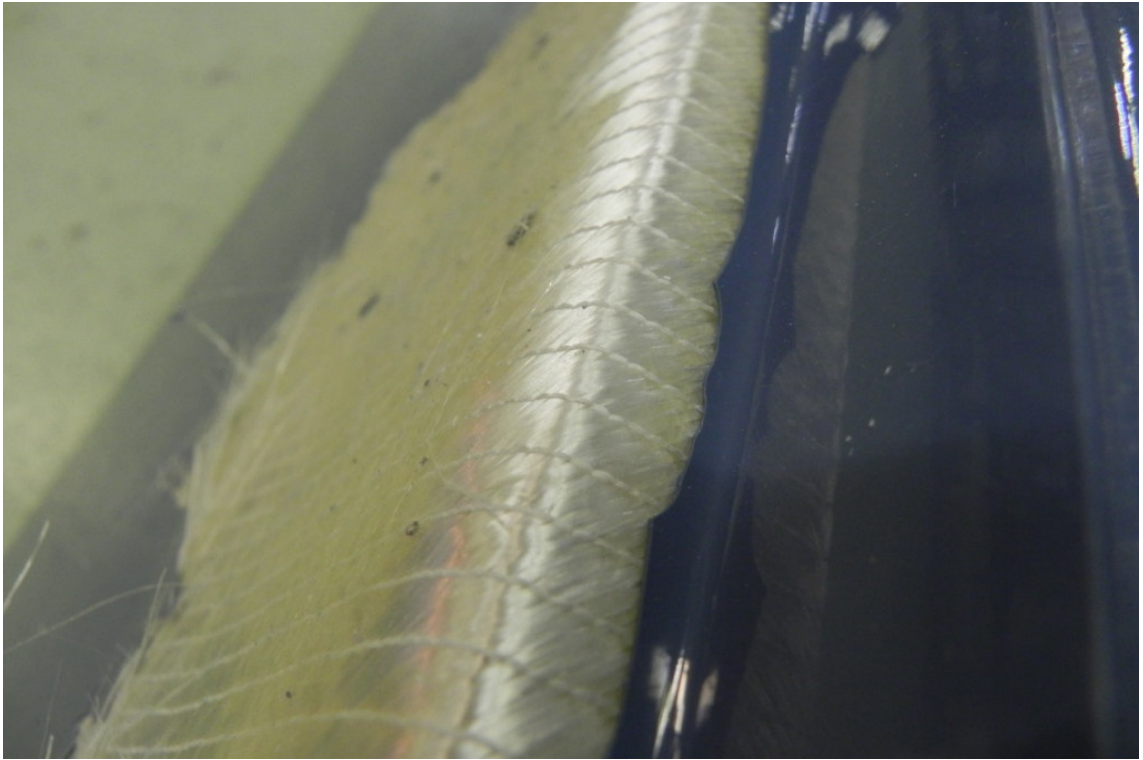
Po prozkoumání povrchu výrobku bylo zjištěno, že jeho hrany výztuž nevyplňuje dokonale. Je potřeba při příštím založení tkaniny dbát na větší důslednost. Celkově je na výrobcích 5 a 6 vidět nedostatečné prosycení struktury (výztuže) pryskyřicí. To se projevuje, i když je Gel Time nastaven na více než 20 minut. Tento čas je však nežádoucí z hlediska efektivity využití času. Zároveň nepomohl k dokonalému prosycení výztuže. Z tohoto důvodu je předpoklad zkusit další výrobek opět s Polyesterovou pryskyřicí AROPOL Polyesterová G105E, která se svými vlastnostmi přibližuje pryskyřici vhodné pro vakuovou infuzi (zejména díky hustotě).



Obr. 77: Detail prosycení pryskyřicí pouze pod Resintrakem



Obr. 78: Detail vzduchových kapes



Obr. 79: Detail neprosycené hrany výrobku

## 5.7 Vzorek 7

Vzorek č. 7	
Skladba	1-1/2-1/2-1
Počet vyztuž. vrstev	2
Materiál vyztuž. vrstev	SAERfix UP ±45° 950g/m <sup>2</sup>
Sandwich	ANO
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resintrak	materiál 5 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	AROPOL Polyesterová G105E 4kg
Tvrdidlo	BUTANOX 2 %
infúze 100%	ANO
infúze 100% [min]	6:00

Tab. 7: Sendvičová konstrukce vzorek č.7

### Změny a očekávání

Změna nástřihového plánu po šířce (hrany, rohy a boky založeny zvlášť), délkový rozměr rozdělen na 4/4 a 3/3 zachován.

Sendvič byl použit a to: COREMAT XM 2mm a KOREK 2mm.

Při zakládání hran a rohů je změna v postupu. Rohy a hrany jsou založeny před položením středové největší plochy.

Resintrak stejný jako u vzorku 6.

Změna pryskyřice na hořlavou AROPOL Polyesterová G105E

Největší změnou je změna zpět na Polyesterovou pryskyřici AROPOL G105E. Tato pryskyřice má menší hustotu tzn. Měla by lépe zatéct do všech míst a předpokládá se, že prostoupí celou strukturou výztuží a sendvičových materiálů. Byly zvoleny opět dva typy

materiálů sendviče. Tato volba zkoumá odlišnosti v zatečení, prostoupení vrstvami pryskyřicí.

Také byl zvolen jiný nástřihový plán, čemuž se očekává plné vyplnění hran a rohů výztuží. Díky tomu, by se neměly vytvářet vzduchové kapsy.

### **Volba materiálů**

- Výztuž: SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>
- Sendvič: ANO – COREMAT XM 2mm a KOREK 2mm.
- Pomocné materiály jsou stejné jako v předchozím případě.
- Pryskyřice: AROPOL Polyesterová G105E 4kg
- Tužidlo BUTANOX 2 %

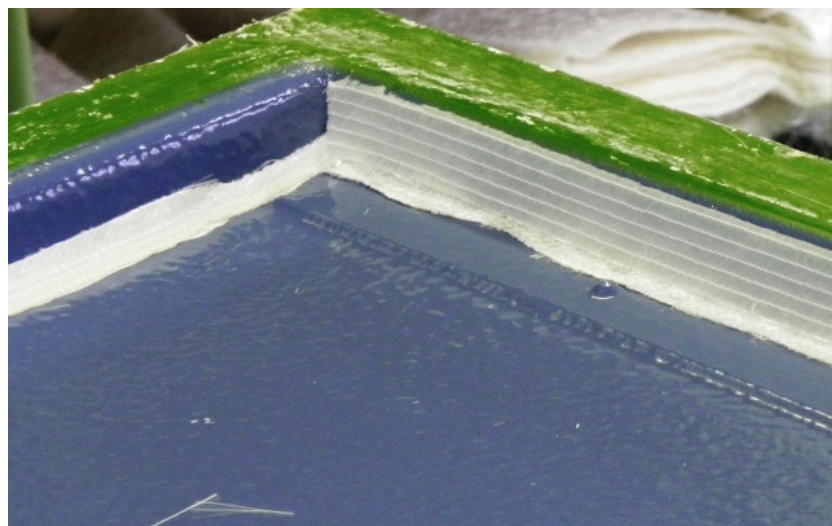
### **Postup výroby**

- Nejprve byly založeny hrany a rohy (znázorňují obr. 70 a obr. 71)
- Poté položena výztuž na střední plochu výrobku obr. 72.
- Hrany zakládány samostatně (obr. 73) pro lepší založení a zamezení vzniku vzduchových komor mezi výztuží a povrchem výrobku (gelcoatem).
- Rozvodná tkanina rozstříhnuta (obr. 74), pro lepší založení do hran výrobku, zamezí se tak zbytečným přebytkům pryskyřice





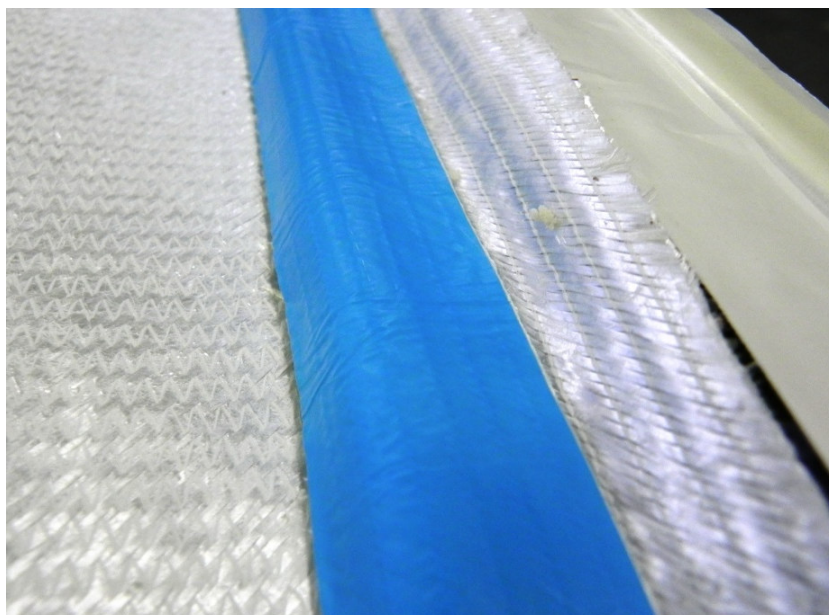
Obr. 80: Založení hran a rohů



Obr. 81: Detail založení hran a rohů

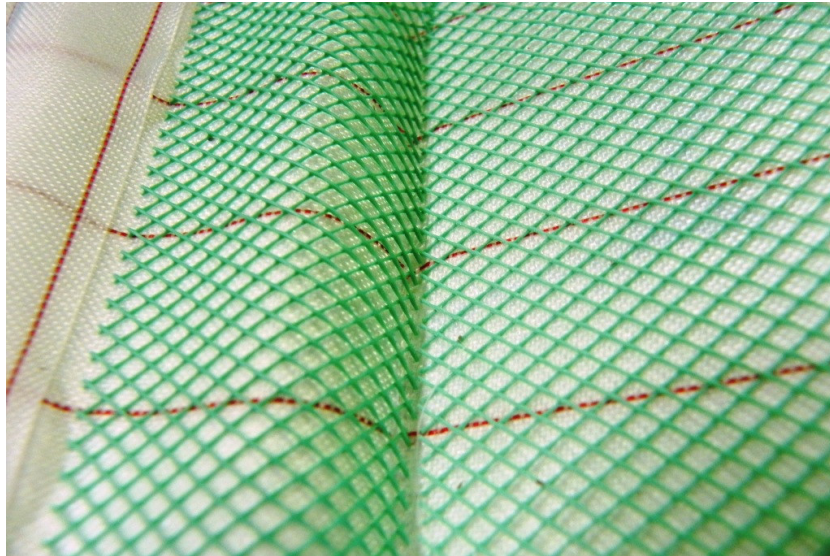


Obr. 82: Modrá střední část plochy výrobku položena po založení rohů

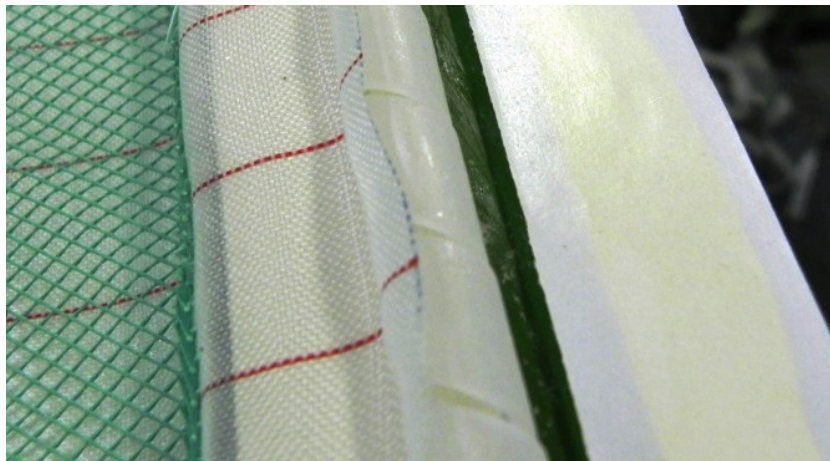


Obr. 83: Detail založení hran a rohů





Obr. 84: Detail založení rozvodné tkaniny na hraně



Obr. 85: Detail okraje formy s pomocnými materiály

### Zhodnocení

Z hlediska pozorování infuze zvenčí, došlo k plnému zaplnění. Po vyndání výrobku s formy a odstranění pomocných materiálů, nebyly nalezeny nezatečená místa, nebo vzduchové kapsy pod pohledovým povrchem výrobku. Tuto skutečnost nejvíce ovlivňují vlastnosti pryskyřice a to její hustota. Fakt, že nejsou vzduchové kapsy pod povrchem výrobku, je i dokonalejší založení hran a rohů samostatně.

Vrstvy se pokládaly z hlediska náročnosti velmi dobře. Je však třeba brát v úvahu složitost nástřihového plánu, který byl díky mnoha střihům časově náročný.

Obě poloviny jak se sendvičem COREMAT XM 2mm, tak KORKEM 2mm byly prosyceny velmi dobře a záleží pouze na rozhodnutí, jaký sendvič použít. Nadále však zůstává prioritně použít sendvič z PVC pěny.



Zůstává problém s přebytkem pryskyřice v rozích. Nejsou tak výrazné jako v předchozích případech, ale i nadále mají tyto přebytky vliv na zvýšení hmotnosti výrobku, větší spotřebu materiálu. To vede i ke zvýšení ceny.

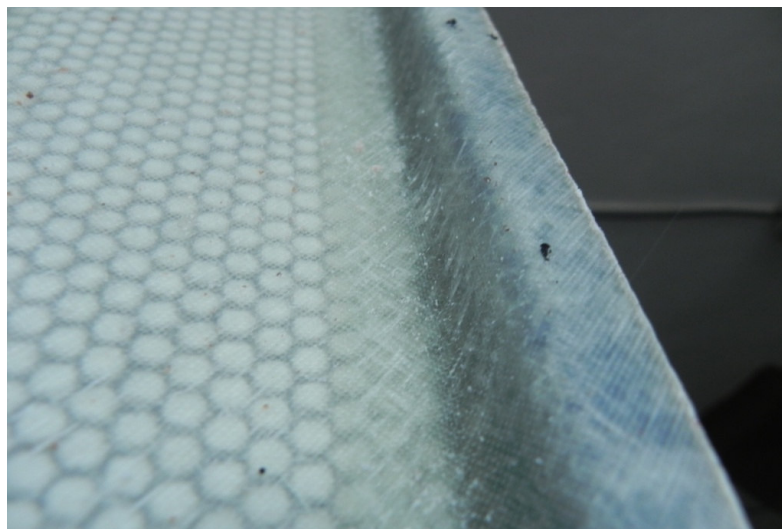
Pro další výrobek je potřeba použít jako sendvič pěnu PVC.



Obr. 86: Pohledová strana výrobku



Obr. 87: Nepohledová strana výrobku



Obr. 88: Detail hrany výrobku bez přebytku

## 5.8 Vzorek 8

Vzorek č. 8	
Skladba	1-1-1
Počet vyztuž. vrstev	2
Materiál vyztuž. vrstev	SAERfix UP ±45° 950g/m <sup>2</sup>
Sandwich	ANO
Peel - Ply	materiál 1 ks
Greenflow	materiál 1 ks
Resintrak	materiál 5 ks
Vakuovací folie	materiál 1 ks
Pryskyřice	AROPOL Polyesterová G105E 4kg
Tvrdidlo	BUTANOX 2 %
infúze 100%	ANO
infúze 100% [min]	6:00

Tab. 8: Sendvičová konstrukce vzorek č.8

### Příprava

#### Změny a očekávání

- Změna nástřihového plánu po šířce, délkový rozměr rozdělen na 4/4 a 3/3 zachován.
- Změna sendvičového materiálu z (COREMAT XM 2mm a KOREK 2mm) na pěnové PVC Herex C 70.55, tl. 5 mm. 1800 x 200 x 5mm. V sendvičové PVC pěně vytvořen rastr 20 x20mm děr špendlíkem o Ø1mm. Sendvič na délku vystředěn od okrajů 100mm.
- Resintrak stejný jako u vzorku 7.
- Pryskyřice ponechána Polyesterová AROPOL G105E.

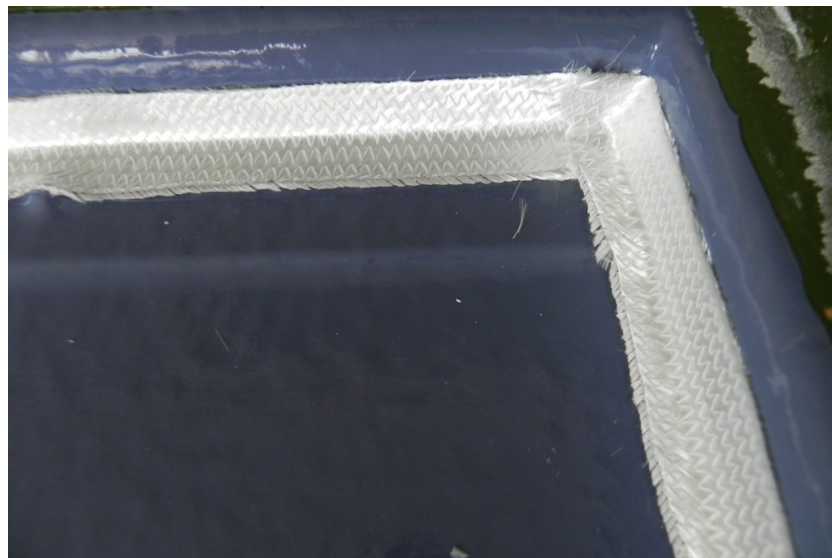
Vzhledem k tomu, že u výrobku 7 se podařil infuzní proces a u výrobku 8 se parametry liší nepatrně, je předpokládán úspěšný infuzní proces. Největší změna je, že byl opět použitý pěnový sendvič z PVC namísto COREMAT XM 2mm a KOREK 2mm.

### Volba materiálů

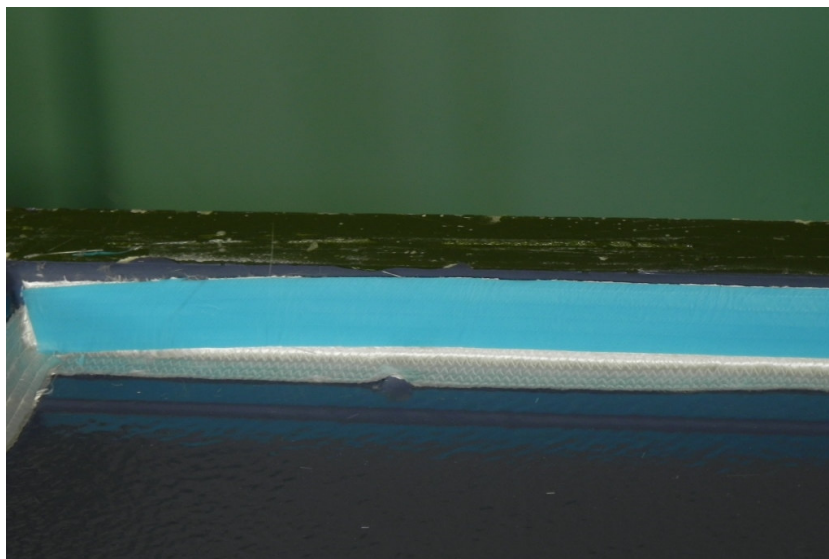
- Výztuž: SAERfix UP  $\pm 45^\circ$  950g/m<sup>2</sup>
- Sendvič: ANO - PVC Herex C 70.55, tl. 5 mm. 1800 x 200 x 5mm
- Pomocné materiály jsou stejné jako v předchozím případě.
- Pryskyřice: AROPOL Polyesterová G105E 4kg
- Tužidlo BUTANOX 2 %

### Postup výroby

- Postup pokládání výztuží, založení rohů a hran je stejný jako u vzorku č.7.
- Nejdůležitější změnou oproti vzorku č.7. je změna sendvičového materiálu na pěnový PVC. Umístění sendviče je na obr. 82, 83.
- Instalace pomocných materiálů je stejná se vzorkem č.7.



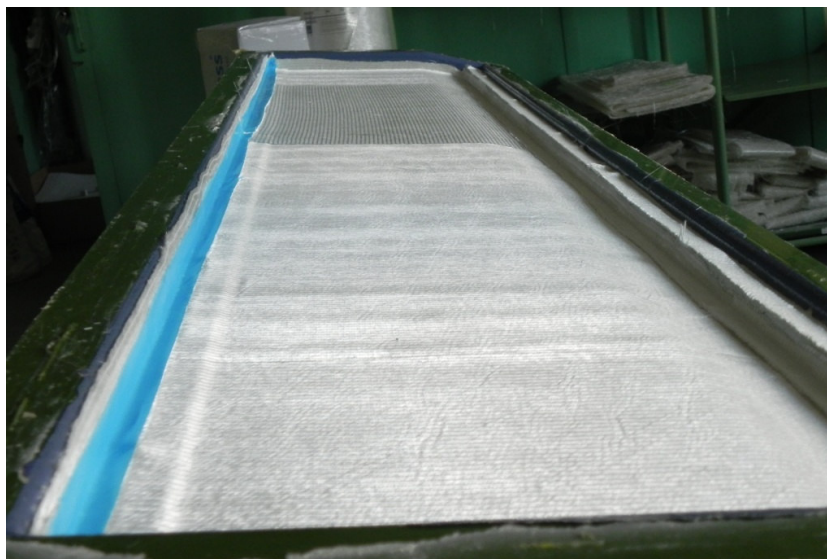
Obr. 89: Detail založení hran a rohů



Obr. 90: Detail založení hran a rohů

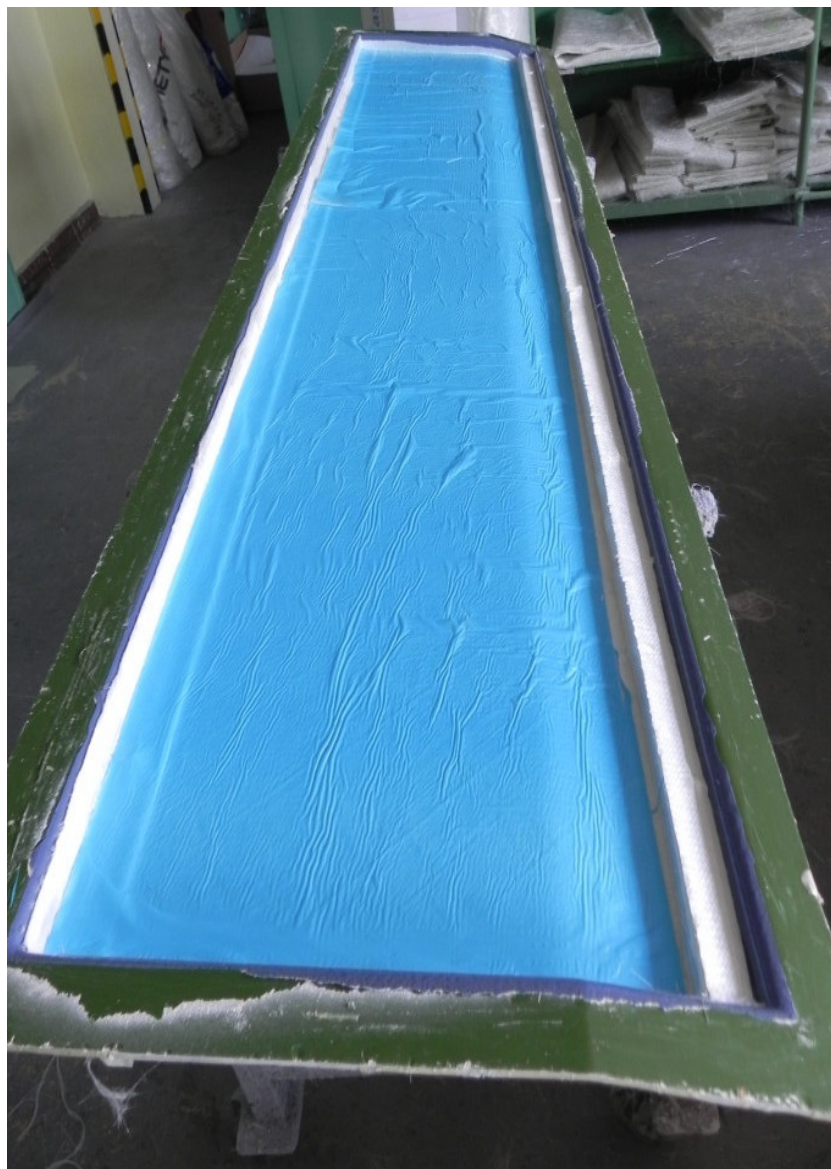


Obr. 91: Detail založení hran a rohů

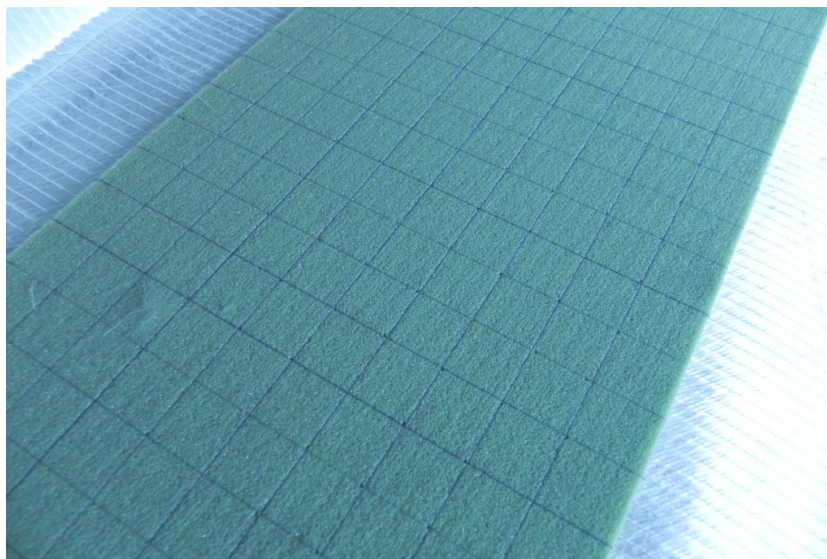


Obr. 92: Složení hran a rohů celé vrstvy výztuže

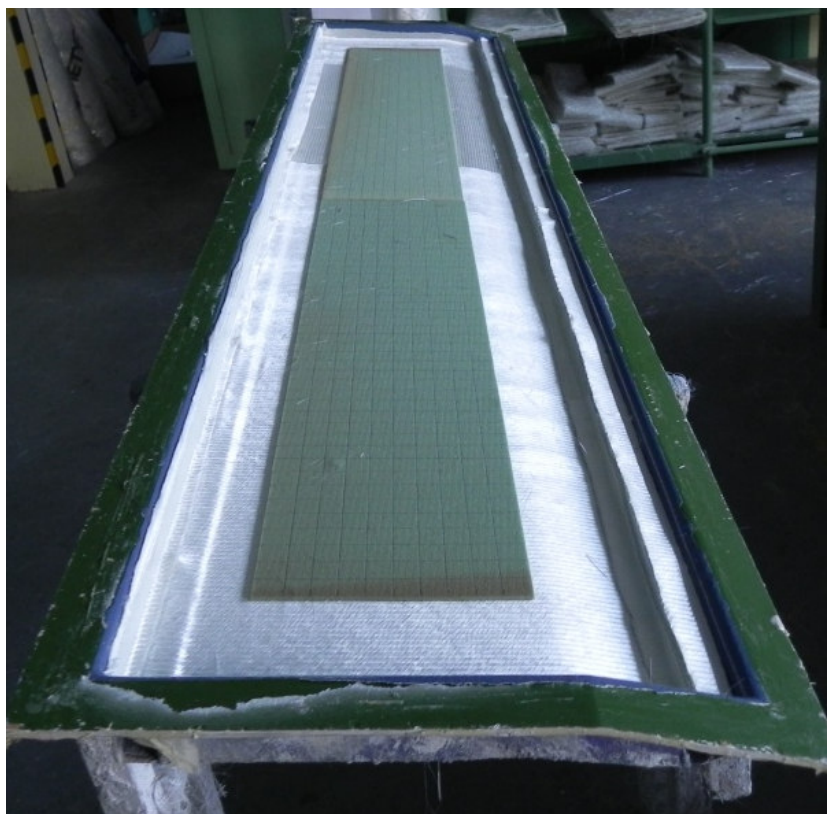




Obr. 93: Založení první vrstvy (bílá část vrstvy založena první, modrá část vrstvy založena jako druhá)

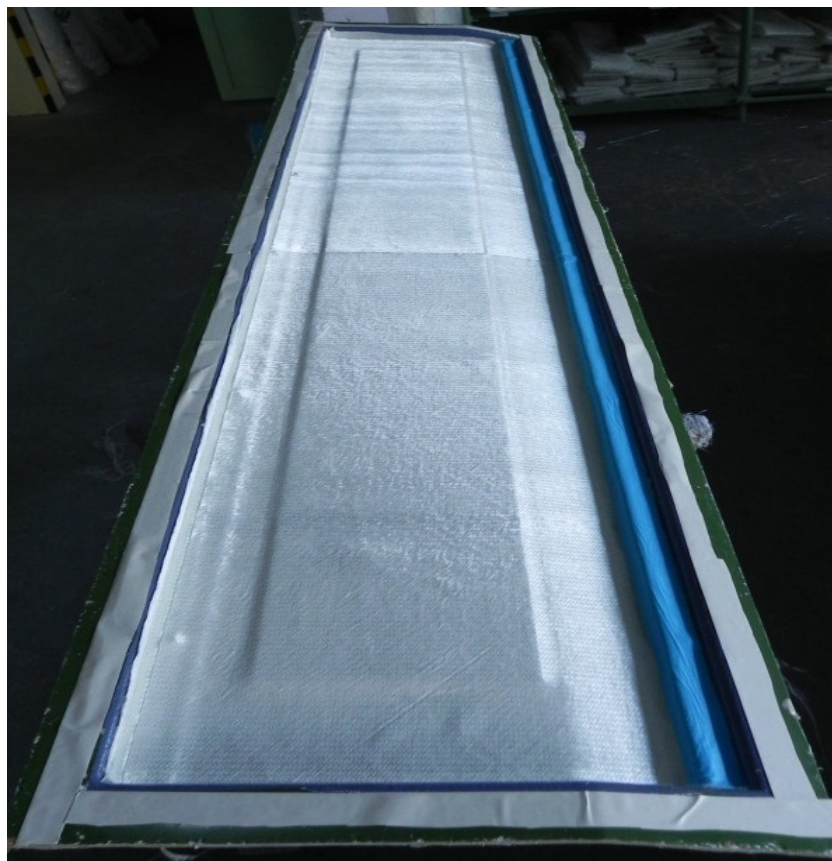


Obr. 94: Detail pěnového PVC sendviče se zakreslenou sítí děr

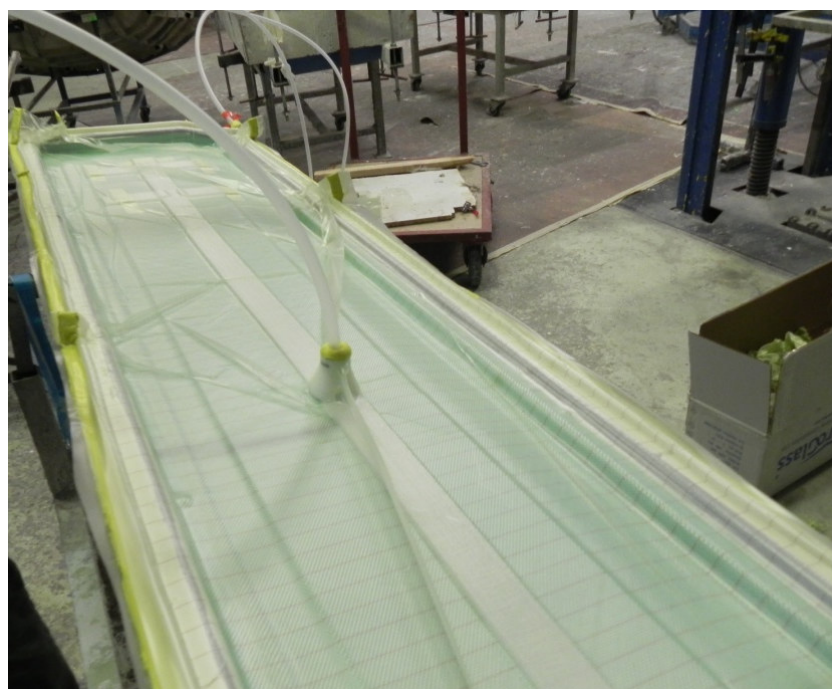


Obr. 95: Celkový pohled na první vrstvu výztuže se sendvičem





Obr. 96: Celkový pohled na dvě vrstvy výztuže se sendvičem



Obr. 97: Detail na výrobku pod vakuem

**Zhodnocení**



Z hlediska pozorování infuze zvenčí, došlo k plnému zaplnění. Po vyndání výrobku s formy a odstranění pomocných materiálů, nebyly nalezeny nezatečená místa, nebo vzduchové kapsy pod pohledovým povrchem výrobku. Tuto skutečnost nejvíce ovlivňují vlastnosti pryskyřice a to její hustota. Fakt, že nejsou vzduchové kapsy pod povrchem výrobku, je i dokonalejší založení hran a rohů samostatně. U tohoto posledního výrobku byl zvolen originální způsob založení rohů. Ten vznikl na základě diskuze o předešlých vzorcích. Bylo třeba 100% zajistit, aby výztuž vyplňovala hrany a rohy výrobku, zároveň byly hrany a rohy počtem vrstev výztuže zpevněny.

Vrstvy se pokládaly z hlediska náročnosti velmi dobře. Je však třeba brát v úvahu opět složitost nástřihového plánu, který byl díky mnoha stříhům časově náročný. Pro tolik dílů nástřihového plánu by bylo lepší zvolit automatickou řezačku, která daný nástřihový plán řeže dle CAD dat. Řezačku jsme nepoužili, jelikož řezací nástroj (hrot) nebyl dostatečně ostrý. To vede ke značným komplikacím s automatickým řezáním nástřihového plánu. Celý výrobek s pěnovým PVC sendvičem byl prosycen velmi dobře. Nadále však zůstává problém s přebytkem pryskyřice v rozích. Nejsou tak výrazné jako v předchozích případech. Ale i nadále mají tyto přebytky vliv na zvýšení hmotnosti výrobku, větší spotřebu materiálu. To vede i ke zvýšení ceny výrobku. Pro porovnání je potřeba však uvést, že váha výrobku vyrobeného pomocí vakuové infuze je 3,58kg oproti 5,5kg při výrobě ručním laminováním.

### **Ekonomické zhodnocení**

U posledního výrobku jsme provedli ekonomické zhodnocení výroby pomocí technologie vakuové infuze pod pružnou folií. Rozepsané ceny jednotlivých materiálů výrobku a pomocných materiálů jsou uvedeny v tabulkách (tab. 9 , 10). Tyto ceny nezahrnují:

- Přímé náklady 180 Kč
- Režijní náklady 800 Kč
- Údržba náradí a forem 40Kč

Tyto náklady jsou převzaty z kalkulace výrobku pro ruční laminování od firmy Form s.r.o. a je nutné je připočíst k celkové ceně za pomocné a výrobní materiály. Je však nutno podotknout, že náklady na zaměstnance, čili přímé náklady, byly v případě výroby technologií vakuové infuze větší a to z toho důvodu kvalifikovanější pracovní síly a popřípadě i délky výroby. Celková cena výrobku při takto stanovených cenách je 2007 Kč.

VÝROBEK	Množství	Jednotky	Cena [Kč]
Výztuž-SAERfix UP $\pm 45^\circ$ 950g/m <sup>2</sup>	2	[m <sup>2</sup> ]	180
Sendvič-PVC pěna	1,8x0,2x0,005	[m]	50
Pryskyřice-DION Nehořlavá Polyesterová FR850-M850	3	[kg]	150
Tužidlo-BUTANOX 2 %	60	[ml]	6
Gelcoat	1	[m <sup>2</sup> ]	126
Cena celkem			<b>512</b>

Tab. 9: Ceny materiálů pro výrobek

POMOCNÉ MATERIÁLY	Množství	Jednotky	Cena [Kč]
Odtrhová tkanina Peel-Ply	2,2x0,5	[m <sup>2</sup> ]	30
Rozvodná tkanina Greenflow 75	2,2x0,5	[m <sup>2</sup> ]	40
Hadice plná	4	[m]	20
Hadice spirálová	5	[m]	50
Airhold 10 CBS	5	[m]	30
Těsnící páska AT-200Y	5,2	[m]	65
Vakuování folie	1,5	[m <sup>2</sup> ]	40
Cena celkem			<b>275</b>
Konektor RIC	1	ks	80
Kolínko T	1	ks	30
Kolínko L	3	ks	90
Cena celkem			<b>200</b>

Tab. 10: Ceny pomocných materiálů



Obr. 98: Pohledová strana výrobku



Obr. 99: Nepohledová strana výrobku



Obr. 100: Detail nepohledové strany výrobku

## ZÁVĚR

Ve světě je už několik let známá technologie výroby kompozitních konstrukcí využívající rozdíl tlaků pod názvem vakuová infuze. Spočívá v infuzi pryskyřičné směsi skrz předem připravenou sklovýztuž uloženou ve formě. Pryskyřice je distribuována pomocí speciálních pomocných materiálů ukládaných na povrchu výztuže. Tato pomocná distribuční „médiá“ jsou pomocí separačních fólií nebo materiálů od výrobku po vytvrzení odstraněna. Technologie vakuové infuze je kromě jiných níže zmíněných výhod využívána hlavně v oblasti výroby velkoplošných a silnostěnných výrobků. Je to hlavně kvůli nemožnosti ruční laminace velkých výrobků z důvodů prostorových omezení, nebo pro neekonomickou a náročnou výrobu horní části formy v případě uplatnění jiné technologie jako je ruční laminace: RTM nebo RTM-Light. (Např. v lodním průmyslu se často vyrábí z jedné formy jenom jeden originál). Dle odborníků z oblasti kompozitů patří proces vakuové infuze v tomto oboru k nejkomplicovanějším. Pozitivní výsledky jsou však velmi povzbudivé a rozdíl mezi výrobky ručně laminovanými a výrobky z vakuové infuze je významný, ať už v parametru obsahu dutin nebo v parametru celkové hmotnosti výrobku. Podíl dutin ve výrobku je snížen na minimum a závisí na kvalitě zavakuování formy.

U prvního výrobku vyrobeného technologií vakuové infuze jsem se seznámili s postupem této technologie a zaměřili jsme se na základní středovou část výrobku s pěnovým PVC sendvičem, bez bočních okrajů, protože vyrobit celý výrobek napoprvé je velmi komplikované a složité.

U druhého výrobku jsme zaměnili standardní skelnou tkaninu za skelnou samolepící tkaninu Saerfix. Lepící složka v této tkanině je kompatibilní s epoxidovými i polyesterovými pryskyřicemi. Samolepící tkanina zvyšuje komfort práce při zakládání jednotlivých vrstev a přispívá k lepšímu pracovnímu prostředí pracovníků. Tuto tkaninu jsme zkoušeli řezat na řezačce, docházelo však ke shrnování tkaniny a jejího ochranného filmu, což je pro zakládání do formy nežádoucí. Proto jsme při výrobě dalších výrobků řezali samolepící tkaninu Saerfix ručně.

U třetího výrobku jsme změnili sendvičové jádro z pěnového PVC na Coremat XM 2mm a zároveň jsme zaměnili polyesterovou AROPOL G105E pryskyřici na samozhášivou pryskyřici Dion FR850-M850. Sendvičové jádro bylo použito na polovině výrobku, druhá polovina byla bez sendvičového jádra. Tímto jsme simulovali zatečení samozhášivé pryskyřice vyznačující se vyšší viskozitou, přes strukturu kompozitu se sendvičovým já-

drem a bez sendvičového jádra. Třetí vzorek byl vyrobený celý a ne jen jeho středová část jako při předcházejících výrobcích. Při této infuzi nedošlo ke 100% prosycení tkaniny pryskyřicí. Možným vysvětlením je špatná volba pomocných materiálů – krátký resintrak. Protože aplikace kompozitních materiálů v dopravním průmyslu, musí splňovat náročné normy na samozhášivost, jsme zvolili tento typ samozhášivé pryskyřice DION FR850-M850, který je široce využíván při technologii ručního laminování.

U čtvrtého výrobku nebylo použité sendvičové jádro a prioritně zůstalo zachovat samozhášivou pryskyřici DION FR850-M850 při zvětšené délce resintraku, avšak ani tato výroba nebyla úspěšná.

U pátého výrobku jsme zvětšili středový resintrak a přidali čtyři boční větve. Došlo ke 100% zaplnění, avšak po odformování výrobku z formy, byly na pohledové straně vidět suchá místa-místa kde nedošlo k dostatečnému prosycení pryskyřicí. Tyto místa se prioritně vyskytovaly v hranách výrobku.

U šestého výrobku jsme se opět vrátili k výrobě se sendvičovým jádrem Coremat XM 2mm. V tomto případě došlo ke 100% zaplnění, avšak po odformování výrobku bylo zjištěno, že hrany výrobku výztuž dokonale nevyplňuje. Tento typ samozhášivé pryskyřice DION FR850-M850 není vhodná pro vakuovou infuzi, ačkoliv má vynikající výsledky při ručním laminování. Pro vakuovou infuzi se nám neosvědčila z důvodu vysoké viskozity (1400-1800mPa.s). Proto jsme se při následujících výrobcích zaměřili na polyesterovou pryskyřici AROPOL G105E s viskozitou (180mPa.s).

U sedmého výrobku jsme využili všechny poznatky z předcházejících infuzí, struktura kompozitu byla na polovině výrobku jádro typu Coremat XM 2mm a na druhé polovině výrobku korek 2mm, pryskyřice polyesterová AROPOL G105E z výše uvedených důvodů. Z důvodu abychom předešli nedostatečnému zatečení pryskyřice v hranách výrobku jsme změnilí nástřihový plán pro samostatné založení hran a rohů. Došlo ke 100% zaplnění dutiny formy a taktéž jsme nepozorovali nezatečená místa v hranách a rozích.

Při posledním výrobku jsme změnilí typ sendvičového jádra na pěnové PVC vzhledem k jeho rozšířenému použití v kolejovém průmyslu a jeho příznivé ceně. Celý výrobek s pěnovým PVC sendvičem byl prosycen velmi dobře, bez viditelných suchých míst a jiných pohledových defektů na pohledové straně výrobku. Technologie vakuové infuze se zejména využívá v malosériové výrobě velkoplošných výrobků. Zvládnutí však této technologie je velmi náročné, avšak její implementace mezi současné výroby kompozitních

materiálů v české republice nahradí doposud používané technologie neekologické a s menšími kvalitativními parametry. V porovnání s prepreg technologiemi a technologiemi využívajícími dotvrzení v autoklávu je vakuová infuze méně nákladná.

U osmého posledního výrobku jsme provedli ekonomické zhodnocení technologie výroby vakuovou infuzí pod pružnou folií. Celková cena pro tuto technologii výroby je 2007 Kč, což je více oproti technologii ručního laminování používané k výrobě tohoto střešního krycího panelu ve firmě Form s.r.o. Cena za výrobu pomocí ručního laminování je 1893 Kč. Musíme však dodat, že technologie vakuové infuze je výhodná především pro výrobu velkoplošných výrobků. Jelikož jsme neměli zkušenosti s touto výrobou, museli jsem první zkušenosti získat na menším výrobku z levnějších materiálů, jak z důvodu časové náročnosti, tak především k ceně všech materiálů. Při výrobě velkoplošných výrobků, se poměr nákladů na pomocné materiály a materiály výrobku (výztuže, sendviče, pryskyřice, tužidla) výrazně zvýší. Je to dáno také tím, že při výrobě velkoplošných výrobků pomocí vakuové infuze se používá epoxidová pryskyřice, která je mnohonásobně i pětkrát dražší, než polyesterová pryskyřice.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Praha 1 : SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1988. 328 s. [2] MACHEK, Václav; SODOMKA, Jaromír . *Polymery a kompozity s polymerní matricí : Nauka o materiálu. 4. část*. Vyd. 1. . Praha : České vysoké učení technické, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03297-4.
- [2] MACHEK, Václav; SODOMKA, Jaromír . *Polymery a kompozity s polymerní matricí : Nauka o materiálu. 4. část*. Vyd. 1. . Praha : České vysoké učení technické, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03297-4.
- [3] *Ime.fme.vutbr.cz* [online]. c2011 [cit. 2010-12-11].Kompozitní materiály. Dostupné z WWW:<<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/11-BUM.ppt>>
- [4] *Delta.fme.vutbr.cz* [online]. c2011 [cit. 2011-01-11].Definice a základní přehled kompozitních materiálů. Dostupné z WWW: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>>
- [5] *S stefanmichna.com* [online]. c2007 [cit. 2011-01-11].Kompozitní materiály. Dostupné z WWW: <[http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy\\_II/kompozitni\\_materialy.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf)>
- [6] *Csm-kompozity.wz.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-03-20]. Infuzní technologie výroby kompozitů a jejich simulace v MKP. Dostupné z WWW: <[http://www.csm-kompozity.wz.cz/Infuze\\_VZLU.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Infuze_VZLU.pdf)>
- [7] *Wikipedia.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-19].Sendvič. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D\\_\(lamin%C3%A1t\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D_(lamin%C3%A1t))>
- [8] *Wikipedia.com* [online]. c2011 [cit. 2011-06-11].Kompozitní materiál. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D\\_\(lamin%C3%A1t\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D_(lamin%C3%A1t))>
- [9] *Mendelu.cz* [online]. c2011 [cit. 2011-05-25]. Úvod do kompozitních materiálů. Dostupné z WWW: [http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta\\_1.doc](http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta_1.doc)
- [10] *Volny.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-05-22].Technologie výroby kompozitu. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>>

- [11] *Mmspektrum.com* [online]. c2011 [cit. 2011-03-17].Sendvičové konstrukce. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>>
- [12] *Gurit.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-17].Guide to Composites. Dostupné z WWW:<[http://www.gurit.com/files/documents/Gurit\\_Guide\\_to\\_Composites\(1\).pdf](http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites(1).pdf)>
- [23] *Energy.sandia.gov* [online]. c2011 [cit. 2011-01-12].Wind Turbine Blades. Dostupné z WWW: <<http://windpower.sandia.gov/2009Reliability/PDFs/Day2-09-StephenNolet.pdf>>
- [14] *Volny.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-07-23].Historie. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>>
- [35] *Volny.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-06-4].Vlakna pro kompozity. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>
- [46] FORM s.r.o, Form. *Sendvičové materiály*. Interní prezentace
- [17] *Diabgroup.com* [online]. c2011 [cit. 2011-06-14].Core Infusion. Dostupné z WWW: <[http://www.diabgroup.com/global\\_brochures/DIAB\\_Infusion\\_Brochure.pdf](http://www.diabgroup.com/global_brochures/DIAB_Infusion_Brochure.pdf)>
- [18] *Polyworx.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-21].RTM Simulation theory. Dostupné z WWW: <<http://www.polyworx.com>>
- [19] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha : Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [20] *Hexcel.com* [online]. c2011 [cit. 2011-05-14]. Infuzní technologie výroby kompozitů a jejich simulace v MKP. Dostupné z WWW: <<http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Rail.pdf>>
- [25] *339.vsb.cz* [online]. c2011 [cit. 2011-06-18].Nauka o materiálu. Dostupné z WWW: <[http://www.339.vsb.cz/nauka\\_o\\_materialu/Slide13\\_Polymery.pdf](http://www.339.vsb.cz/nauka_o_materialu/Slide13_Polymery.pdf)>
- [22] *Projekty.studioflorian.com* [online]. c2011 [cit. 2011-06-18].Kompozitní materiály. Dostupné z WWW: <<http://projekty.studioflorian.com/materialy/41.pdf>>
- [23] *Airtech.lu* [online]. c2011 [cit. 2011-08-11].Catalogue Airtech. Dostupné z WWW: <<http://catalogue.airtech.lu/index.php?lang=EN>>



- [24] *Volny.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-04-11].Lamináty. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/laminaty.pdf>>
- [25] *Compositesintransport.com* [online]. c2005 [cit. 2011-07-13].New Sandwich Material Concepts. Dostupné z WWW: <<http://www.compositesintransport.com/pdfs/composit/cluster%2010/presentations/Presentation%20-%20New%20Material%20Concepts%20-%20KULeuven.pdf>>
- [26] *Mendelu.cz* [online]. c2011 [cit. 2011-06-28]. Úvod do kompozitních materiálů. Dostupné z WWW: [http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta\\_1.doc](http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta_1.doc)
- [27] *Mendelu.cz* [online]. c2011 [cit. 2011-07-09]. Mechanika vláknových kompozitů. Dostupné z WWW: <[http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta\\_4.doc](http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta_4.doc)>
- [28] *Diabgroup.com* [online]. c2011 [cit. 2011-03-18].Sandwich Concept. Dostupné z WWW:<[http://www.diabgroup.com/europe/literature/e\\_pdf\\_files/man\\_pdf/sandwich\\_hb.pdf](http://www.diabgroup.com/europe/literature/e_pdf_files/man_pdf/sandwich_hb.pdf)>
- [29] *Fibreglast.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-17].Vacuum Infusion. Dostupné z WWW:<<http://cdn.fibreglast.com/downloads/vacuuminfusion.pdf>>
- [30] *Havel-composites.com* [online]. c2011 [cit. 2011-05-15].Technologie. Dostupné z WWW:<<http://www.havel-composites.com/clanky/0-/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

t	Tloušťka stěny	[m]
l	Velikosti buňky	[m]
$\rho_s$	Hustota polymeru v pevné fázi	$\text{kg/m}^3$
$\rho$	Hustota pěny	$\text{kg/m}^3$
$E_s$	Modul pružnosti kompaktního polymeru	[MPa]
E	Modul pružnosti polymerní pěny	[MPa]
Q	Objemový průtok	$[\text{m}^3/\text{s}]$
A	Plocha	$[\text{m}^2]$
$\eta$	Viskozita	[Pa.s]
L	Délka	[m]
$\Delta p$	Tlakový spád	[Pa]
K	Permeabilita výztuže	[m/s]
PVC	Polyvinylchlorid	
PS	Polystyren	
PUR	Polyurethan	
SAN	Styreneacrylonitril	
PUR	Polyurethan	
PET	Polyethylentereftalat	
PEI	Polyetherimid	
VFI	Vacuum Foil Infusion	
RTM	Resin Transfer Moulding	
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding	
RIC	Resin Infusion Connector	
UP	Polyesterová pryskyřice	
VE	Vinylesterová pryskyřice	

GF

Greenflow

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Synergické chování složek kompozitu. ....	13
Obr. 2: Tahový diagram křehké matrice a kompozitu. ....	13
Obr. 3: Jevy na rozhraní matrice a výztuhy .....	14
Obr. 4: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže .....	14
Obr. 5: A - Sendvičový panel, B - vnější vrstvy, C – jádro .....	17
Obr. 6: Porovnání pevnosti v ohybu a tuhosti .....	19
Obr. 7: Zatížení sendvičové konstrukce na ohyb.....	20
Obr. 8: Balsové jádro .....	21
Obr. 9: Struktura kompozitní sendvičové konstrukce .....	22
Obr. 10: a) Voština z aramidu(Kevlar®), b) Voština z PP, c) Voština z Hliníku.....	22
Obr. 11: Voština a) Honeycomb, b)Skládaná voština .....	22
Obr. 12: Pěny .....	23
Obr. 13: a) Honeycomb, b) pěna s Otevřenými buňkami, c) pěna s Uzavřenými buňkami .....	24
Obr. 14: Sendvičová struktura střechy autobusu .....	28
Obr. 15: Pagani Zonda – Velké využití sendvičových pevnostních struktur. a laminátových krycích panelů.....	28
Obr. 16: North American XB-70 in Flight EC68-2131 .....	28
Obr. 17: Využití Sendvičových a laminátových struktur ve vlaku od firmy HEXEL.....	29
Obr. 18: a) Plátňová vazba, b) Košíková vazba, c) Keprová vazba, d) Atlasová vazba.....	31
Obr. 19: Technologie Stříkáním .....	32
Obr. 20: Technologie ručního laminování.....	33
Obr. 21: Schéma Vakuové infuze pod pružnou folií .....	34
Obr. 22: Technologie Pultruze.....	36
Obr. 23: Technologie RTM – Vstřikování podporované vakuem do uzavřené formy.....	37
Obr. 24: Autokláv .....	39
Obr. 25: Schéma simulace v simulačním softwaru MKP .....	41
Obr. 26: Umístění vtoku podél hrany .....	42
Obr. 27: Umístění vtoku po obvodu .....	43
Obr. 28: Umístění vtoku ve středu.....	43
Obr. 29: Vytvořená síť na daném výrobku .....	44
Obr. 30: Základní vstupní data .....	45

Obr. 31: Schéma Vakuové infuze pod pružnou folií .....	47
Obr. 32: Pohled na odtahovou tkaninu - Peel-Ply .....	49
Obr. 33: Druhy rozvodných tkanin firmy AIRTECH.....	50
Obr. 34: Resin Track.....	51
Obr. 35: Těsnící páska AT-200Y .....	51
Obr. 36: a) Přívodní hadice pryskyřice, b) Spirálová hadice.....	52
Obr. 37: Konektor pro napojení pryskyřice do systému infuze.....	52
Obr. 38: Vákuum Foil.....	53
Obr. 39: Fixační lepidlo AIRTAC 2 .....	53
Obr. 40: Vakuová pumpa.....	54
Obr. 41: Rezervoár pryskyřice Airtech RB451 .....	54
Obr. 42: Měřidlo podtlaku .....	55
Obr. 43 Rozměry 3D Cad modelu z Catia V5 .....	56
Obr. 44: Nástřík povrchové vrstvy GELCOAT .....	59
Obr. 45: Skelná tkanina: Glass fabric 204g/m <sup>2</sup> -plein RT 200 .....	59
Obr. 46: První vrstva výztuže .....	61
Obr. 47: Položení krajní části výztuže .....	61
Obr. 48: První a druhá vrstva výztuže .....	62
Obr. 49: Sendvičové jádro mezi 2 a 3 vrstvou.....	62
Obr. 50: Pohled na sendvičové jádro a třetí vrstvu výztuže .....	63
Obr. 51: Nalepení oboustranné lepicí pásky AIRHOLD 10 CBS .....	64
Obr. 52: Napojení „T“ kolínka a přichycení spirálové hadice.....	64
Obr. 53: Položení vrstvy odtahové tkaniny Peel-Ply .....	65
Obr. 54: Vrstva rozvodné tkaniny GF, Resin Track, Konektor napojení pryskyřice .....	65
Obr. 55: Pomocné materiály .....	66
Obr. 56: Vakuovací folie přilepená těsnící páskou.....	67
Obr. 57: RIC konektor napojený na vákuum.....	67
Obr. 58: Celkový pohled na zavakuovaný výrobek.....	68
Obr. 59: Nepohledová strana výrobku .....	69
Obr. 60: Pohledová strana výrobku .....	70
Obr. 61: Detail přetoků pryskyřice v hranách výrobku .....	70
Obr. 62: Vrstva výztuže v jednom muse po celé šířce.....	72
Obr. 63: Položen sendvič ( <i>vlevo</i> ), položena 2 vrstva ( <i>vpravo</i> ).....	73

Obr. 64: Nepohledová strana výrobku .....	76
Obr. 65: Pohledová strana výrobku .....	76
Obr. 66: Detail sendviče .....	77
Obr. 67: Pohled na formu s gelcoatem .....	79
Obr. 68: Detail poloviny výrobku (vlevo se sendvičem, vpravo bez sendviče) .....	79
Obr. 69: Nesymetrické umístění konektoru napojení .....	81
Obr. 70: Vrstva rozdělena na 3/3 .....	83
Obr. 71: Celkový pohled na zavakuovaný výrobek.....	85
Obr. 72: Detail napojení na rezervoár „T“ kolínkem v rohu formy .....	85
Obr. 73: Resin Track jedné poloviny výrobku s pomocnými větvemi.....	88
Obr. 74: Detail neúspěšné infuze pryskyřice .....	90
Obr. 75: Detail polovin výrobku se sendvičem (vlevo) a bez sendviče (vpravo).....	92
Obr. 76: Detail rozvodné tkaniny položené vcelku .....	93
Obr. 77: Detail prosycení pryskyřicí pouze pod Resin Trackem.....	94
Obr. 78: Detail vzduchových kapes .....	94
Obr. 79: Detail neprosycené hrany výrobku .....	95
Obr. 80: Založení hran a rohů .....	98
Obr. 81: Detail založení hran a rohů .....	98
Obr. 82: Modrá střední část plochy výrobku položena po založení rohů .....	99
Obr. 83: Detail založení hran a rohů .....	99
Obr. 84: Detail založení rozvodné tkaniny na hraně .....	100
Obr. 85: Detail okraje formy s pomocnými materiály .....	100
Obr. 86: Pohledová strana výrobku .....	101
Obr. 87: Nepohledová strana výrobku .....	101
Obr. 88: Detail hrany výrobku bez přebytku .....	101
Obr. 89: Detail založení hran a rohů .....	103
Obr. 90: Detail založení hran a rohů .....	104
Obr. 91: Detail založení hran a rohů .....	104
Obr. 92: Zložení hran a rohů celé vrstvy výztuže .....	105
Obr. 93: Založení první vrstvy (bílá část vrstvy založena první, modrá část vrstvy založena jako druhá).....	106
Obr. 94: Detail pěnového PVC sendviče se zakreslenou sítí děr.....	107
Obr. 95: Celkový pohled na první vrstvu výztuže se sendvičem.....	107

---

Obr. 96: Celkový pohled na dvě vrstvy výztuže se sendvičem .....	108
Obr. 97: Detail na výrobku pod vakuem.....	108
Obr. 98: Pohledová strana výrobku .....	110
Obr. 99: Nepohledová strana výrobku.....	111
Obr. 100: Detail nepohledové strany výrobku.....	111

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1: Sendvičová konstrukce vzorek č.1 .....	58
Tab. 2: Sendvičová konstrukce vzorek č.2 .....	71
Tab. 3: Sendvičová konstrukce vzorek č.3 .....	78
Tab. 4: Sendvičová konstrukce vzorek č.4 .....	82
Tab. 5: Sendvičová konstrukce vzorek č.5 .....	87
Tab. 6: Sendvičová konstrukce vzorek č.6 .....	91
Tab. 7: Sendvičová konstrukce vzorek č.7 .....	96
Tab. 8: Sendvičová konstrukce vzorek č.8 .....	102
Tab. 9: Ceny materiálů pro výrobek .....	110
Tab. 10: Ceny pomocných materiálů .....	110