

Experimentální studie vakuové technologie a její možnost pro výrobu profilovaného dílu

Bc. Radek Januš

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Januš**
Osobní číslo: **T13523**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Experimentální studie vakuové technologie a její možnost pro výrobu profilovaného dílu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární studii na dané téma
2. Návrh experimentu
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení a diskuse provedeného experimentu



Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.
2. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Pra-ha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
3. BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
4. DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
5. ING. ZDENĚK KOŘÍNEK, CSc. Kompozity [online]. Icit. 2013-01-30I. Dostup-né z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>

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

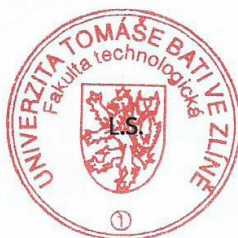
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Radek Januš

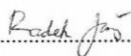
Obor: Výrobní inženýrství

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 11.5.2015


.....

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

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

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k 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.

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

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

³⁾ 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). Odpirá-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 popisuje experimentální výrobu profilovaného kompozitního materiálu s polymerní matricí a skelnou výztuží. Jako výrobní technologie byla použita vakuová infuze pod pružnou folií. Teoretická část se zabývá vakuovými technologiemi a jejich principy, technologickými parametry a kompozitními profily vyrobených pultruzí. Praktická část dokumentuje výrobou profilovaného kompozitního materiálu vakuovou technologií.

Klíčová slova: vakuové technologie, kompozitní profily, pultruze

ABSTRACT

This bachelor thesis describes experimental production composite materials with ribs. As a manufacturing technology has been used vacuum foil infusion technology. The theoretical section describes vacuum technology and their principles, technological parameters and composite profiles produced by technology pultrusion. The practical part documenting production of ribbed composite.

Keywords: vacuum technology, ribs, pultrusion

Chtěl bych poděkovat za čas, rady a připomínky svému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D., a Ing. Vladimíru Rusnákovi za pomoc s výrobou vzorků, která proběhla ve firmě FORM s.r.o., kde celá praktická část proběhla. Dále děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za rady při ohybovém testování vzorků.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 VAKUOVÉ TECHNOLOGIE A JEJICH PRINCIP	11
1.1 VAKUOVÉ TECHNOLOGIE	11
1.1.1 VFI – Vakuová technologie pod pružnou folií	11
1.1.2 RFI – Resin film infusion.....	12
1.1.3 Light RTM	13
1.1.4 Lisování prepregů.....	14
1.2 PRINCIP VAKUOVÝCH TECHNOLOGIÍ.....	15
1.3 POPIS A VÝZNAM VAKUA.....	17
1.4 VADY PŘI VAKUOVÝCH TECHNOLOGIÍ	18
1.4.1 Dírky a důlky „pit and pinholes“	19
1.4.2 Pórovitost „Porosity“	19
1.4.3 Delaminace.....	20
1.4.4 Velké/malé množství pryskyřice.....	20
1.4.5 Zvlnění výztuže	20
2 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY A VYBAVENÍ PRO APLIKACI VAKUOVÝCH TECHNOLOGIÍ	22
2.1 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY	22
2.1.1 Viskozita pryskyřice.....	22
2.1.2 Pórovitost / propustnost výztuže	22
2.1.3 Tlakový rozdíl	23
2.1.4 Toková vzdálenost	23
2.1.5 Doba gelace	23
2.2 VYBAVENÍ PRO APLIKACI VAKUOVÝCH TECHNOLOGIÍ.....	23
2.2.1 Vývěvy	23
2.2.1.1 Mechanická vývěva – pístové.....	24
2.2.1.2 Mechanická vývěva – rotační	25
2.2.1.3 Vývěva hybnostní – kapalinová.....	25
2.2.2 Přepadová nádoba	26
2.2.3 Regulátor vakua / Vakuometr	27
2.2.4 Injekční zařízení	27
2.2.5 Pomocné materiály.....	28
2.2.5.1 Vakuovací folie	28
2.2.5.2 Odsávací rohož	29
2.2.5.3 Distribuční medium	29
2.2.5.4 Odtrhová tkanina.....	29
3 KOMPOZITNÍ PROFILY, VÝROBNÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE	31
3.1 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH PROFILŮ	31
3.2 APLIKACE KOMPOZITNÍCH PROFILŮ.....	31
3.2.1 Antikorozní a chemický průmysl	31
3.2.2 Automobilový průmysl	32
3.2.3 Elektrická izolace	32
3.2.4 Průmyslové budovy.....	33

3.2.5	Sport a volný čas	33
3.2.6	Úprava vody	33
3.3	ROZDĚLENÍ PROFILŮ.....	34
3.4	BIMODULÁRNÍ OHYB PRUTŮ VYZTUŽENÝCH DLOUHÝMI VLÁKNY	35
3.5	PULTRUZE	36
3.5.1	Použití pultruze	38
II	PRAKTICKÁ ČÁST	40
4	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	41
5	EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VÝROBY ŽEBROVANÝCH VÝROBKŮ POMOCÍ VAKUOVÉ INFUZE POD PRUŽNOU FOLIÍ.....	42
5.1	VÝROBA LICHOBĚŽNÍKOVÉHO PROFILU S PET PĚNOU.....	43
5.2	„I“ PROFIL	49
5.2.1	Vzorek 1	50
5.2.2	Vzorek 2	55
5.3	„U“ PROFIL.....	59
5.4	DUTÝ PROFIL.....	64
6	TESTOVÁNÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	70
6.1	VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI A ÚNOSNOSTI	71
6.1.1	Tuhost.....	71
6.1.2	Únosnost.....	72
6.2	TESTOVÁNÍ „U“ PROFILU	72
6.3	TESTOVÁNÍ „I“ PROFILU	74
6.4	TESTOVÁNÍ DUTÉHO PROFILU	76
6.5	TESTOVÁNÍ PROFILU S PET PĚNOU.....	77
6.6	TESTOVÁNÍ TĚLÍSKA 20x3,5x100MM.....	79
6.7	ZHODNOCENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ	81
7	APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ VYZTUŽENÝMI PROFILY V PRAXI	83
	ZÁVĚR	84
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	86
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ	89
	SEZNAM TABULEK.....	92
	SEZNAM PŘÍLOH.....	93

ÚVOD

Kompozitní výrobky jsou stále více využívány v praxi. Jejich výborné mechanické a fyzikální vlastnosti nám dovolují je používat v různých náročných aplikacích, kde není možné použít tradiční materiály jako např. ocel. Dnes se kompozitní materiály používají v chemickém průmyslu, vodohospodářství, automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu apod. Používáním kompozitních materiálů dochází k potřebě zvyšovat jejich mechanické vlastnosti tak, aby bylo možné je použít i v náročných konstrukčních aplikacích.

Tato diplomová práce se konkrétně zabývá zvyšováním tuhosti materiálu pomocí žebrování. V dnešní době se výztužné žebra na kompozitní materiály stále často lepí, protože některé starší výrobní technologie neumožní vyrobit tak složité díly. Lepení výztužných žebor je z hlediska času a peněz dost náročná, a tak se hledají nové alternativní postupy, které by toto nevýhodné lepení nahradilo. V praktické části se tedy zabývám výrobou žebrovaného kompozitního materiálu, který je vyroben v jednom výrobním cyklu a odpadá tak nutnost lepení. Jako výrobní technologie byla zvolena vakuová infuze pod pružnou folii a celý výrobní proces proběhl ve firmě FORM s.r.o, která má mnoho zkušeností s danou technologií. Experimentální část diplomové práce je primárně zaměřena na postup výroby již zmiňovanou technologií.

Teoretická část se zabývá popisem vakuových technologií, které lze použít na výrobu žebrovaného kompozitního dílu, jejich princip, vady na výrobcích, princip vakua a technologické parametry. Další část se zaměřuje na pomocné materiály při výrobě a rozdělení vývěv. Protože se v praktické části zabývám výrobky vyztuženými profily, v teoretické části je popis vlastností profilů a jejich použití.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VAKUOVÉ TECHNOLOGIE A JEJICH PRINCIP

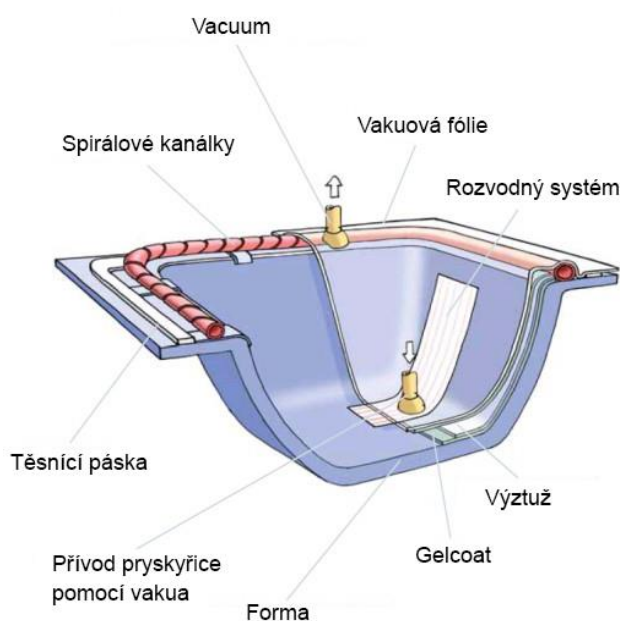
Vakuové technologie jsou procesy výroby kompozitních materiálů, kde získáme přesné výrobky za menších nákladů. K prosycení pryskyřice skrz kladené výztuže ve formě se využívá podtlak z vakuové vývěvy. Díky vytvořenému vakuu ve výsledku dostáváme kompozitní výrobky bez vzduchových bublin, které vznikají např. při ručním laminování, kde snižují pevnost výrobku. Formy jsou uzavřené a většinou dvojdílné. Jako horní část formy se používá i vakuová fólie. Styren, či jiné nebezpečné látky, který vzniká při vytvrzování pryskyřice, se nedostávají skrz uzavřenou formu do prostředí a chrání tak pracovníky. [8]

1.1 Vakuové technologie

Do vakuových technologií řadíme ruční laminování s vakuovým lisováním, vysokotlaké vstřikování pomocí vakua – VARTM, Vakuová technologie pod pružnou folií - VFI, resin film infusion - RFI, light resin transfer moulding - LRTM, lisování prepregů. [1]

1.1.1 VFI – Vakuová technologie pod pružnou folií

Pryskyřice je distribuována do předem vložených suchých výztuží. Vakuová technologie pod pružnou folií využívá podtlak k prosycení výztuží. Na výztuže se pokládají další potřebné technologické vrstvy jako odtrhová tkanina, distribuční vrstva, rozvodné kanálky, těsnící pásky a vakuová folie. Vakuum je aplikováno z formy pomocí kanálku, po obvodu je vakuová folie utěsněna těsnící páskou. [13]



Obr. 1. Vakuová technologie pod pružnou folií [15]

Výhody:

- Vysoká kvalita
- Výroba velkoplošných výrobků
- Vysoká pevnost výrobku

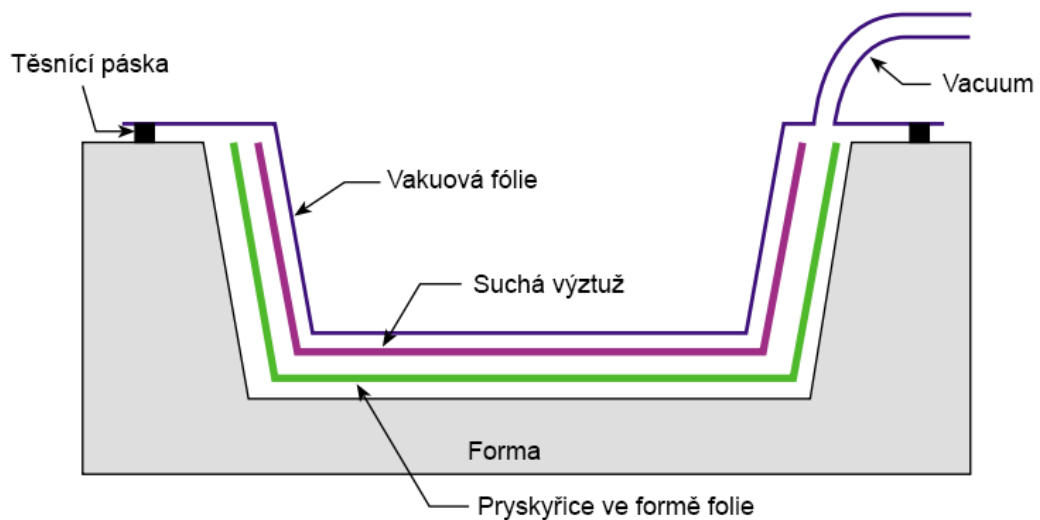
Nevýhody:

- Složitý proces
- Potřeba zkušených pracovníků

VFI se používá k výrobě dílů v lodní dopravě, větrných elektrárnách a dopravním průmyslu.

1.1.2 RFI – Resin film infusion

Proces, při kterém jsou suché vrstvy výztuže prokládány vrstvami pojiv ve formě folie. Zavedením vakua pod folií a ohřevem na vytvrzovací teplotu dojde k roztavení foliového pojiva a jeho infuzi do suchých výztužných vrstev (pohyb pojiva je kolmo vůči ploše výztuže). [16]



Obr. 2. Schéma RFI – Resin film infusion [17]

Výhody:

- Zkrácení doby cyklu
- Zlepšení kvality výrobku
- Nižší cena

Nevýhody:

- Nástroje musí odolávat procesní teplotě pryskyřice (60 – 100 °C)

1.1.3 Light RTM

Light RTM, známý také jako LRTM nebo VARTM. Je to proces, při kterém jsou kompozitní výrobky zhotoveny v uzavřeném systému formy. Forma se skládá z horního a spodního dílu, na které se případně nanáší gelcoat. Na dolní část se ručně kladou výztuže a poté je forma uzavřena horní částí formy, která je flexibilní a umožňuje správné dosednutí pomocí podtlaku. Následně je forma napojena na vývěvu, která vytváří požadovaný podtlak. Mezi jednotlivými díly formy je dutina, které je předem vyplněna suchou kompozitní výztuží. Současně se vznikem podtlaku je pryskyřice skrz injekční zařízení dopravována do dutiny formy a dokonale vyplňuje prostor a prosycuje výztuž. Jakmile je pryskyřice vytvrzena, horní část formy se odformuje a hotový kompozitní výrobek se může vyjmout. Tato metoda se používá hlavně pro sériovou výrobu. [14]

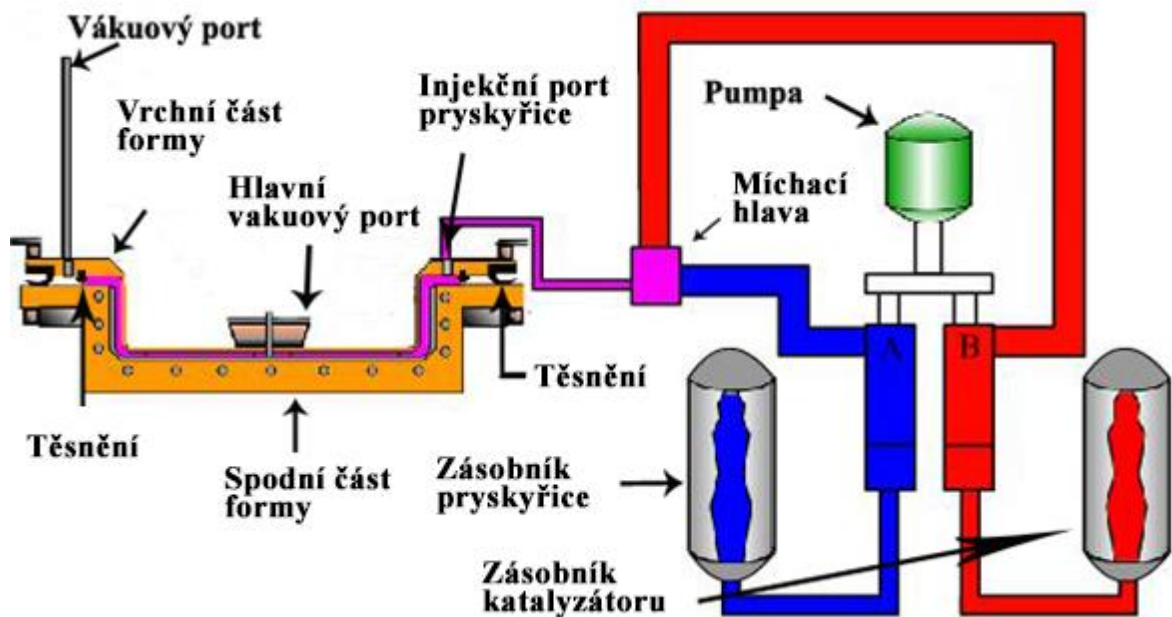
Vyžaduje se, aby výrobek, který chceme vyrobit, byl navržen s ohledem na tento proces. Častou chybou je zkoušet vyrábět kompozitní díly, který byly navrženy pro jinou technologii. Lepší přístup spočívá v posouzení výrobku a jeho případného redesignu. Dojde tím k podstatnému zlepšení produktivity a snížení nákladů. [14]

Výhody:

- Snížení nákladů na pracovní sílu
- Obě strany kompozitního výrobku jsou pohledové
- Rozměrová stabilita
- Řízení procesu
- Jelikož se jedná o uzavřený proces, nedochází k uvolňování nebezpečných emisí do ovzduší

Nevýhody:

- Nižší pevnost výrobků [5], [14]



Obr. 3. Schéma Light RTM [5]

1.1.4 Lisování prepregů

Prepreg je předpřipravený výrobek, který se skládá z vláken a matrice v gelovitém stavu. Matrice je mírně lepivá a tak dokonale ulpí na formě. Po uložení na formu a zavakuování dochází k vytvrzování při teplotě od 100°C v peci, nebo autoklávu. Připojením čerpadla se forma vakuuje a laminát se zbaví vzduchových bublin. Výsledných kompozit tedy vzniká za působení tlaku a tepla. Tyto procesní parametry se volí dle použitého materiálu. Stejně jako u ostatních technologií je potřeba pomocných materiálů jako odtrhová tkanina, separační folie, odsávací rohož a vakuovací folie. Přebytečná pryskyřice se odvádí do zásobníku. [5], [17]

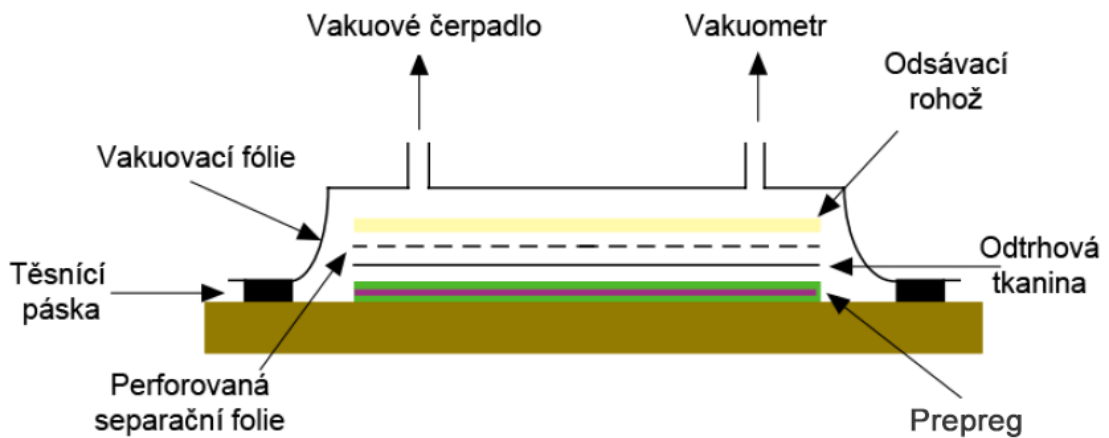
Výhody:

- Vysoká kvalita výrobků a vysoká pevnost
- Nízký obsah vzduchových dutin
- Kontrolovaný proces
- Jedná o uzavřený proces, a tak nedochází k uvolňování nebezpečných emisí do ovzduší

Nevýhody:

- Nutné další technologické zařízení (pec, autokláv)
- Vysoká cena materiál

- Proces je závislý na schopnostech pracovníků [5], [17]

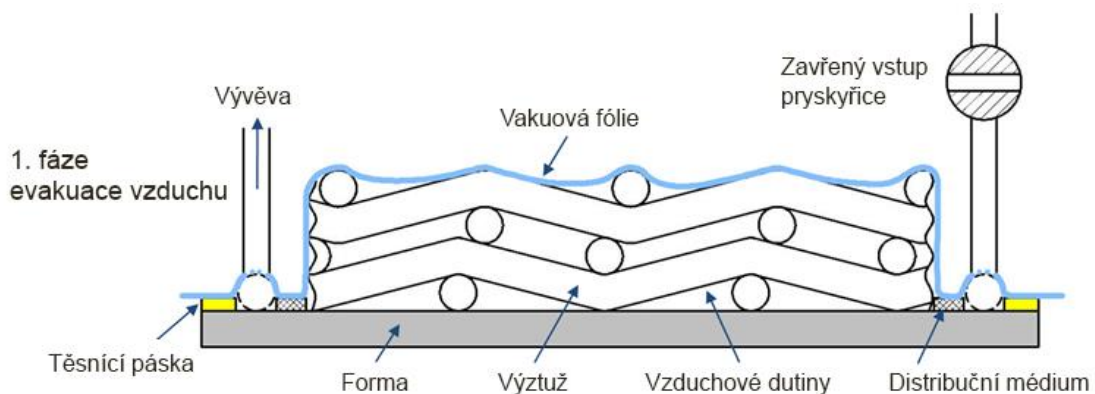


Obr. 4. Schéma lisování prepregů [17]

1.2 Princip vakuových technologií

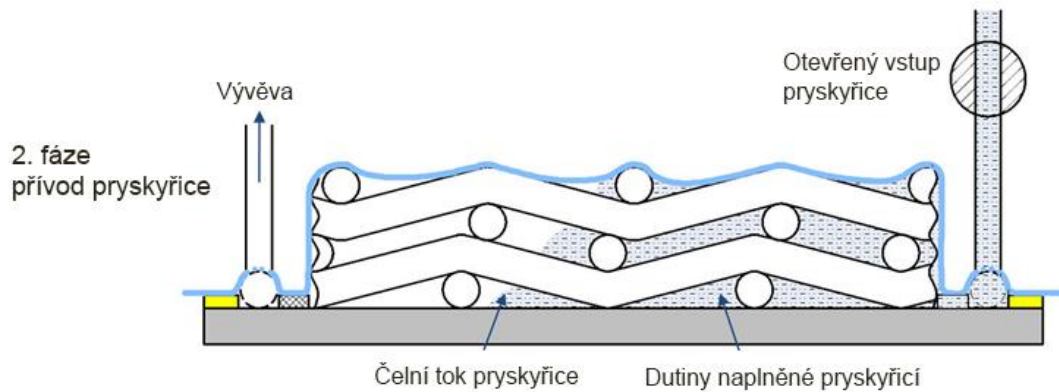
Jako hlavní klíčová součást vakuových technologií je vytvoření vakua před přívodem pryskyřice. Vakuum musíme při procesu stále udržovat a podtlakem přivádět pryskyřici do vtokového místa ve formě. Princip technologie je rozdělen do 4 fází:

V první fázi dochází k evakuaci vzduchu pomocí vývěvy. Vlivem odsávání vzduchu dochází k vytvoření vakua uvnitř utěsněné formy. Hodnota podtlaku se musí pohybovat okolo 1bar a to i po vypnutí vývěvy. [9]



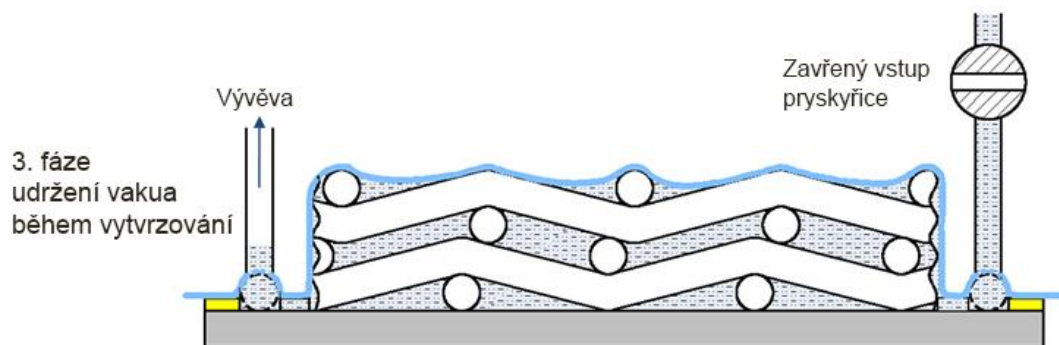
Obr. 5. Fáze evakuace vzduchu [9]

Po vytvoření a zkontrolování vakua nastává přívod pryskyřice pomocí podtlaku přes přívodní trubice. Pryskyřice proudí skrz suché výztuže a zaplňuje formu. Přebytečná pryskyřice odchází do přeřadové nádoby. [9]



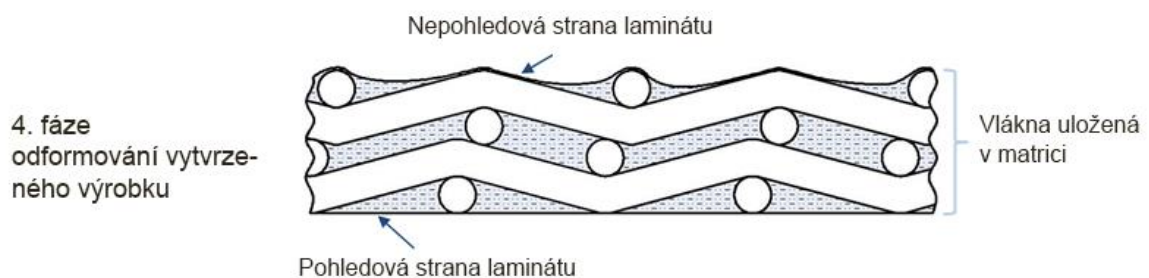
Obr. 6. Fáze přívodu pryskyřice [9]

Při kompletním zaplnění se uzavírá přístup pryskyřice a nastává proces vytvrzování. Při procesu musí být stále udržen pracovní podtlak 1 bar.



Obr. 7. Fáze vytvrzování [9]

V poslední fázi výroby kompozitního výrobku pomocí vakuové technologie je zahrnuto odformování a kontrola hotového výrobku.



Obr. 8. Fáze odformování výrobku [9]

1.3 Popis a význam vakua

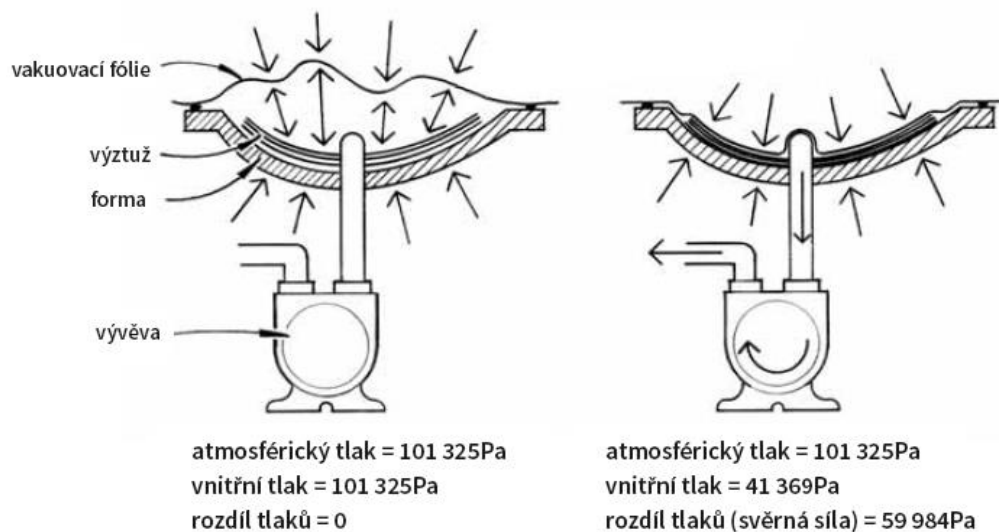
Vakuum znamená prázdný prostor, v kterém je tlak plynu podstatně nižší než při normálním atmosférickém tlaku. K popisu vakua se používají obvyklé jednotky tlaku. Teoretická definice vakua zní: Prostor tak prázdný, jak to je to jen možné. V ideálním případě se za vakuum označuje fyzikální stav, kdy v prostoru není přítomná žádná částice a to ani hmota, tak záření. Prostředkem, kterým získáváme vakuum, je vývěva, kterou lze považovat za otvor o ploše do prostoru s nižším tlakem. [18]

Technologické rozdělení tlaků podle hodnot (rozsahy mají spíše informační charakter):

Tab. 1. Klasifikace tlaků dle hodnot [18]

dokonalé vakuum	0 Pa
extrémně vysoké vakuum	$< 10^{-10}$ Pa
ultravysoké vakuum	$10^{-10} - 10^{-7}$ Pa
vysoké vakuum	$10^{-7} - 10^{-2}$ Pa
nízké vakuum	$10^{-1} - 10^2$ Pa
atmosférický tlak	$101,25 \cdot 10^3$ Pa
zvýšený tlak	do $\sim 3 \cdot 10^6$ Pa
vysoký tlak	do $\sim 4 \cdot 10^7$ Pa
velmi vysoký tlak	do $\sim 5 \cdot 10^8$ Pa
ultravysoký tlak	nad $\sim 5 \cdot 10^8$ Pa

Vakuum drží kompozitní vrstvy pohromadě. Pokud je vakuovací fólie správně utěsněna na formě, tlak na vnější a vnitřní straně je roven přibližně 101 325Pa. Protože vývěva odvádí vzduch z vnitřní strany, tlak uvnitř formy se snižuje, zatímco tlak zvenku zůstává stejný. Atmosférický tlak působí silou na vakuovací fólii a vše uvnitř formy je stlačováno svěrnou silou. Teoreticky, maximální možný tlak, který může působit na výrobek, pokud by došlo k dokonalému vakuu a odstranění veškerého vzduchu z formy je roven atmosférickému tlaku 101 325Pa. Reálný tlak (svěrná síla) je 41 369 – 86 185Pa. [10]



Obr. 9. Tlak před a po aplikaci vakua [10]

Vakuum umožňuje homogenizaci materiálu při jejich výrobě, odstraňuje vzduchové bublinky při přívodu pryskyřice, podporuje proniknutí pryskyřice do celého objemu výztuže a výsledná výztuž je homogennější. [5]

Vakuum zlepšuje kvalitu výrobku

- Lepší poměr matrice/výztuž a tím snižujeme váhu výrobku
- Snižuje obsah dutin v kompozitu
- Zlepšuje povrchovou úpravu výrobků

Urychlení výrobního procesu

- Používáme suchý výrobní proces
- Možnost spojení vícero výrobních kroků do jednoho
- Rozdíl tlaků využíváme na rozvod matrice do výztuží

Používáme uzavřené technologie

- Zlepšuje se hygiena při práci a v pracovním prostředí
- Snižování úniku nebezpečných emisí při výrobě [5]

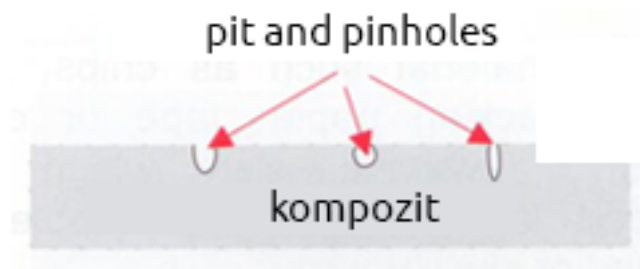
1.4 Vady při vakuových technologiích

Vady v kompozitních výrobcích způsobují různé podněty. Jako zdroje defektů zařazujeme:

- Nesprávný návrh formy, špatně navržená vtoková soustava resp. špatné odvětrání
- Špatná volba materiálu
- Nesprávně uložená výztuž (pohyb výztuže při přívodu pryskyřice)
- Nesprávný tlak/podtlak
- Špatně nastavený, nebo navržený iniciátor vytvrzovací reakce [5]

1.4.1 Dírky a důlky „pit and pinholes“

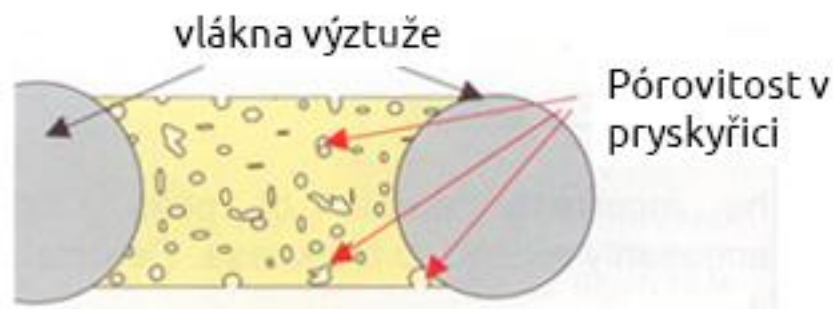
Dírky jsou malé otvory vytvořené ve vytvrzené vrstvě pryskyřice, které snižují pevnost a vzhled kompozitu. Důlek je malý pravidelný nebo nepravidelný kráter na povrchu kompozitu, obvykle se stejnou šířkou a hloubkou. Tento defekt vzniká zejména zachycením vzduchu mezi výztuží a pryskyřicí. [11]



Obr. 10. Pit and pinholes [5]

1.4.2 Pórovitost „Porosity“

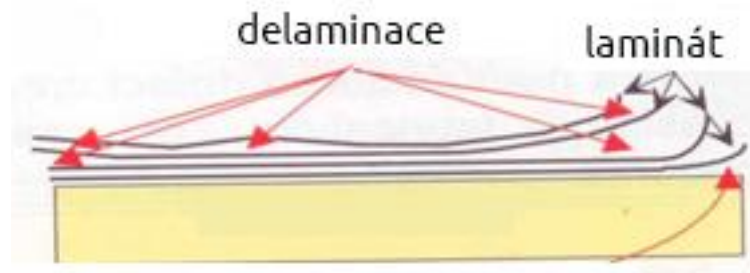
Pórovitost je pojmenování pro přítomnost velkého množství mikroskopických vzduchových dutin, typicky v rozmezí do 10 μ m. Pórovitost může být způsobena přítomností těkavých látek, nebo zachycených plynů (vzduch, vodní pára) uvnitř pryskyřice. I když pórovitost může být považována za normální vlastnost materiálu, může sloužit jako prostor pro difuzi vlhkosti. [12]



Obr. 11. Makroskopický pohled skrz kompozit [5]

1.4.3 Delaminace

Jde o oddělení kompozitních vrstev, může působit místně, ale z větší části působí na velké ploše. Může se objevit až při samotném používání kompozitního výrobku. Delaminaci může způsobit vzduch zachycený mezi vrstvami, neadhezivní příměsi, malé množství pryskyřice nebo neúmyslné použití vlhkého materiálu. Ve většině případů je delaminace způsobena na velké ploše a značně snižuje smykové napětí. [12]



Obr. 12. Delaminace kompozitního výrobku [5]

1.4.4 Velké/malé množství pryskyřice

Místa s vysokým obsahem pryskyřice vychází z použití velkého množství pojiva. Správné lisování může přispět k rovnoměrnému obsahu pryskyřice ve výrobku. Místa, kde naopak pryskyřice chybí, jsou způsobena nedostatečným množstvím použité pryskyřice. Tyto místa jsou náchylná na delaminaci. [12]



Obr. 13. Oblast velkého množství pryskyřice [5]

1.4.5 Zvlnění výztuže

Výsledná mechanické vlastnosti výrobku jsou dány také orientací vláken. Vlnitost vláken v lokalizovaných oblastech často snižuje modul pružnosti. Zvlnění pochází z nevhodného

uložení suchých výztuží ve formě, nebo také špatným umístěním vtokové soustavy, kde poté dohází k pohybu výztuže. [12]



Obr. 14. Zvlnění výztuže [12]

2 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY A VYBAVENÍ PRO APLIKACI VAKUOVÝCH TECHNOLOGIÍ

2.1 Technologické parametry

Existuje několik vakuových technologií pro výrobu kompozitních materiálů, ale u každé z nich chceme dopravit pryskyřici na konečné místo v co nejrychlejším a nejsnadnějším způsobem. [19]

Doba plnění formy pryskyřicí je určena 5 parametry:

- Viskozita pryskyřice
- Pórovitost / propustnost výztuže
- Tlakový rozdíl
- Toková vzdálenost
- Doba gelace

2.1.1 Viskozita pryskyřice

Viskozita je fyzikální veličina, která udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Větší viskozita znamená větší brždění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. [20], [19]

Většina dodavatelů pryskyřice dodávají polyesterové pryskyřice pro infuzní technologie s viskozitou okolo 200 mPa.s. Nízko viskózní směsi nabízejí efektivní řešení s dobrými mechanickými vlastnostmi a odolnosti proti únavě. [19]

Tvorbou vazeb mezi molekulami pryskyřice, katalyzátoru se výchozí tekutá směs mění na pevnou. Při izotermním vytvrzování stoupá viskozita exponenciálně. V případě, že se uvolněné teplo neodvádí, překročí účinek zahřátí zvýšení viskozity způsobené zasítováním, viskozita poklesne a pak rychle stoupne. Tento jev se v praxi používá při ručním kladení, kdy zpočátku mohou vzduchové bubliny uniknout, a může dojít k snadnějšímu prosycení. [1]

2.1.2 Pórovitost / propustnost výztuže

Je důležité, aby pryskyřice plnila formu při stálé rychlosti. Výztuž tedy musí vykazovat stejnou úroveň pórovitosti a propustnosti pro udržení předního toku pryskyřice. Volný prostor mezi vlákny musí být dostatečně velký, aby pryskyřice protekla. Rovné vlákna mají lepší

průtokové vlastnosti než tkané rohože. Náhodně rozptýlené vlákna také poskytují velkou propustnost a to i po stlačení. [19]

2.1.3 Tlakový rozdíl

Ideální vakuum je rovno 101 325Pa. Tohle je maximální tlakový rozdíl, který lze použít. Vakuum je klíčovou složkou vakuových technologií, který podporuje přísun pryskyřice do dutiny formy a stlačuje výztuž svěrnou silou. [19]

2.1.4 Toková vzdálenost

Jedním z největšího problému v infuzních technologiích je toková vzdálenost, kterou musí pryskyřice urazit. Pokud pryskyřice prochází stlačenou výztuží, odpor této výztuže zpomaluje samotný tok pryskyřice. Zkrátit tokovou vzdálenost může pomocí zvýšením vstupů pryskyřice. Jako pomocný materiál pro podporu toku se používá distribuční médium. [19]

2.1.5 Doba gelace

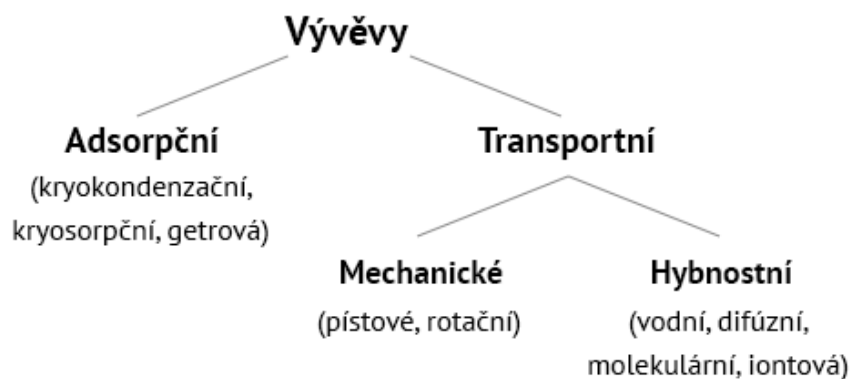
Jelikož se vytvrzením mění kapalná pryskyřice na pevnou hmotu, je jedním ze základních znaků želatínace. Doba gelace (želatínace) je potřebný čas k tomu, kdy nelze tyčinka z reagující pryskyřice vytáhnout. [1]

2.2 Vybavení pro aplikaci vakuových technologií

Pro výrobu pomocí vakuových technologií se používáme pomocné vybavení, které jsou při výrobě kompozitních výrobků nezbytné.

2.2.1 Vývěvy

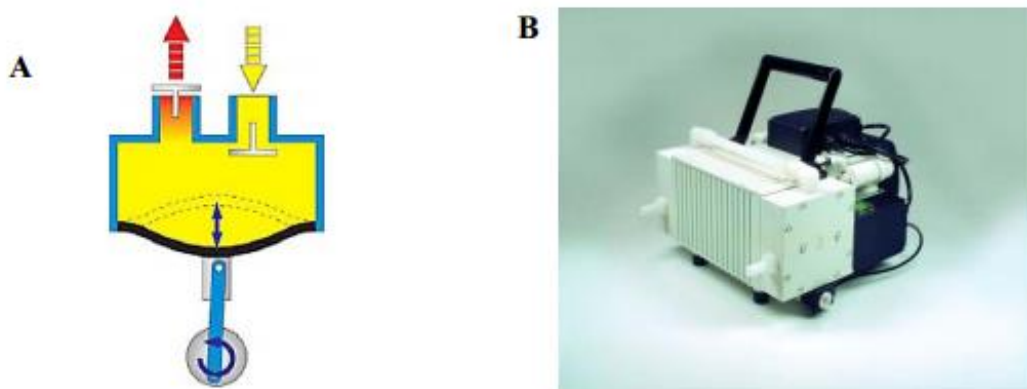
Prostředek, který slouží k získávání vakua. Lze je rozdělit podle způsobu, jakým dosahují snížení tlaku na vývěvy transportní a adsorpční. Transportní vývěvy odčerpávají z evakuovaného prostoru molekuly plynu, které procházejí vývěvou. Adsorpční vývěvy tyto molekuly zachycují uvnitř. Transportní vývěvy se dělí na mechanické a hybnostní. Mechanické dosahují snižování tlaku cyklickou změnou objemu uvnitř vývěvy. Hybnostní vývěvy předávají molekulám čerpaného plynu rychlostní impuls. [18]



Obr. 15. Rozdělení vývěv [18]

2.2.1.1 Mechanická vývěva – pístové

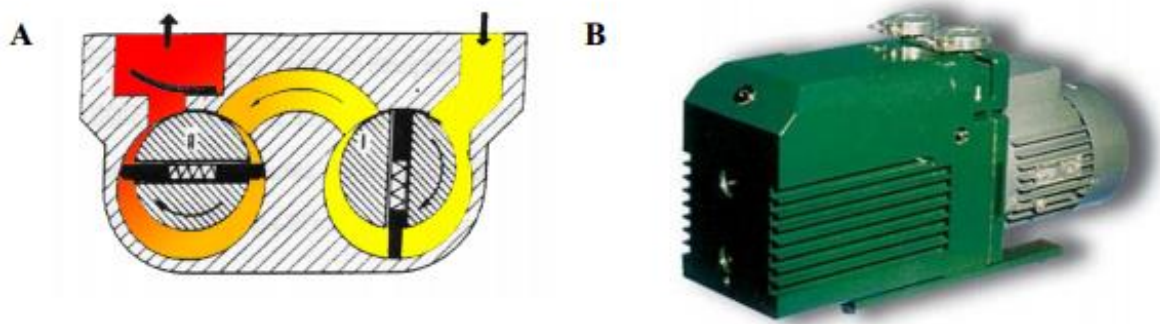
Pístová vývěva pracuje na principu cyklického zvětšování objemu pohybem pístu ve válci. Píst může být tvořen i rtuťovým sloupcem. Moderní pístové vývěvy používají ke své činnosti membránu, která je rozšířená v laboratořích, kde je potřeba dosáhnout nízkého vakua 10^2Pa . Mezní tlak je limitován tlakem při jakém ještě dojde k otevření vstupního ventilu do vývěvy. Tyto vývěvy mohou být zapojeny sériově, tím dosáhneme nižšího mezního tlaku, nebo paralelně pro zvýšení rychlosti. Nevýhodou je opotřebení ventilů vývěvy, jejichž kvalita je pro funkci klíčová. Výhodou je nízká cena zařízení. [18]



Obr. 16. A: Membránová vývěva,
B: dvoukomorová Membránová vývěva [18]

2.2.1.2 Mechanická vývěva – rotační

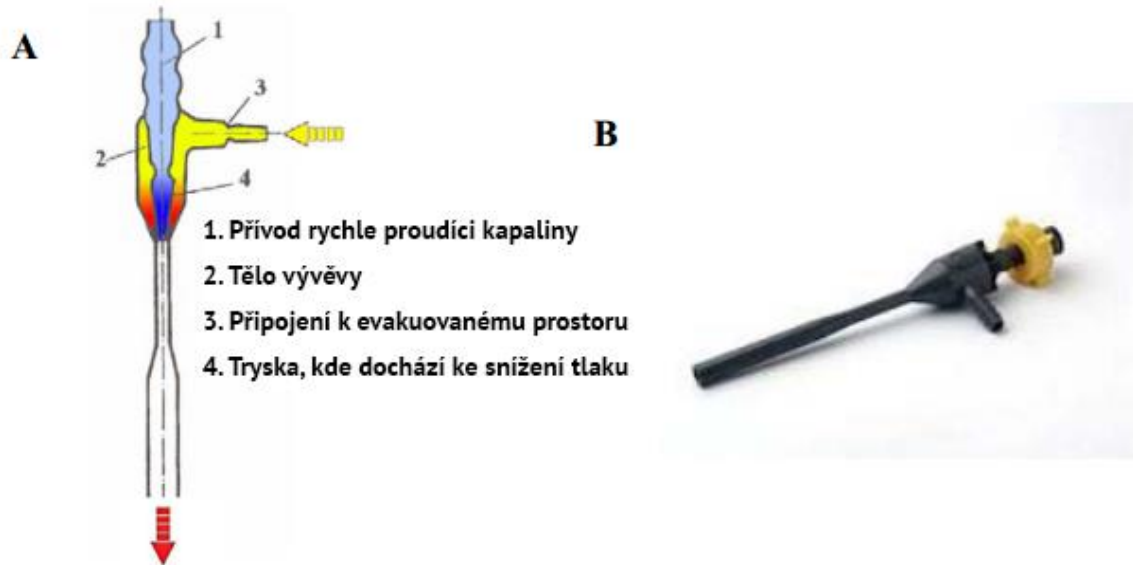
Rotační olejová vývěva je v praxi nejpoužívanější. Pracuje na základě excentricky uloženého rotoru s lopatkami. Olej slouží jako těsnění, mazivo a do jisté míry pro přenos tepla. Dochází ke kompresi čerpaného plynu, což má za následek rozpouštění některých odčerpávaných látek v oleji. Mezní tlak se pohybuje v rozmezí 3 až 0.02 Pa, maximální čerpací rychlost až 100 l/s. Pro lepší účinnost vývěv se můžou zapojit jak sériově, tak paralelně. Kvalita použitého oleje ovlivňuje účinnost vývěvy. Velkou nevýhodou je možnost vniku oleje do čerpaného prostoru. [18]



Obr. 17. A: Dvouступňová rotační olejová vývěva,
B: rotační olejová vývěva. [18]

2.2.1.3 Vývěva hybnostní – kapalinová

Vodní vývěva je hlavním typem vývěv s proudem pracovní tekutiny. Kuželový proud vody, který proudí z trysek, strhává molekuly čerpaného plynu. Podle Bernoulliho rovnice je tlak v místě rychle proudící kapaliny nižší než v místě, kde kapalina proudí pomaleji. Rozdíl tlaků tedy nasává plyn z prostoru a směs kapaliny s plynem je odváděna z vývěvy. Vývěva je levná a konstrukčně jednoduchá. Je rozšířená v laboratořích a její nevýhodou je značná spotřeba vody. [18]



Obr. 18. A: Schéma vodní vývěvy, B: plastová vodní vývěvy [18]

2.2.2 Přepadová nádoba

Slouží k zachycení pryskyřice, které se z formy dostává pomocí podtlaku. Její umístění musí být mezi vývěvou a formou. Pokud bychom přepadovou nádobu nepoužili a pryskyřice by se dostala do vývěvy, došlo by k jejímu zničení. Velmi často se na přepadovou nádobu instaluje měřít podtlaku. [5]



Obr. 19. Přepadová nádoba s měřičem podtlaku firmy AIRTECH [21]

2.2.3 Regulátor vakua / Vakuometr

Regulátor vakua se často používá u výroby dílů s voštinovým jádrem. Malá a jednoduchá jednotka, která se většinou umísťuje na přepadovou nádobu. Při větším rozdílu mezi tlakem ve formě a vnější atmosféře je větší pravděpodobnost pohybu s jádrem. Řízením vakuem tedy zabráníme pohybem jádra. [21], [18]



Obr. 20. Regulátor vakua firmy AIRTECH [21]

2.2.4 Injekční zařízení

Při procesech RTM a LRTM se používají injekční zařízení. Toto zařízení vstřikuje pod tlakem směs pryskyřice, která rychle a dokonale vyplňuje dutinu formy. V současné době je dostupné velké množství vstřikovacích zařízení od jednoduchých až po počítačem řízené zařízení. Počítačem řízené mohou být naprogramované na určitý objem pryskyřice v určitých krocích. Každý krok může mít různý injekční tlak. Na začátku procesu se volí nízký tlak, který pomáhá vyhnout se pohybu výztuže. Nízký tlak injektáže na konci procesu eliminuje případné přetoky. [5]

Injekční zařízení se skládá z několika částí:

- Dvojčinná pumpa – pumpuje pryskyřici a katalyzátor z dvou oddělených nádob
- Míchací hlava – dochází k míchání pryskyřice a katalyzátoru
- Čerpadlo pro rozpouštědlo – zabezpečuje oběh čistícího rozpouštědla
- Zařízení pro ohřev pryskyřice
- Ovládací panel
- Regulační zařízení [5]



*Obr. 21. Injekční zařízení pro RTM firmy
Aplicator Systém AB [22]*

2.2.5 Pomocné materiály

Vakuové technologie, jako např. VFI používá mnoho pomocných materiálů, které jsou k výrobě nezbytné. Z pomocných materiálů se po dokončení výroby a následného odformování se stává většinou odpad. [5]

2.2.5.1 Vakuovací folie

Pružná plastová folie, která umožňuje vytvářet vakuum. Slouží jako horní díl formy. Vakuování folie překrývá všechny ostatní pomocné materiály a musí být řádně utěsněna. Folie musí být tepelně, chemicky i mechanicky odolná. Její rozměr se volí s přesahem o 30 až 40%, než samotný výrobek. [5]

2.2.5.2 Odsávací rohož

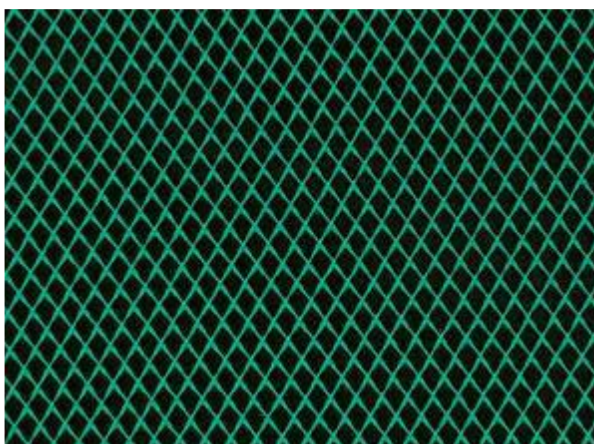
Tato netkaná textilie plní dvě funkce. Zabezpečuje odsávání vzduchu z uzavřeného prostoru a absorbuje přes separační folii přebytečnou pryskyřici. [5]



Obr. 22. Odsávací rohož [21]

2.2.5.3 Distribuční médium

Distribuční médium zabezpečuje rozvod pryskyřice a urychluje její tok do suché výztuže. Stejně jako většina pomocných materiálů distribuční médium nelze po prosycení pryskyřice znovu použít. Pro lepší tok pryskyřice se použije i více vrstev. Volba distribučního média závisí na použité technologii a pryskyřici. [5]



Obr. 23. Distribuční médium [21]

2.2.5.4 Odtrhová tkanina

Tkanina ze syntetických vláken, která se klade jako první přímo na výztuže výrobku. Při odformování se odtrhová tkanina ztrhává z výrobku a vzniká drsný povrch potřebný pro další technologické operace – laminování, lepení, povrchové úpravy. Také slouží k oddělení všech dalších pomocných materiálů, které jsou položeny na ní. [5]



Obr. 24. Odtrhová tkanina [21]

3 KOMPOZITNÍ PROFILY, VÝROBNÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE

3.1 Vlastnosti kompozitních profilů

Tažené kompozitní profily přináší mnoho výhod:

Nízká hmotnost – manipulace s kompozitními profily je snazší a bezpečnější. V porovnání s ocelí je až 4x lehčí

Pružnost – Výrobky nepodléhají trvalé deformaci po úderu nebo velkému zatížení jako kovové prvky

Chemická odolnost – Kompozity odolávají velké řadě chemikálií a nekorodují

Elektrická nevodivost – Kompozitní konstrukce se nemusí zemnit

Snadná obrobiteľnosť – řezný odpor je podobný jako při zpracování tvrdého dřeva. Navíc nevznikají ostré hrany a třísky

Nízká degradace materiálu

Výborné mechanické vlastnosti - Pevnost v tahu od 240 MPa do 1000 MPa (skleněná vlákna), resp. 3000 MPa (uhlíková vlákna)

Nehořlavost – pomocí retardéru je možnost vyrobit nehořlavý materiál

Dlouhodobá tepelná odolnost - Podle typu pryskyřice 100 až 180°C [26]

3.2 Aplikace kompozitních profilů

V průběhu posledních let dochází stále častěji k upřednostňování kompozitních materiálů. Tento nárůst lze vysvětlit novými a stále se rozšiřujícími poznatky mechanických vlastností kompozitů, jejich odolností a životností. To umožnilo jejich specifitější používání a snížilo bezpečnostní součinitele na přijatelnou úroveň. [27]

3.2.1 Antikorozní a chemický průmysl

Z hlediska svých materiálových vlastností jsou předurčeny k použití v chemických provozech, pivovarech, papírnách apod. [27]



Obr. 25. Aplikace v chemické čistírně [27]

Výrobky: Kompozitní lité a montované rošty, konstrukční profily, Schůdky, zábradlí, žebříky, ochranné mříže. [27]

3.2.2 Automobilový průmysl

Nízká hmotnost kompozitních materiálů snižuje hmotnost celého vozidla. Použití vyztužených plastů se snižují nároky na údržbu, neboť jsou vysoce odolné vůči korozi a chemikáliím. [27]

3.2.3 Elektrická izolace

Kompozitní výrobky mají velmi vysokou elektrickou odolnost.

Výrobky: Komponenty pro výrobu větrných elektráren, podpěry kabelů vysokého napětí, nosné konstrukce kabeláže, rošty. [27]



Obr. 26. Aplikace na větrné elektrárně [27]

3.2.4 Průmyslové budovy

Stále častěji se kompozitní profily používají při stavbách průmyslových budovách především kvůli jejich nízké hmotnosti. [27]

3.2.5 Sport a volný čas

Aplikace kompozitních profilů se ve sportu používá z důvodu vysoké pevnosti, nízké hmotnosti a pružnosti.

Aplikace: výztuhy do lyží a hokejek, nosné tyče sportovních a ochranných sítí, ploty u lyžařských vleků, výroba hokejek. [27]



Obr. 27. Aplikace při výrobě sportovních luků [27]

3.2.6 Úprava vody

Kompozity jsou ideálním materiálem při stavbě obslužných částí vodáren nebo čističek odpadních vod. Hlavním důvodem je, že nepodléhají korozi. [27]



Obr. 28. Aplikace ve vodárně [27]

3.3 Rozdělení profilů

Kompozitní profily se nejčastěji dělí:

Dle pojiva:

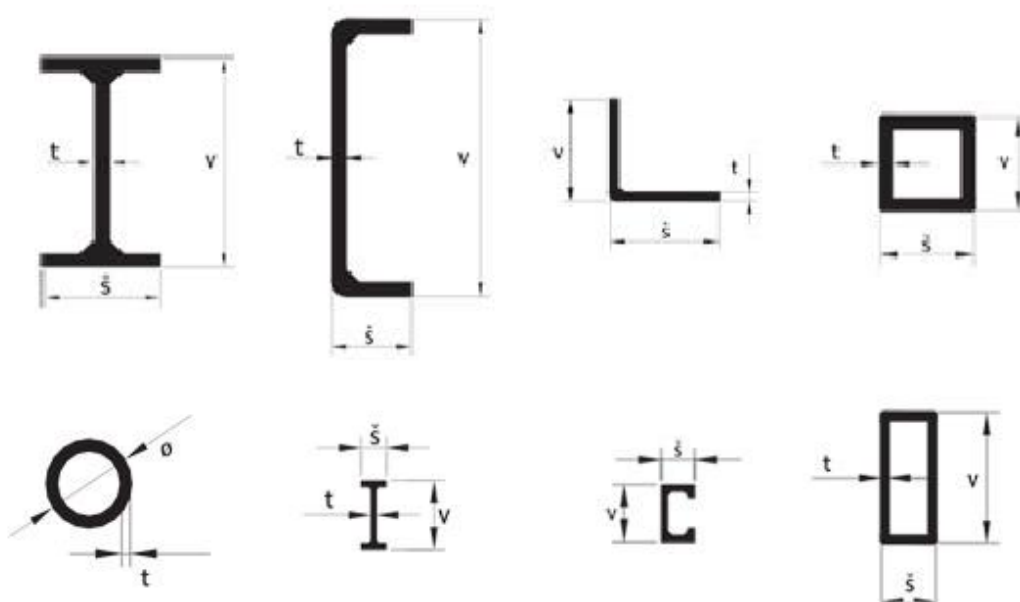
- Polyesterová pryskyřice
- Vinylesterová pryskyřice
- Epoxidová pryskyřice

Dle výztuhy:

- Nejčastěji skelná vlákna
- Uhlíková vlákna
- Čedičová vlákna

Dle tvaru:

- Standartní dle firemních katalogů
- Profily na zakázku po konzultaci s technickým oddělením [25]



Obr. 29. Ukázka rozdělení profilu dle tvaru firmy Prefa kompozity a.s. [25]

3.4 Bimodulární ohyb prutů vyztužených dlouhými vlákny

Plasty vyztužené jednosměrně dlouhými vlákny svým mechanickým chováním patří mezi tzv. bimodulární materiály, tj. materiály, vykazující výrazněji odlišné hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku. Ohyb prutu vyztuženého dlouhými vlákny je pak zvláštním případem ohybu složeného prutu. Rozhraní obou myšlených materiálů s navzájem odlišnými moduly pružnosti $E_+, E_- < E_+$ spadá do neutrální osy průřezu. Její poloha vyplývá z podmínky nulového součtu osových sil v průřezu:

$$\int_{(s)} dN = 0 \quad (1)$$

Ohybová napětí v krajních vláknech průřezu, tj v $y=e_-, y=e_+$ určíme s pomocí vztahu

$$\sigma_i(y) = E_i \frac{1}{r} y = \frac{E_i J}{E_+ J_r} y \quad (2)$$

Zřejmě tak bude

$$\sigma_{+max} = \frac{M}{J_r} e_+, \sigma_{-max} = \frac{E_- M}{E_+ J_r} e_- \quad (3)$$

kde J_r je opět kvadratický moment redukované plochy průřezu k neutrální ose. Co do únosnosti průřezu v ohybu připadají v úvahu dva mezní stavy: buď dostoupí max. tahové napětí hodnoty meze pevnosti v tahu, nebo max. tlakové napětí dosáhne hodnoty meze pevnosti v tlaku. O tom, která z obou možností nastane, rozhodují nejen materiálové parametry – podíly E_+/E_- , σ_{P-}/σ_{P+} , ale i tvar průřezu.

Ohybové momenty příslušející hodnotám napětí na mezích pevnosti jsou podle

$$M_+ = \sigma_{p+} \frac{J_r}{e_+} \quad (4)$$

$$M_- = \sigma_{p-} \frac{E_+ J_r}{E_- e_+} \quad (5)$$

Skutečným mezním momentem, při jehož působení dochází v průřezu k poruše, je menší z momentů M_- , M_+ . Vyjádřeme se nyní k pojmu tzv. „modulu pružnosti v ohybu“ bimodulárního materiálu. Vzorek pro ohybovou zkoušku má průřez obdélníkového tvaru, takže podmínka poskytuje pro polohu neutrální osy vztah

$$\frac{e_+}{e_-} = \eta \quad (6)$$

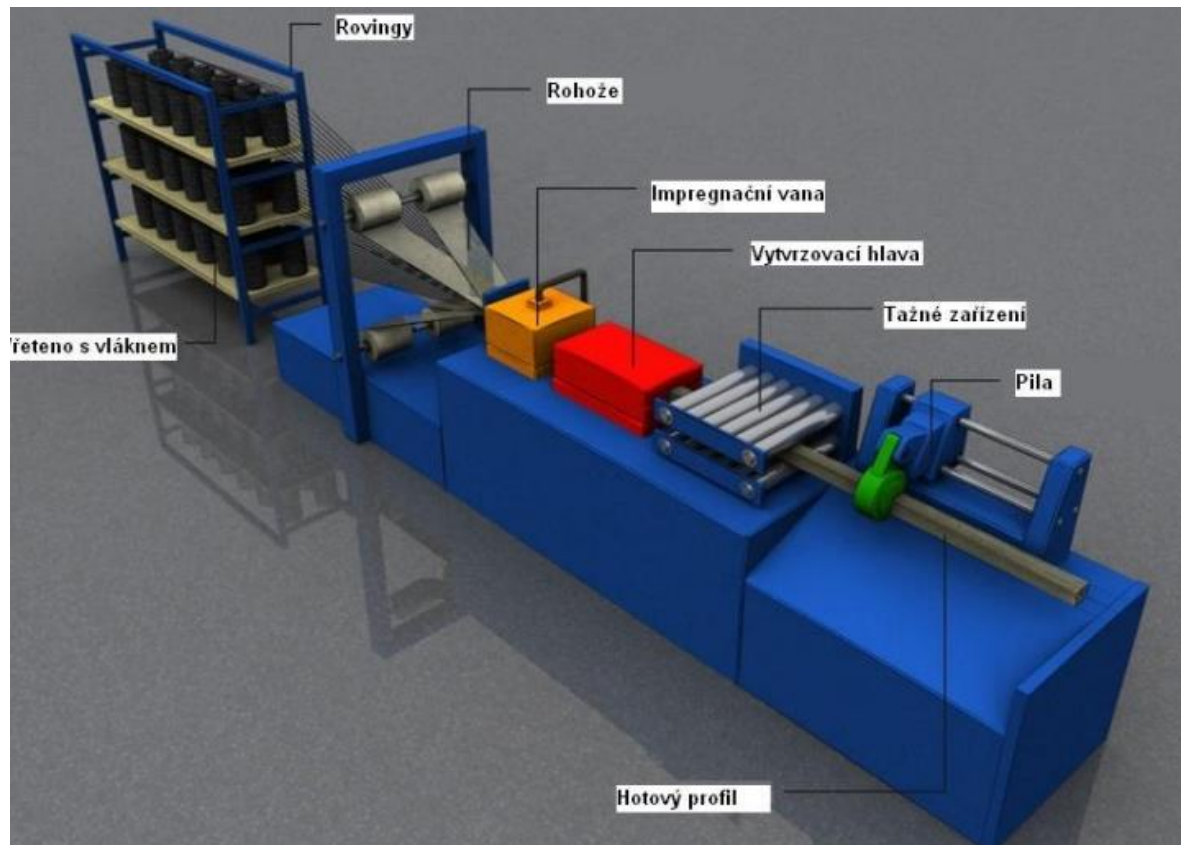
s označením $\eta^2 = E_- / E_+$. Poněvadž $e_+ / e_- = h$, je

$$e_- = \frac{h}{1 + \eta}, e_+ = \frac{\eta h}{1 + \eta} \quad (7)$$

[6]

3.5 Pultruze

Jedná se o nepřetržitý kontinuální proces výroby kompozitních profilů, při kterém se vlákna zpevňují napouštěním termoplastickou pryskyřicí. Metoda zaručuje opakovaně konstantní kvalitu. Pultruze je poměrně rozšířený proces pro výrobu kompozitních profilů. Nekonečné vlákna výztuže se smáčí v pryskyřicové lázni a následně jsou protahována vyhřátými tvářecími formami, kde později probíhá i jejich vytvrzování. Zde dochází k tvarování při současném zesíťování pryskyřice. Prosycené výztuže polymerní matricí jsou vedena přes stírací desku do tvarovací a vytvrzovací formy, kde se odstraní přebytečná polymerní matrice. Forma má v této fázi tvar budoucího výrobku a je udržována na předem dané teplotě potřebné k vytvrzení pryskyřice. Vytvrzený profil je poté odtahován a řezán na potřebnou délku. [5], [23]



Obr. 30. Pultruzní linka [24]

Výhody:

- Velké produktivita
- Vysoký stupeň automatizace
- Nízké nároky na lidskou práci
- Nekonečná délka kompozitního výrobku
- Dobré fyzikální vlastnosti

Nevýhody:

- Náročný rozběh technologického cyklu
- Tvarové omezení profilů
- Relativně drahý provoz
- Nutnost disponovat kvalitním řídicím systémem
- Velké investiční náklady [5]

Existují dva způsoby impregnace. S otevřenou lázní a s uzavřenou tlakovou impregnací (vstříkovaní). Při otevřeném postupu se vlákna vedou buďto přes ponořovací válec do impregnační vany s pryskyřicí, kde se prosycují matricí a tato směs prosycených vláken a matrice pokračuje do formy, kde dojde k zformování a k vytvrzení do požadovaného tvaru.

[7]

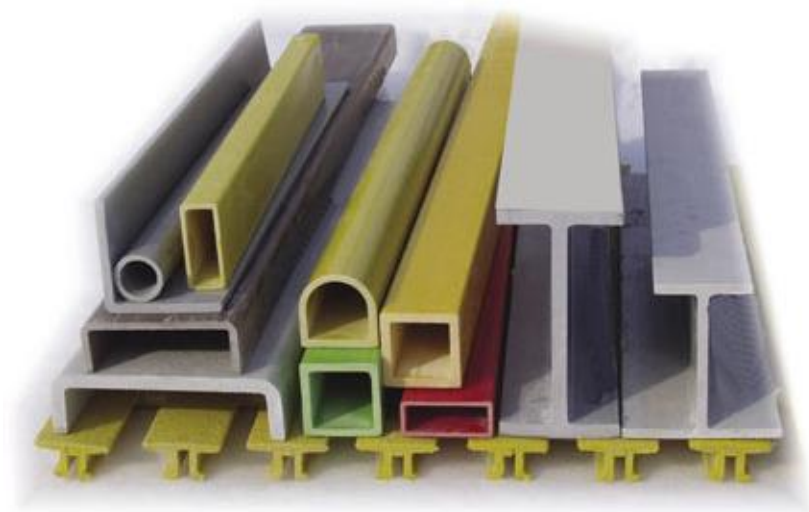
3.5.1 Použití pultruze

Pultruzní výrobky mají nízkou hmotnost, vynikající mechanické vlastnosti, vysokou korozní odolnost, nízkou tepelnou vodivost, teplotní roztažnost srovnatelnou s kovy, vysokou rozměrovou stálost a jsou elektricky nevodivé. Dalšími výhodami jsou nízká navlhavost, neomezená velikost profilů, velké množství možných průřezů, přesné a reprodukovatelné uložení vyztužovacího materiálu a nízké výrobní náklady. Tato technologie je právě proto vhodná k výrobě relativně cenově výhodných kompozitových profilů.

Kvalita kompozitů zhotovených za vysoké teploty při vytvrzování a při konstantních podmínkách podstatně převyšuje ručně skládané a za studena tvrzené kompozity. Pultruzí se vstříkovaním lze vyrábět i sendvičové panely. Pro pultruzi je také možné použít prepregy, profily je poté možnost použít pro prvky do trupů letadel.

Tažené profily jsou jednosměrně orientované lamináty s vynikajícími mechanickými vlastnostmi ve směru vláken, ale jejich vlastnosti jsou horší v příčném směru. Tyto vlastnosti je předurčují jako výborný konstrukční materiál, který je možno používat v elektrotechnice, pro dobré izolační vlastnosti profilů a i v chemickém průmyslu pro jejich dobrou chemickou odolnost. Typickou aplikací v elektrotechnice je nevodivý žebřík, izolanty i celé sloupy elektrického vedení. Ve stavebnictví se používají jako výztuží do betonu, protihlukových bariér, náhrada části poškozených mostních konstrukcí, podpůrných konstrukcí. V dopravě se používají jako nosníky a nosné i nenosné panely nákladních vozů, autobusů a železničních vagonů, části lodních trupů. Dále existuje několik netypických aplikací pultruze, jako např. výroba velkých zásobníků přímo na místě pomocí mobilní pultruzní linky, či výroba pultruzních profilů s pěnovou strukturou vytvrzené polymerní matrice zvaná vakuová pultruze. Nevýhodu horších mechanických vlastností v příčném směru na vlákna částečně odstraňuje pultruze kombinovaná s navíjením, tzv. pullwinding.

[7]



Obr. 31. Profily vyrobené technologií pultruze [25]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomová práce ve své praktické části popisuje výrobu žebrovaných kompozitních výrobků s polymerní matricí a skelnou výztuží. Žebra nejsou lepeny, ale vyrobeny v jednom výrobním cyklu s výrobkem, a tak odpadá nutnost lepení žeber.

Cíle diplomové práce:

- I. Teoretická část
 1. Rozdělení vakuových technologií a jejich princip.
 2. Popis pomocných materiálů a technologických parametrů při vakuových technologiích.
 3. Použití a popis kompozitních profilů vyrobených pultruzí.
- II. Praktická část
 1. Experimentální studium výroby kompozitních profilů vyrobených pomocí vakuové infuze pod pružnou folii.
 2. Návrh praktického experimentu dle vedoucího diplomové práce.
 3. Výroba kompozitních vzorků a sledování technologických parametrů vakuové infuze pod pružnou folii.
 4. Testování ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178 na vyrobených kompozitních profilech a jejich zhodnocení.
 5. Možnost aplikace kompozitních profilů, vyrobených v jednom kroku.
 6. Závěr

5 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VÝROBY ŽEBROVANÝCH VÝROBKŮ POMOCÍ VAKUOVÉ INFUZE POD PRUŽNOU FOLIÍ

Praktická část diplomové práce navazuje na moji bakalářskou práci, v které jsem potvrdil, že lze vyrábět kompozitní profily vkládané mezi výztuže. Cílem diplomové práce je získat další praktické zkušenosti s výrobou profilů pomocí technologie vakuové infuze pod pružnou folií. Tento experiment byl proveden ve firmě FORM s.r.o., která disponuje potřebnými materiály a komponenty pro námi zvolenou technologii. Technologie vakuová infuze je z hlediska zkušeností obsluhy náročná, s pomocí kvalifikovaných pracovníků očekáváme lepší výsledky.

V praktické části se zabývám popisem výroby, stanovení ohybových vlastností a jejich vzájemné srovnání a návrh aplikace.

Celý experiment probíhal při stejných podmínkách a podobném postupu. Byly vyrobeny celkem 4 typy kompozitních vzorků. Při výrobě byla použita vývojová pryskyřice FR 4/12 PLP 5 se síťovacím činidlem MEKP. Jako výztuž byla použita skelná tkanina bidiagonal X-E-988 od firmy Saertex s.r.o..

Před každou výrobou probíhala příprava formy nanesením gelcoatu na formu. Gelcoat vytváří hladkou pohledovou vrstvu a po odformování není potřeba žádných dalších povrchových úprav. Okraje formy musí být před tenkou vrstvou (0,05-0,2mm) gelcoatu překryty páskou, aby se na ně mohly umístit pomocné materiály.

Pro výrobu „I“ a „U“ profilu bylo potřeba vyrobiť podpěry, které zabrání zdeformování žebra při působení podtlaku ve formě. Tyto podpěry byly vyrobeny ze dřeva a na jejich koncích je možnost použít šroubového spojení. Toto spojení sepne profil ještě před samotným působením podtlaku a předpokládá se, že výsledný profil nebude zdeformovaný. Maximální výška profilu může být 30mm.

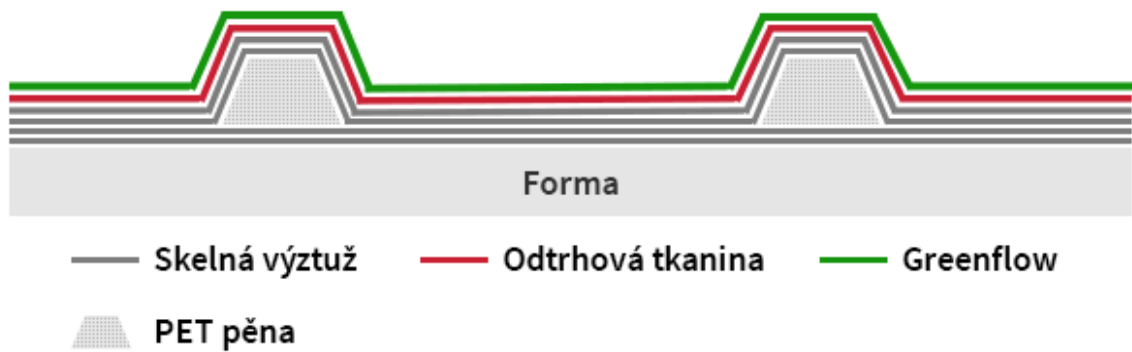


Obr. 32. Dřevěné podpěry

5.1 Výroba lichoběžníkového profilu s PET pěnou

Tab. 2. Použité materiály při výrobě kompozitu s PET pěnou

Počet vrstev výztuže	4
Materiál žebra	PET pěna
Sít'ovací činidlo	MEKP
Hmotnost použité pryskyřice	2 500g
Hmotnost použitého tvrdidla	50g
Gelcoat	Ano
Pomocné materiály	Odrhová tkanina, greenflow, resintrack, oboustranná těsnící lepicí páska, hadice a konektory, vakuovací folie,



Obr. 33. Schéma rozložení tkanin a PET pěny

První experiment spočíval ve výrobě vzorku s PET pěnou. Postup výroby profilu s PET pěnou vychází z bakalářské práce a s pomocí odborné obsluhy chceme docílit lepších výsledků. Tento první výrobek také slouží jako připomenutí procesu infuze.

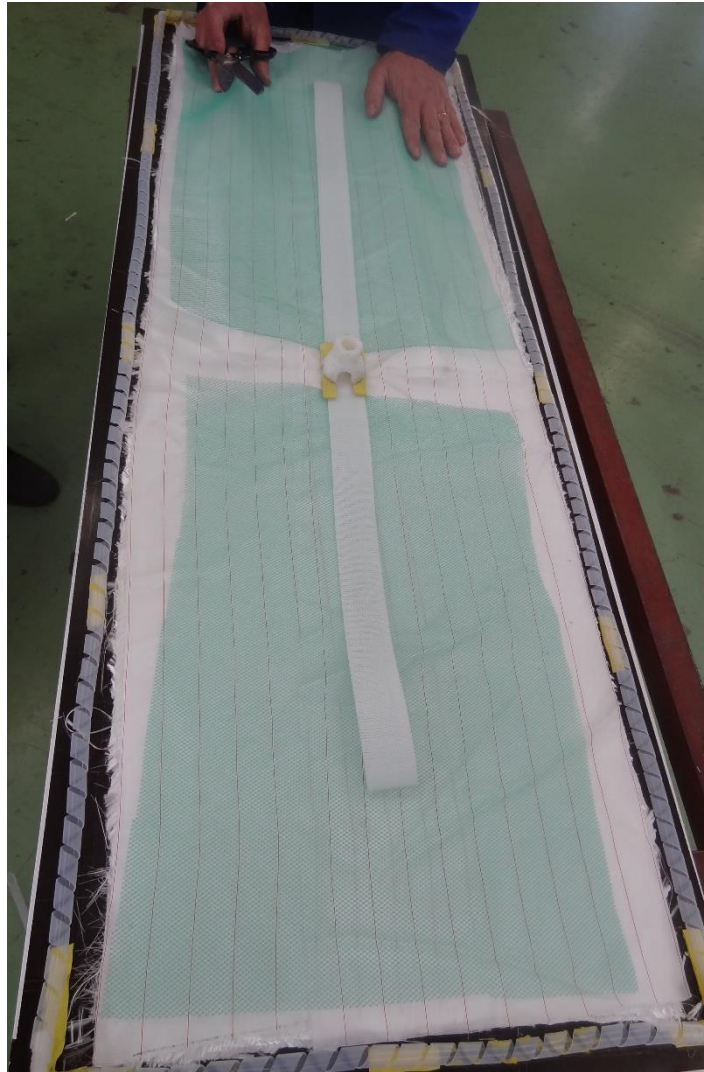
Na povrchovou vrstvu formy o rozměrech 130x42cm byl nanesen nástřík gelcoatu. Na připravenou formu byly položeny dvě vrstvy skelných výztuží orientované ve stejném směru o rozměru 130x42cm. Lichoběžníkové PET profily byly položeny na jednu z polovin formy. Přes výztužný profil se položili další dvě vrstvy výztužné tkaniny. Jejich rozměr se musel zvolit o něco větší kvůli přeložení přes profily. Délka jedné PET pěny byla 600mm. Druhá polovina formy tvořila pouze desku o celkově čtyřech vrstvách výztuže.



Obr. 34. Umístění PET pěny ve formě

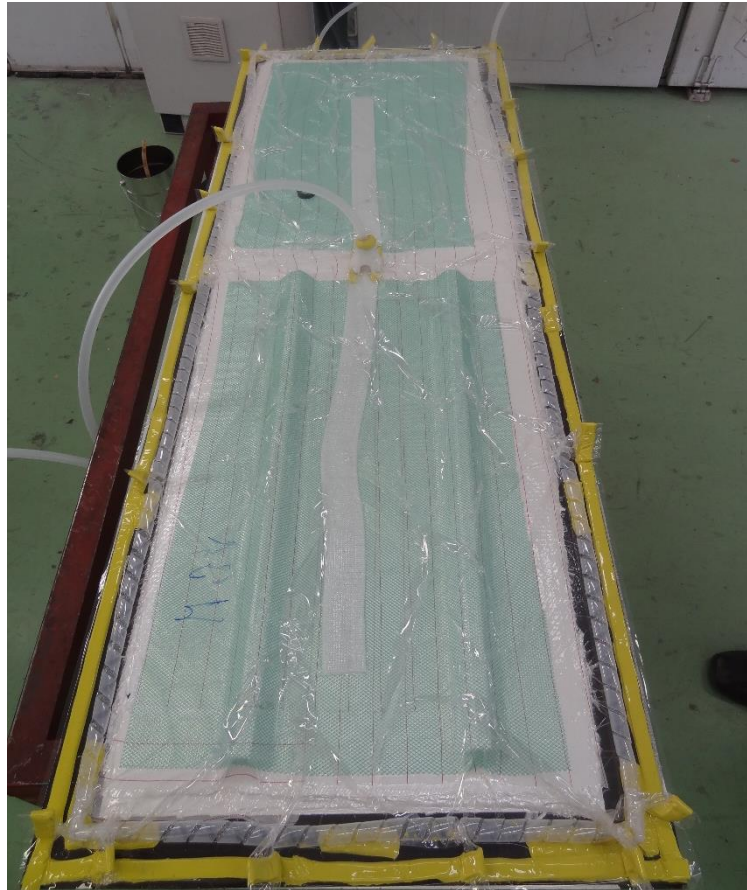
Na okraje formy se pomocí oboustranné lepicí pásky aplikuje spirálová hadice, která zajistí odvod přebytečné pryskyřice. Systém hadiček je napojen na rezervoár pomocí „T „ a „L“ kolínek.

Jako první z pomocných vrstev se klade na výztuže odtrhová tkanina. Její rozměr se volí dle výrobku. Odtrhová tkanina musí překrývat výztuž a bylo nutné počítat s větším rozměrem kvůli překládání přes profil. Odtrhová tkanina nemusí být v jednom kuse, ale může se nastříhnout a přeložit. Na odtrhovou tkaninu bylo položeno distribuční médium, které zajistí, aby pryskyřice prosytila výztuž. Toto médium je nutné mít všude, kde požadujeme, aby pryskyřice prosytila výztuž. Na střed šířky formy byl vložen resintrak, který napomáhá toku pryskyřice. Doprostřed formy se vložil konektor na napojení pryskyřice.



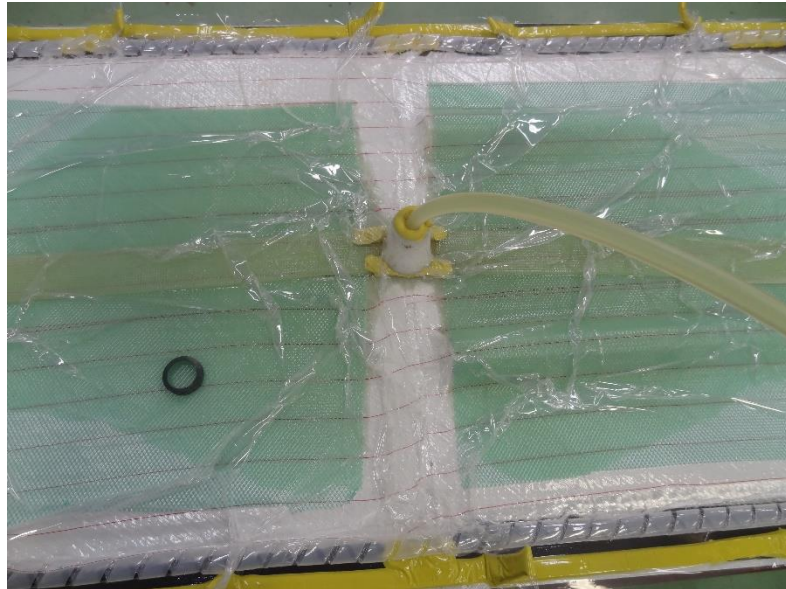
Obr. 35. Příprava formy

Jako poslední byla položena vakuovací folie. Tato folie byla přilepena pomocí těsnící pásky na okraje formy. Rozměr folie musí mít dostatečný, aby nebyla napnutá a pokryla i členité části výrobku. Utěsnění folie na formu probíhá za působení podtlaku a musí být velmi dokonalé, aby nedocházelo po vypnutí vývěvy k poklesu podtlaku. Tlak se změřil barometrem a jeho hodnota byla 0,75 Bar. Přívod pryskyřice byl napojen na přívodní konektor a také utěsněn páskou. Přívodní hadice musí být uzavřená, aby do formy nevnikal vzduch.



Obr. 36. Zavakuovaná forma pod pružnou folii

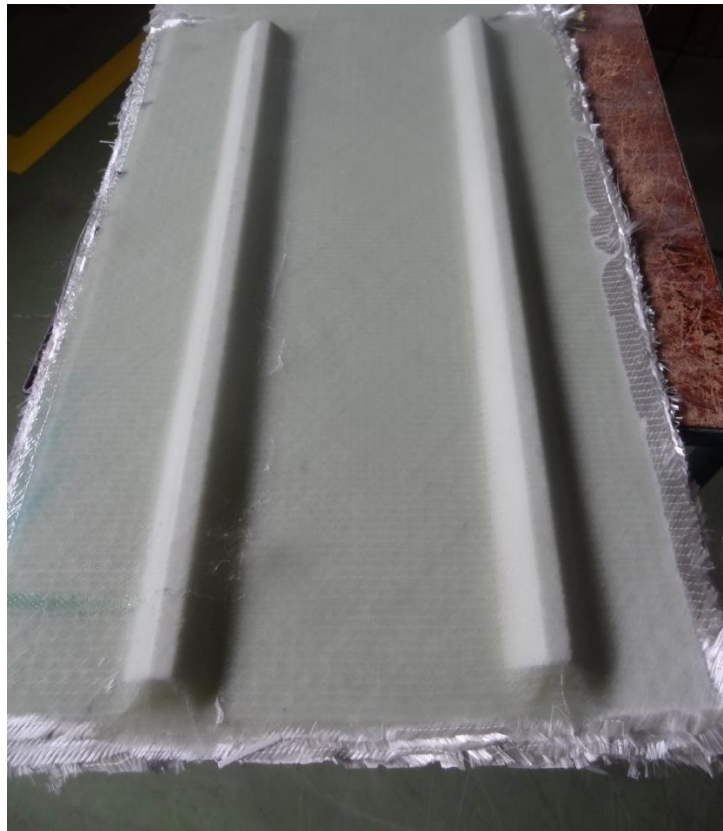
Po přípravě formy bylo naváženo 2,5Kg pryskyřice a 50g síťovacího činidla MEKP. Síťovací činidlo se smíchalo s pryskyřicí a přívodní hadice se do ní ponořila. Jakmile je pryskyřice dokonale promíchána, uvolníme přívodní hadici a pomocí podtlaku vytvořeném ve formě se pryskyřice dostává do formy. Dochází k prosycení výztuží a přebytečná pryskyřice se odvádí do rezervoáru. Po úplném ukončení vytvrzovací reakce se výrobek odformoval.



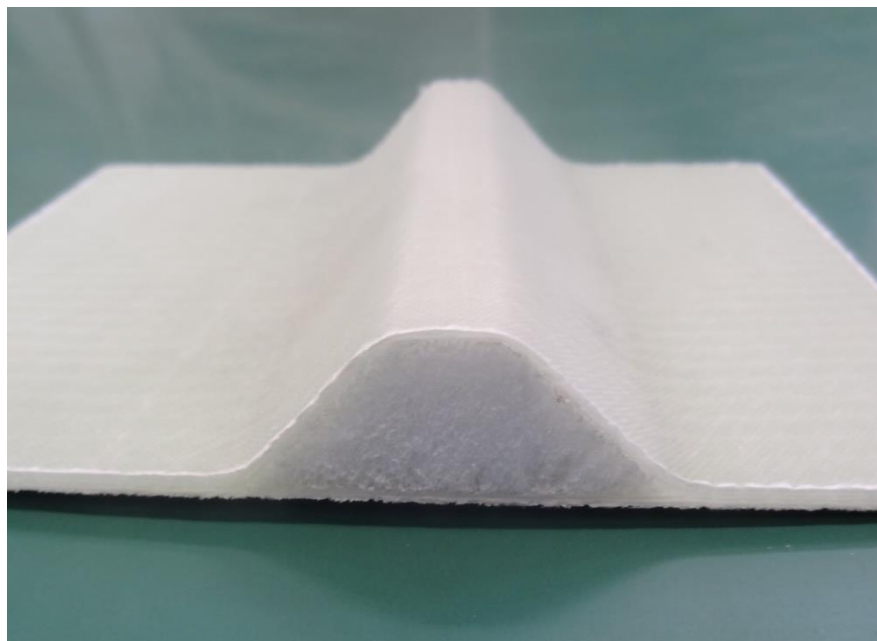
Obr. 37. Přívod pryskyřice při infuzi

Zhodnocení

U výrobku s PET pěnou byla pryskyřice při procesu infuze rovnoměrně dopravována do všech míst na výrobku. Na odformovaném výrobku nebyly zjištěny žádné pohledové vady. Experiment považujeme za zdařilý a výsledný výrobek bude testován na ohybové vlastnosti.



Obr. 38. Výsledný výrobek s PET pěnou

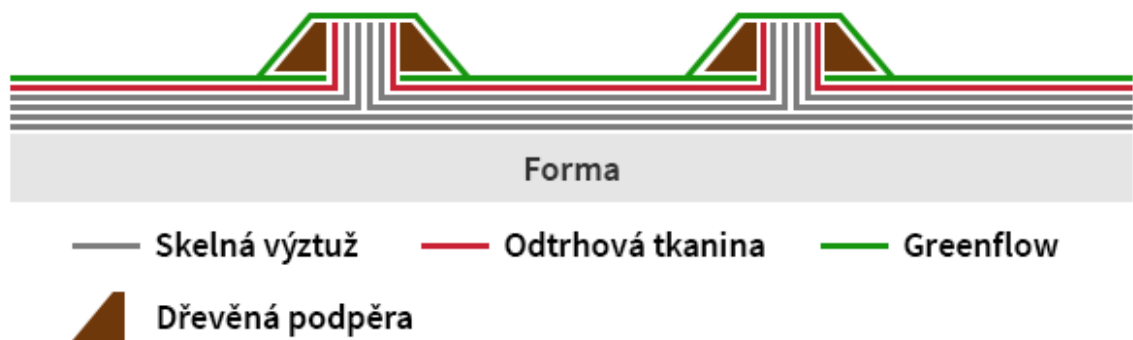


Obr. 39. Připravený vzorek pro testování

5.2 „I“ profil

Tab. 3. Použité materiály při výrobě „I“ profilu

Počet vrstev výztuže	4
Materiál žebra	Skelná tkanina + rohož
Síťovací činidlo	MEKP
Hmotnost použité pryskyřice	3 000g
Hmotnost použitého tvrdidla	50g
Gelcoat	Ano
Pomocné materiály	Odrhová tkanina, greenflow, resintrack, oboustranná těsnící lepicí páska, hadice a konektory, vakuovací folie, podpěry profilu



Obr. 40. Schéma rozložení tkanin a dřevěných podpěr

5.2.1 Vzorek 1

Výroba

Postup přípravy formy, pomocných materiálů a dvou spodních vrstev skelných výztuží je stejný jako v případě předchozího výrobku. Dále budu popisovat pouze rozdíly, které ve výrobě nastaly při nachystání profilů a jejich ukládání do formy.

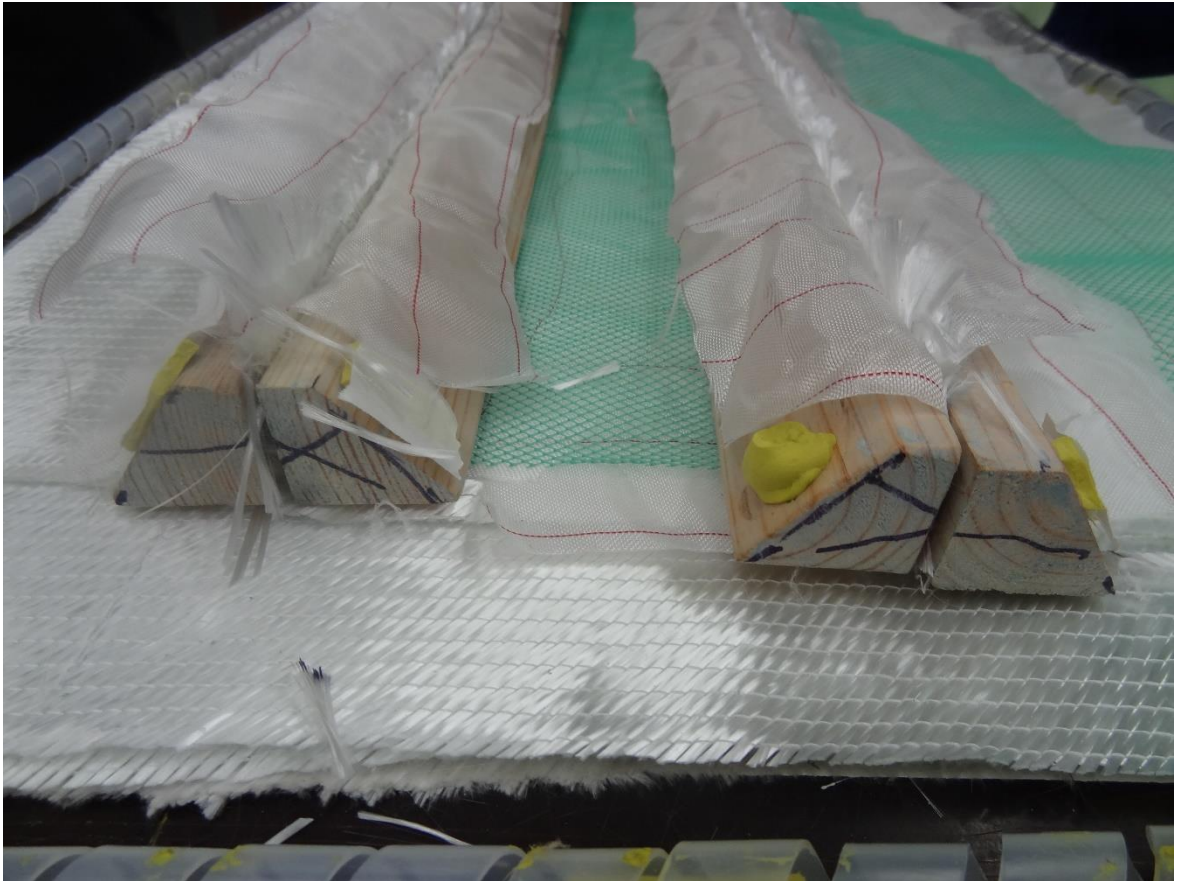
Požadavkem bylo, aby byl profil vytvořen v jednom výrobním kroku. To znamená, že dvě horní vrstvy obsahují „I“ profil. Je potřeba naplánovat jejich rozměry tak, aby skelnou výztuž šlo založit mezi podpěry a v žádných místech skelná výztuž nechyběla.

Pro horní vrstvy skelné výztuže bylo potřeba:

170x600mm – 4x

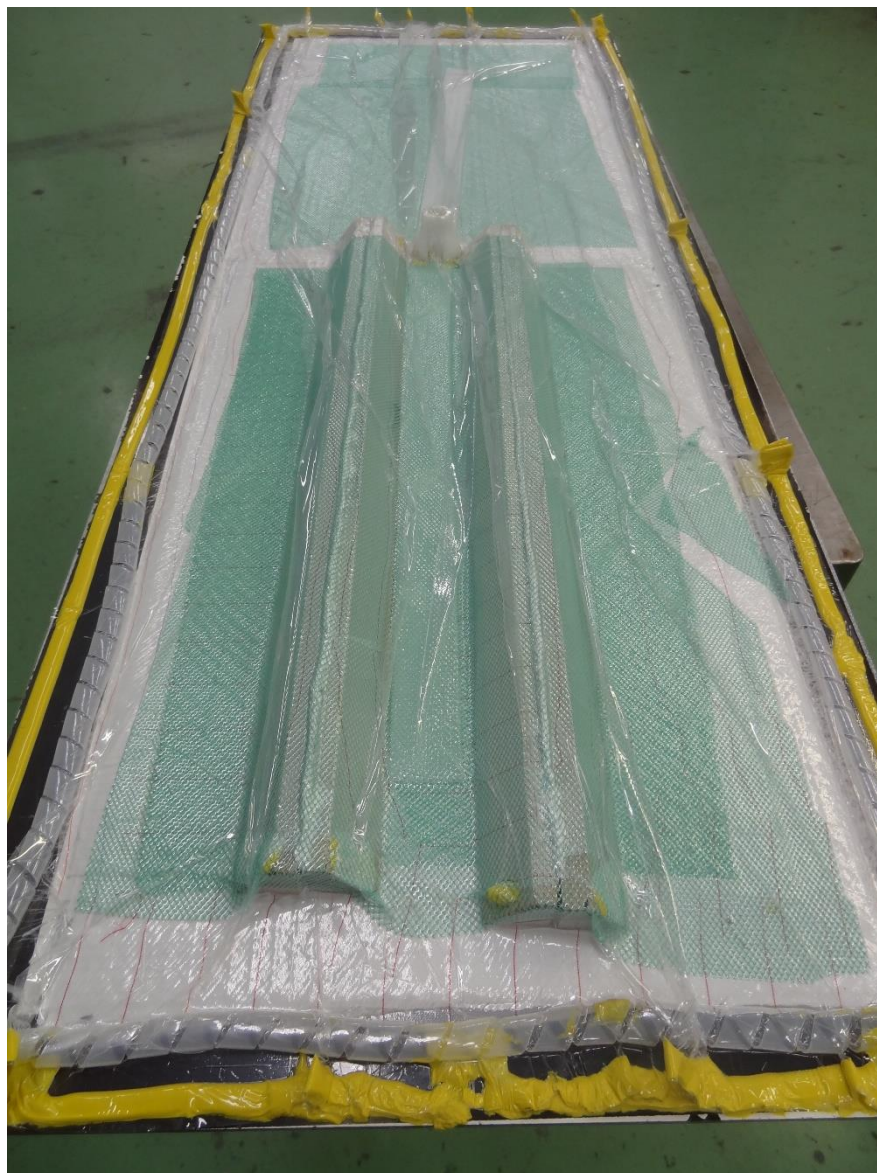
200x600mm – 2x

Dřevěné podpěry, šrouby a matice byly naseparovány pastou, aby nedošlo ke spojení s pryskyřicí, které by bylo obtížně odformovat. Pokládání výztuží a pomocných materiálů do formy se drželo dle předem zvoleného schématu. Po založení „I“ profilu se šrouby utáhly, aby profil držel výsledný tvar. Bylo potřeba správně umístit odtrhovou tkaninu, aby ulehčila práci při odformování. To znamenalo, že musela být pod podpěrami. Vyčnívající části šroubů bylo potřeba přelepit těsnicí páskou, aby nedošlo k zatečení pryskyřice do šroubových spojů.



Obr. 41. Použití dřevěných podpěr ve formě

Přes podpěry se umístila greenflow, která napomáhá toku pryskyřice a zajistí tak lepší prosycení výrobku. Jako v přechozím případě byl doprostřed umístěn resintrak a přívodní konektor. Po zkontrolování se přichystaný výrobek zavakuoval.



Obr. 42. Zavakuovaná forma s „I“ profilem

Po kontrole vakua a utěsnění se k formě přes konektor připojila uzavřená přívodní hadice. Síťovací činidlo MEKP se smíchalo s pryskyřicí, přívodní hadice se ponořila do připravené pryskyřice a následně se hadice otevřela. Podtlakem vniká pryskyřice do formy a tok pryskyřice prosycuje výztuž. Pokud bychom výrobek odformovali až při dokončení vytvrzovací reakce, byl by problém s oddělením podpěr od prosycené výztuže. Proto nebyl výrobek odformován při úplném ukončení vytvrzovací reakce, ale při částečném dosíťování příčných vazeb. V dobu, kdy víme, že pryskyřice je dostatečně tuhá. Pro lepší odhad jsme si z připravené pryskyřice odlili tenkou vrstvu do plastového kelímku a zde jsme mohli pozorovat, v jakém stavu se pryskyřice nachází. Při odformování se jako první musely uvolnit šrouby svírající podpěry. K těmto šroubům byl problém se dostat, jelikož zahloubení pro šrouby

byly zaplněné pryskyřicí. Pryskyřice už byla poměrně vytvrzená a podpěrné desky se musely odformovávat hrubou silou. Podpěrné desky by tímto způsobem zacházení moc dlouho nevydržely.

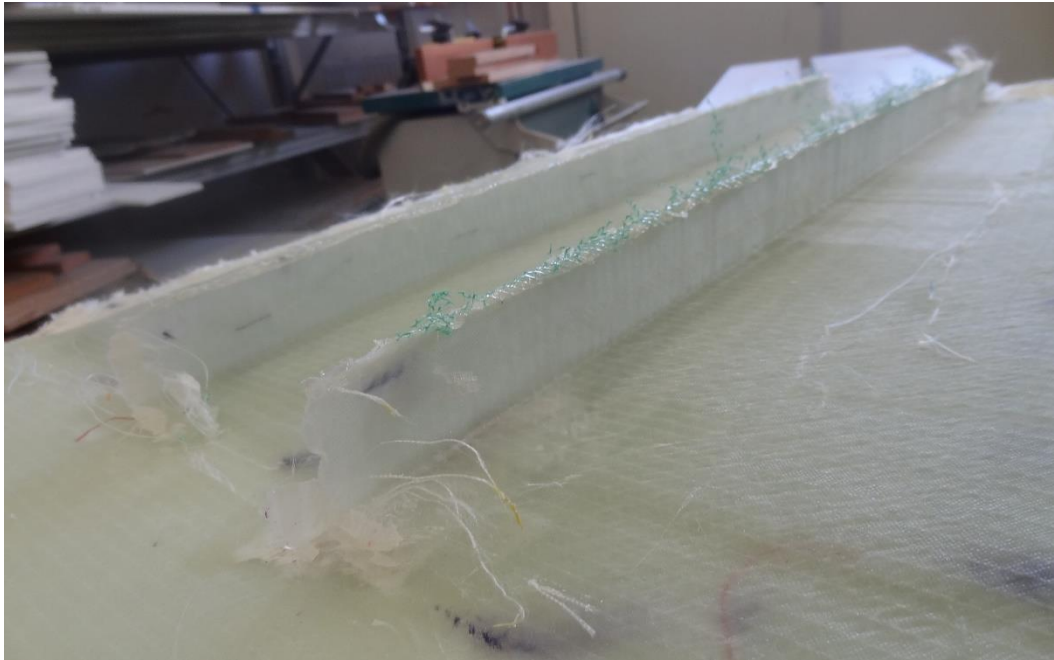


Obr. 43. Tečení pryskyřice při procesu infuze

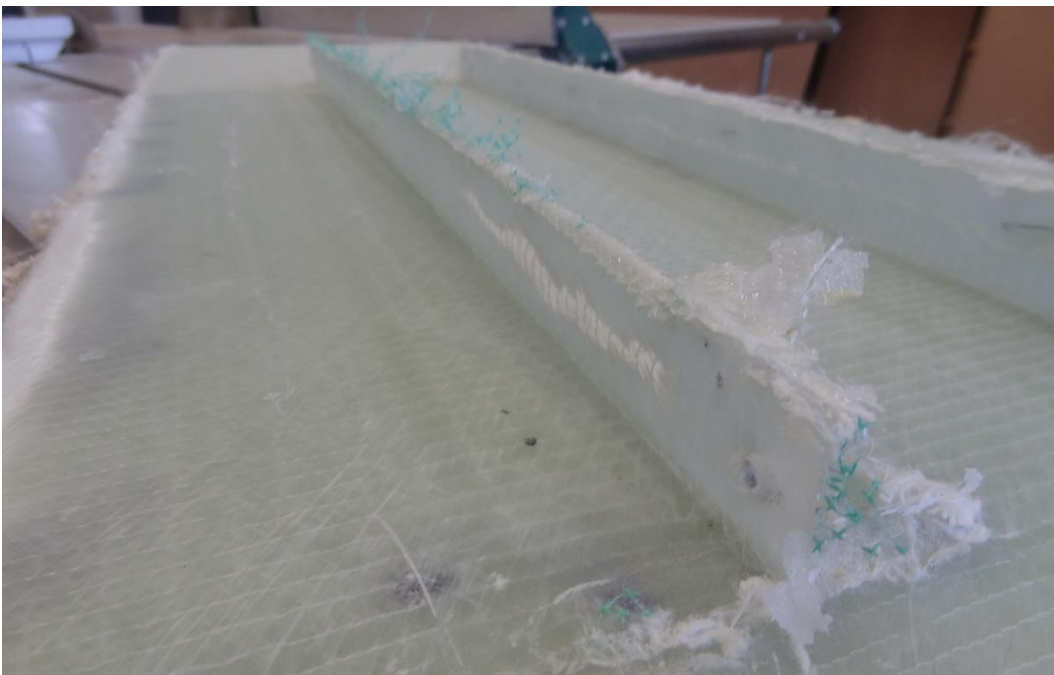
Zhodnocení

Tok pryskyřice byl rovnoměrný. Odformování nastalo po 1h a 5min po započetí infuze. Odformování kladlo velký odpor a při další výrobě bylo potřeba dbát na dřívější odformování. Na výrobku bylo pozorováno neúplné prosycení profilu. Bylo usouzeno, že to je z důvodu špatného zvolení množství síťovacího činidla a pryskyřice byla rychle vytvrzená. Nedostala se tak do všech míst ve výrobku. Tok pryskyřice volí cestu nejmenšího odporu a je možné, že tlak sepnutých podpěr neumožnil pryskyřici prosytit „I“ profil. Tvar profilu je rovný,

nezdeformovaný a stabilní. Pohledová strana bez vady. Kvůli neprosycení profilu experiment nepovažujeme za zdařilý a bude se opakovat.



Obr. 44. Výsledný žebrovaný výrobek



Obr. 45. Neprosycené místo na výsledném žebrovaném výrobku

Nedostatky a vady při výrobě „I“ profilu jsem se snažil eliminovat v dalším pokusu.

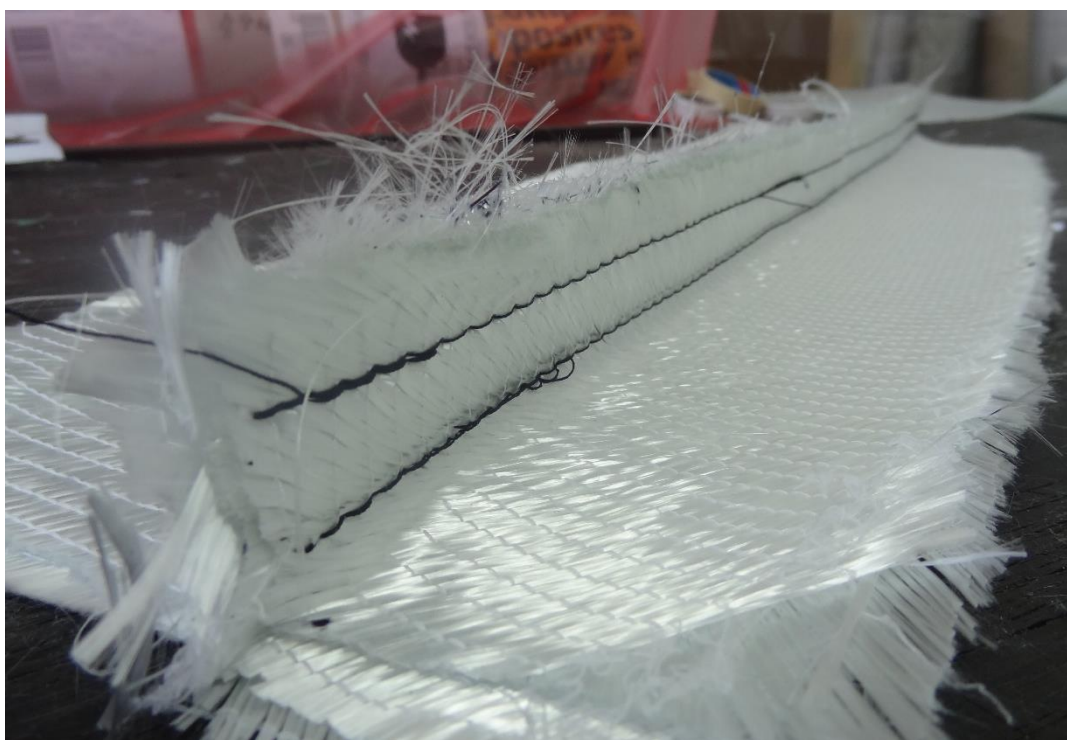
5.2.2 Vzorek 2

Zhotovení „I“ profilu

V předchozí výrobě byl problém s manipulací profilu při zakládání do formy. Tento problém jsem se snažil vyřešit sešitím. Nejprve bylo potřeba odměřit a nastříhat výztuž tak, aby se profil mohl zhotovit. Připravené výztuže byly následně sešity. Do profilu byla vložena také jedna vrstva rohože kvůli lepšímu toku pryskyřice skrz profil.



Obr. 46. Schéma „I“ profilu ze skelných výztuží



Obr. 47. Sešitý „I“ profil

Geltime

Aby se dosáhlo plnému prosycení výztuže, bylo potřeba správně připravit pryskyřici. V tohoto důvodu byl proveden geltime dané pryskyřice. Do třech kelímků bylo naměřeno 100g

pryskyřice. Každá nádoba byla smíchána se síťovacím činidlem MEKP – 1%, 2% a 3%. Sledoval se časový údaj, kdy již není pryskyřice rozpustná v rozpouštědlech, tzn., že není zpracovatelná jako tekutá hmota.

Tab. 4. Časové hodnoty geltime

Množství iniciátoru	Geltime
1%	26 min
2%	36 min
3%	50min

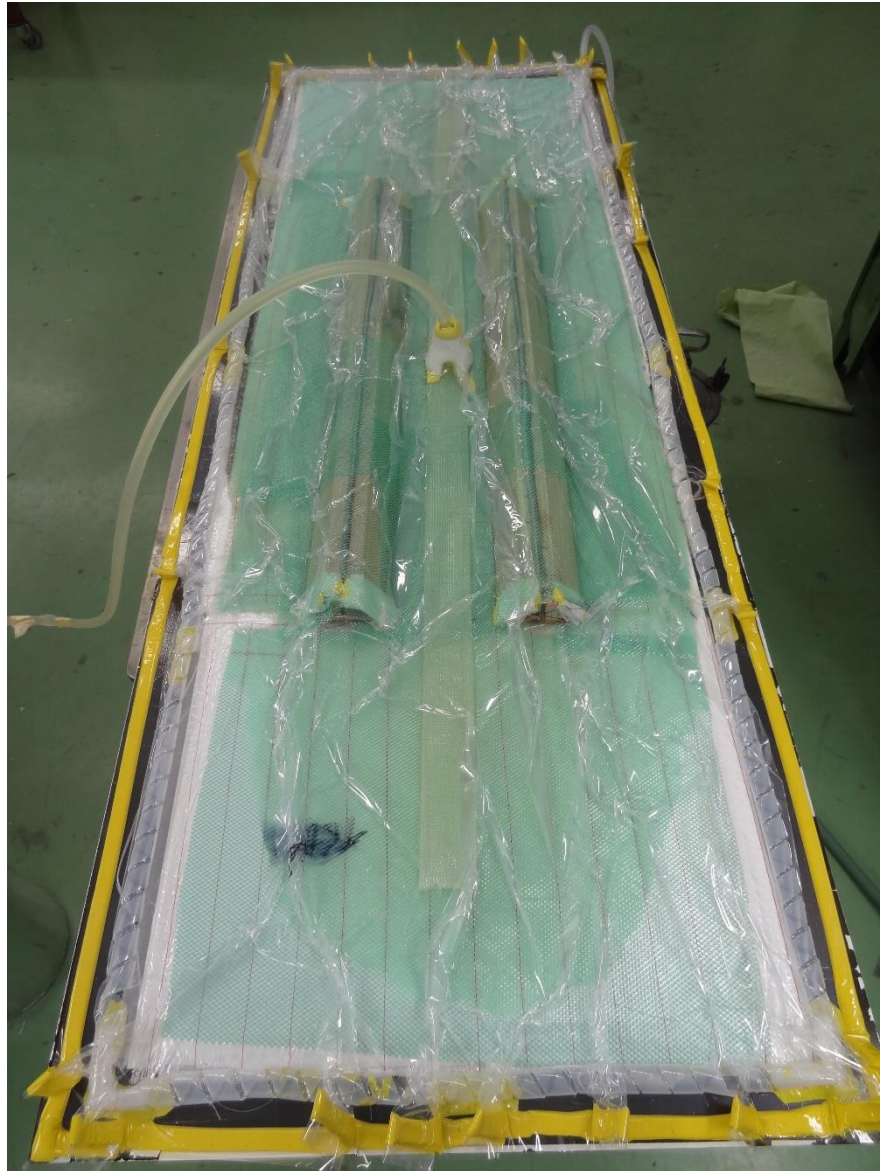
Bylo potřeba oddálit vytvrzení pryskyřice, aby se dostala do všech míst na výrobku. Jako vhodný geltime bylo zvoleno množství 2% iniciátoru. Tomu odpovídal časový údaj 36min.



Obr. 48. Měření geltime vývojové pryskyřice

Výroba

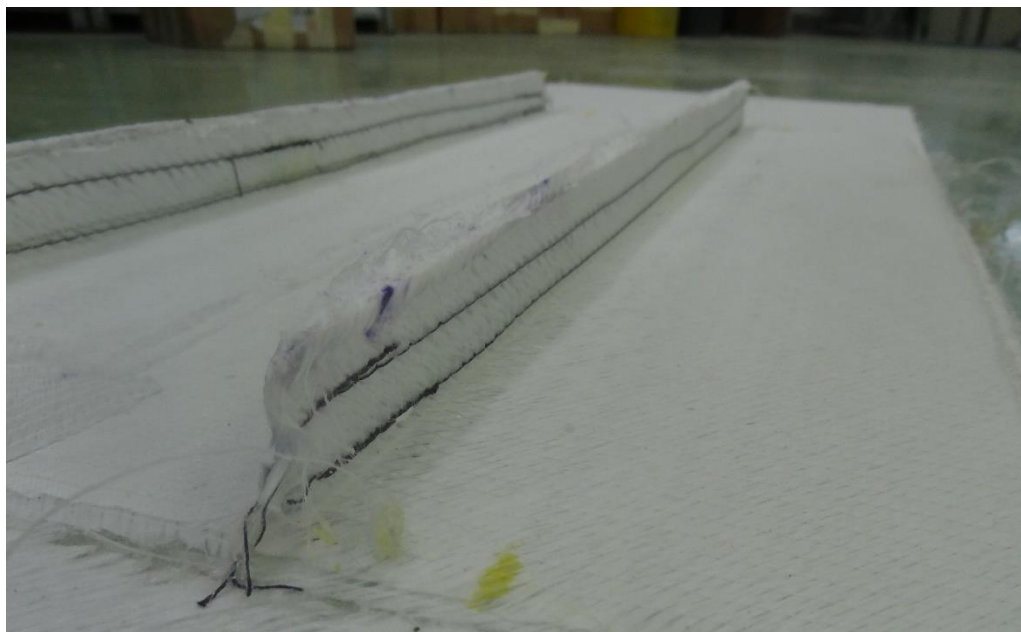
Postup výroby je totožný jako u vzorku 1 s tím, že „I“ profil se cíleně umístí doprostřed formy aby došlo ke 100% prosycení. Na profil se použila již zmiňovaná sešitá výztuž a pryskyřice byla smíchána s 2% MEKP.



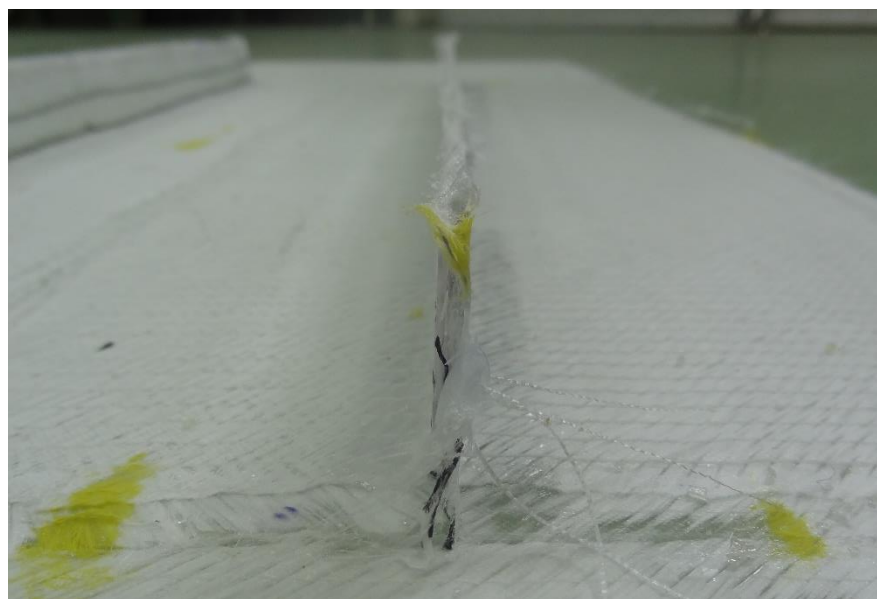
Obr. 49. Rozložení formy při prosycování výztuží

Zhodnocení

Při vzorku 2 bylo snahou eliminovat chyby z prvního pokusu. To se podařilo a po odformování nebyly nalezeny žádné vady. Je třeba zmínit, že při vakuové infuzi a výrobě kompozitních profilů dochází k propadu na pohledové straně. Avšak pohledová strana je také bez vady. Odformování nastalo po 1h od začátku infuze a bylo bezproblémové. Dokončení vytvrzovací reakce ještě proběhlo bez působení podtlaku. Tvar profilu je rovný, plně prosycený, nezdeformovaný a stabilní. Experiment považujeme za zdařilý a výsledný výrobek bude testován na ohybové vlastnosti.



Obr. 50. Výrobek s „I“ profilem

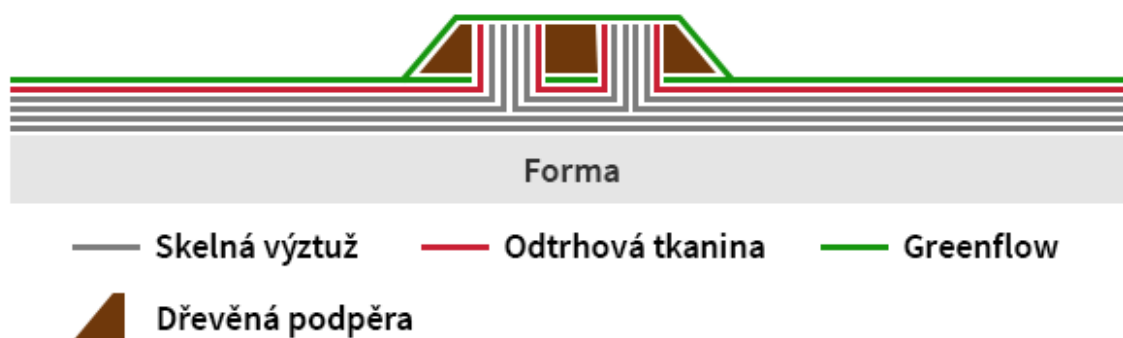


Obr. 51. Výsledný tvar profilu

5.3 „U“ profil

Tab. 5. Použité materiály při výrobě „U“ profilu

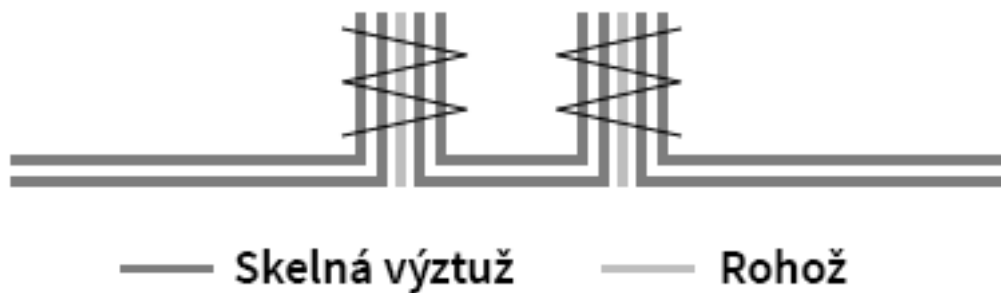
Počet vrstev výztuže	4
Materiál žebra	Skelná tkanina + rohož
Sítovací činidlo	MEKP
Hmotnost použité pryskyřice	3 500g
Hmotnost použitého tvrdidla	70g
Gelcoat	Ano
Pomocné materiály	Odrhová tkanina, greenflow, resintrack, oboustranná těsnící lepicí páska, hadice a konektory, vakuovací folie, podpěry profilu



Obr. 52. Schéma rozložení tkanin a dřevěných podpěr

Zhotovení „U“ profilu

Pro lepší manipulaci při zakládání profilu do formy se požadovaný profil sešil. Přichystání výztuže spočívalo v naměření správných rozměrů a jejich nařezání. Do profilu byla vložena také jedna vrstva rohože kvůli lepšímu toku pryskyřice skrz profil. Takto sešitá výztuž se poté vložila na dvě spodní vrstvy výztuže.



Obr. 53. Schéma sešití „U“ profilu



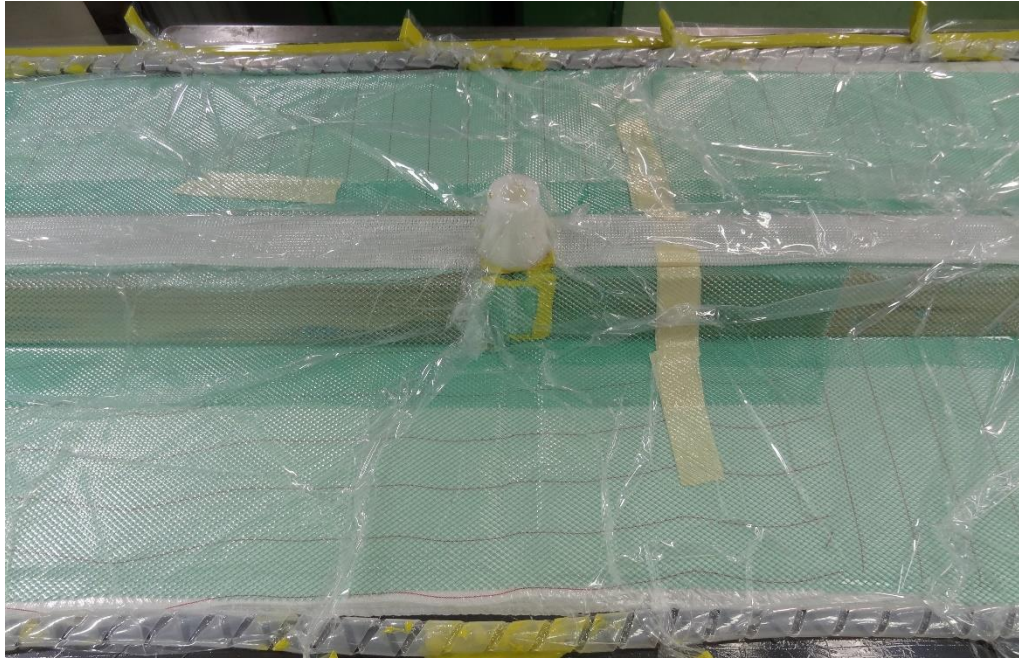
Obr. 54. Sešitý profil ve formě

Výroba

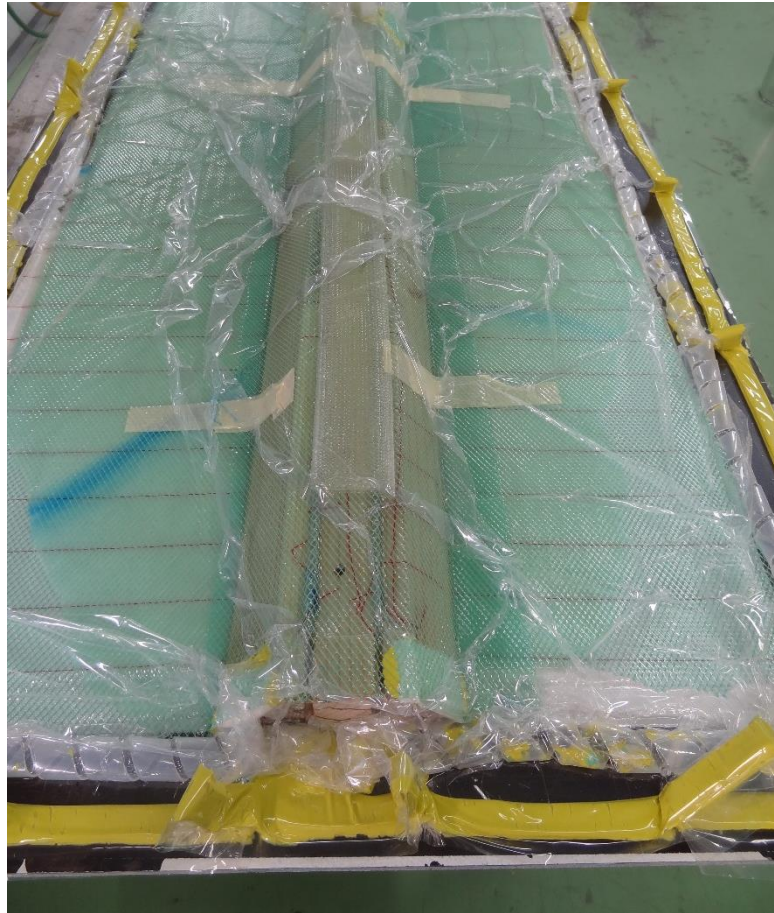
Postup přípravy formy, pomocných materiálů a dvě spodní vrstvy skelných výztuží je stejný jako v případě předchozího výrobku.

Na dvě spodní vrstvy skelné výztuže se položil připravený „U“ profil, který se založil přes celou délku formy. Následovalo položení odtrhové tkaniny a poté se profil musel pomocí šroubů sevřít mezi podpěry. Zahloubení šroubů se proti vniknutí pryskyřice utěsnilo těsnící páskou. Přes podpěry byl umístěn greenflow, který byl přilepen papírovou páskou k formě, aby nedocházelo k jeho posunu při aplikaci podtlaku. Vtok pryskyřice byl zvolen uprostřed

formy, a tak resintrak a přívodním konektorem byl umístěn na podpěry. Tímto je také zabezpečeno, že pryskyřice profil prosytí. Proběhla kontrola podtlaku a bylo možné aplikovat pryskyřici do formy. Množství síťovacího činidla v pryskyřici bylo ponecháno dle předchozího úspěšného experimentu – 2%.



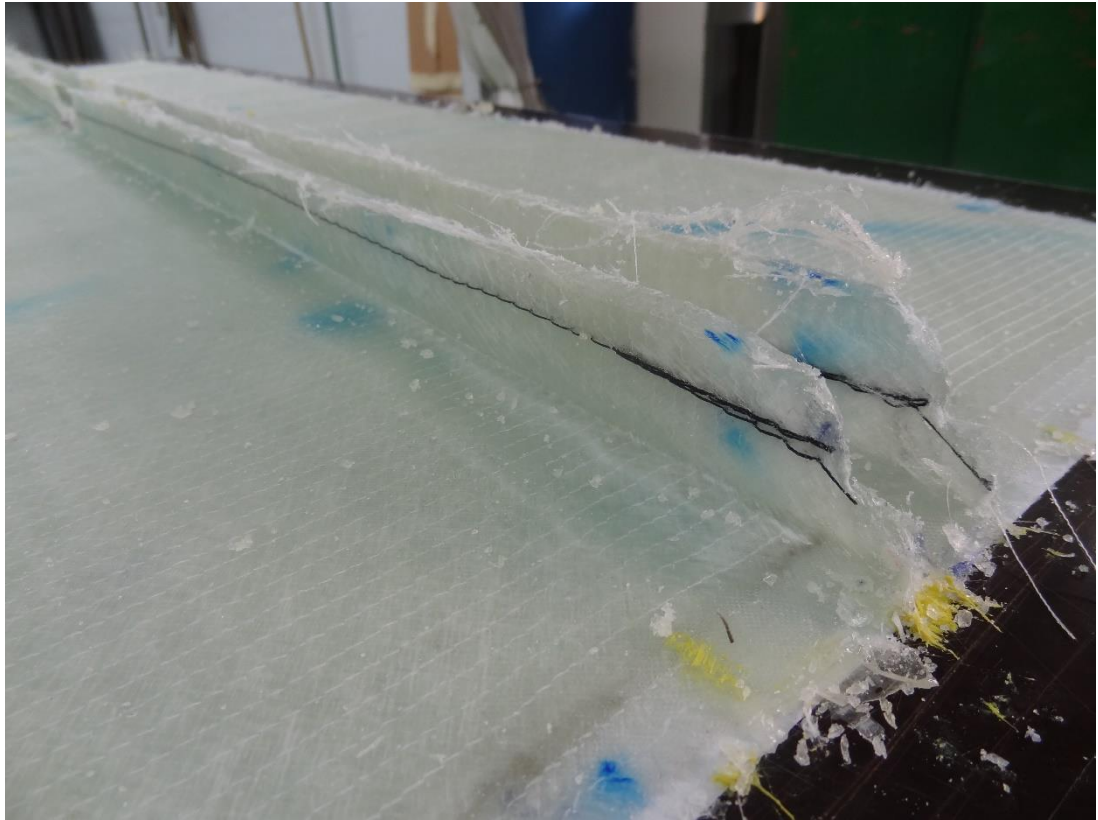
Obr. 55. Umístění resintracku a konektoru na podpěrných deskách



Obr. 56. Výroba „I“ profilu

Zhodnocení

Bylo zvoleno velké množství pryskyřice a tak je část přebytečné pryskyřice odvedena pomocí systému hadiček do rezervoáru. Odformování výrobku proběhlo po 1h od začátku infuze. Průběh odformování nebyl nijak komplikovaný. Dosíťování příčných vazeb proběhlo již bez působení podtlaku. Profil byl zcela prosycen a bez viditelných vad. Pohledová strana také bez vady. Profil „U“ má stálý nedeformovaný tvar. Experiment považujeme za zdařilý a výsledný výrobek bude testován na ohybové vlastnosti.



Obr. 57. Nepohledová strana profilu „U“

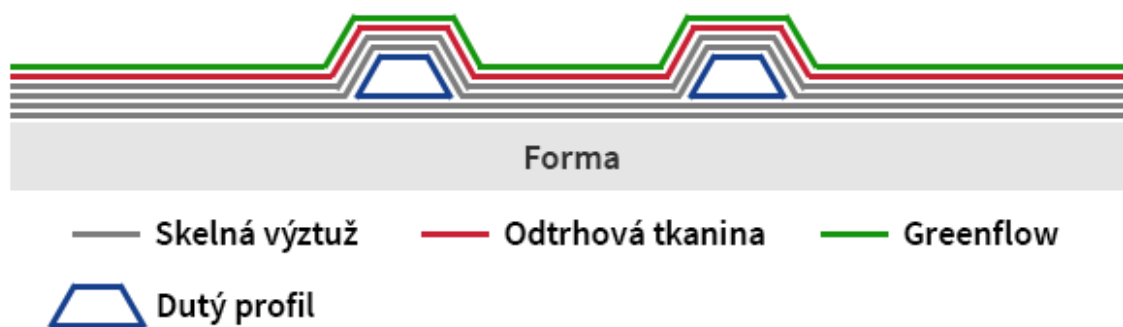


Obr. 58. Kompozitní deska s žebrováním

5.4 Dutý profil

Tab. 6. Použité materiály při výrobě dutého profilu

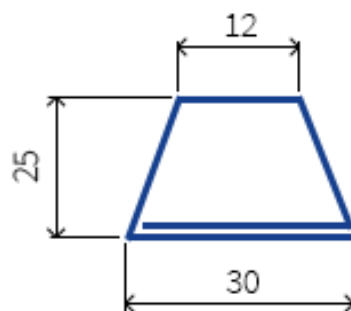
Počet vrstev výztuže	4
Materiál žebra	Skelná tkanina + laminát + 1,8mm karton
Sítovací činidlo	MEKP
Hmotnost použité pryskyřice	3 000g
Hmotnost použitého tvrdidla	70g
Gelcoat	Ano
Pomocné materiály	Odrhová tkanina, greenflow, resintrack, oboustranná těsnící lepicí páska, hadice a konektory, vakuovací folie, dutý profil



Obr. 59. Schéma pro výrobu dutého profilu

Zhotovení dutého profilu

Tvar dutého profilu byl zhotoven pomocí ohybu kartonu o hranu podkladové desky. Jako základní materiál byl použit papírový karton o tloušťce 1,8mm. Aby karton držel tvar lichoběžníku, byl oblepen papírovou páskou. Dutý karton byl otestován, zda vydrží tíhu vakua. Byl na něho tedy aplikován tlak o hodnotě 0,8Bar. Profil nevydržel a zdeformoval se.

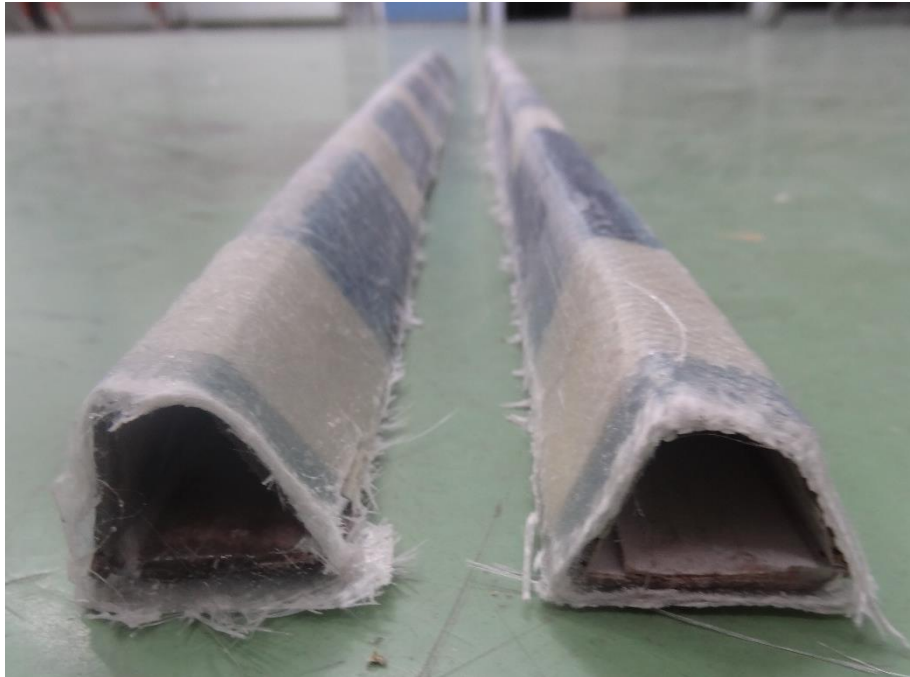


Obr. 60. Rozměry kartonového profilu



Obr. 61. Vpravo vakuem zdeformovaný profil, vlevo nezdeformovaný

Kartonový profil byl ručně laminován epoxidovou pryskyřicí se skelnou rohoží a znova otestován tlakem vakua. Takto laminovaný profil sílu vakua vydržel a byl použit v experimentu.



Obr. 62. Laminovaný kartonový profil

Výroba

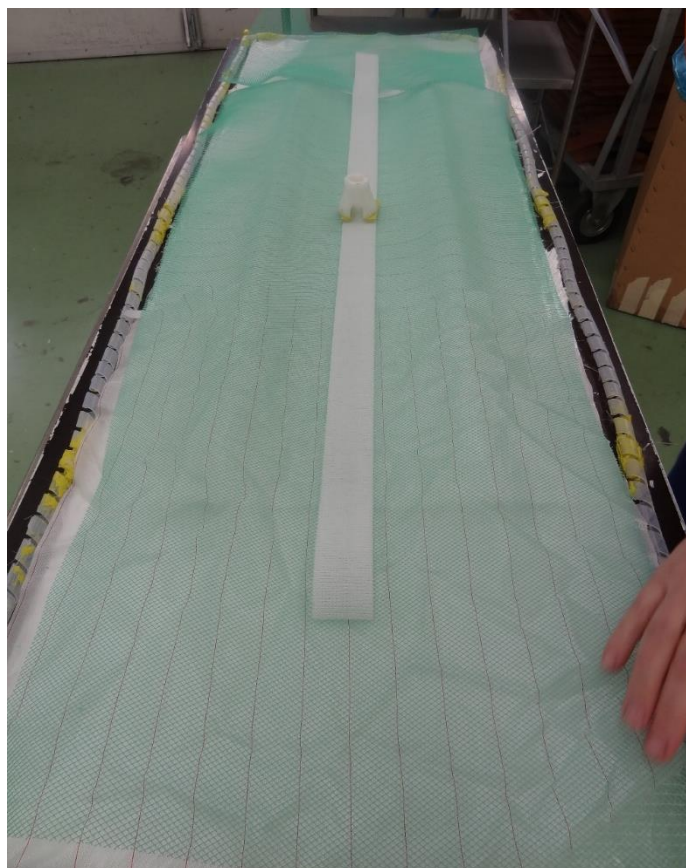
Postup přípravy formy, pomocných materiálů a dvě spodní vrstvy skelných výztuží je stejný jako v případě předchozích výrobků.

Na střed spodních vrstev skelných výztuží se položily laminované duté profily. Přes profily se založily další dvě vrstvy skelných výztuží. Jejich rozměr se musel odměřit dle položených profilů. Zbylé místa se musely vyplnit tak, aby v každém místě byly celkově 4 vrstvy skelné tkaniny na sobě



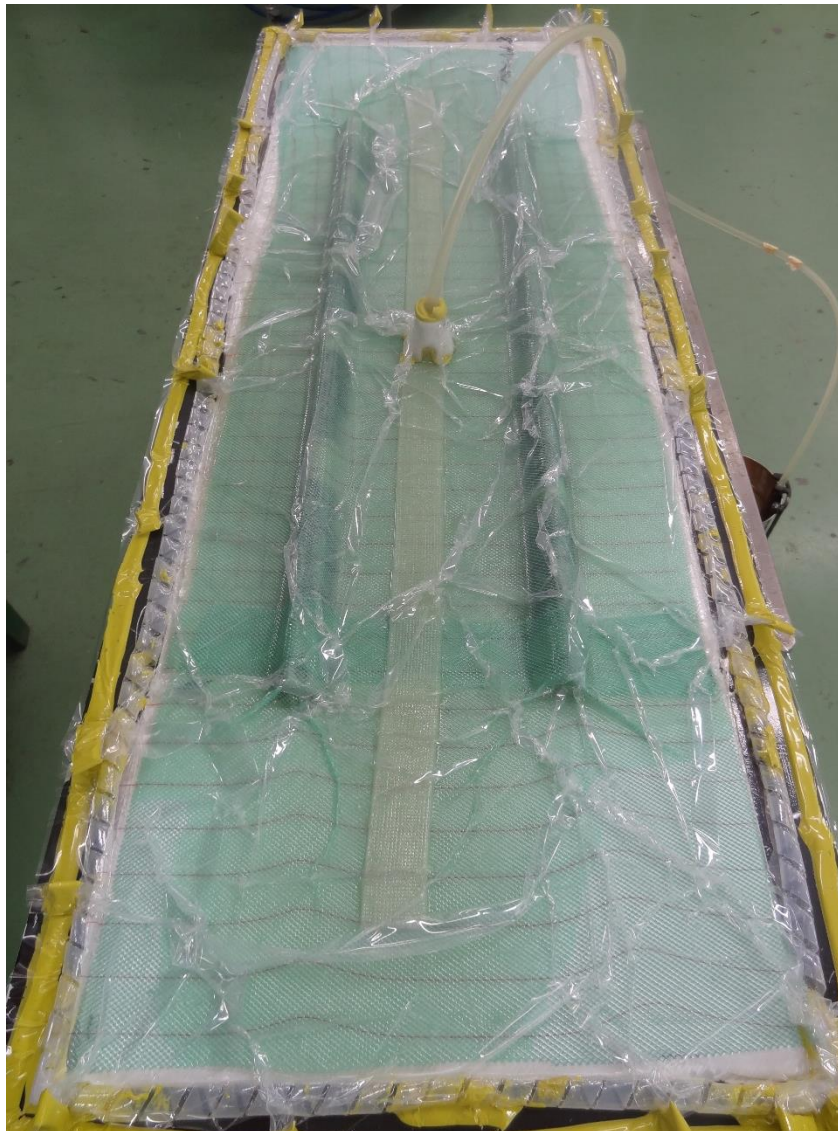
Obr. 63. Duté profily vložené mezi skelné výztuže

Následovalo položení odtrhové tkaniny, green flow a příprava formy k zavakuování. Resin-track s přívodním konektorem byl umístěn doprostřed formy.



Obr. 64. Umístění resintracku doprostřed formy

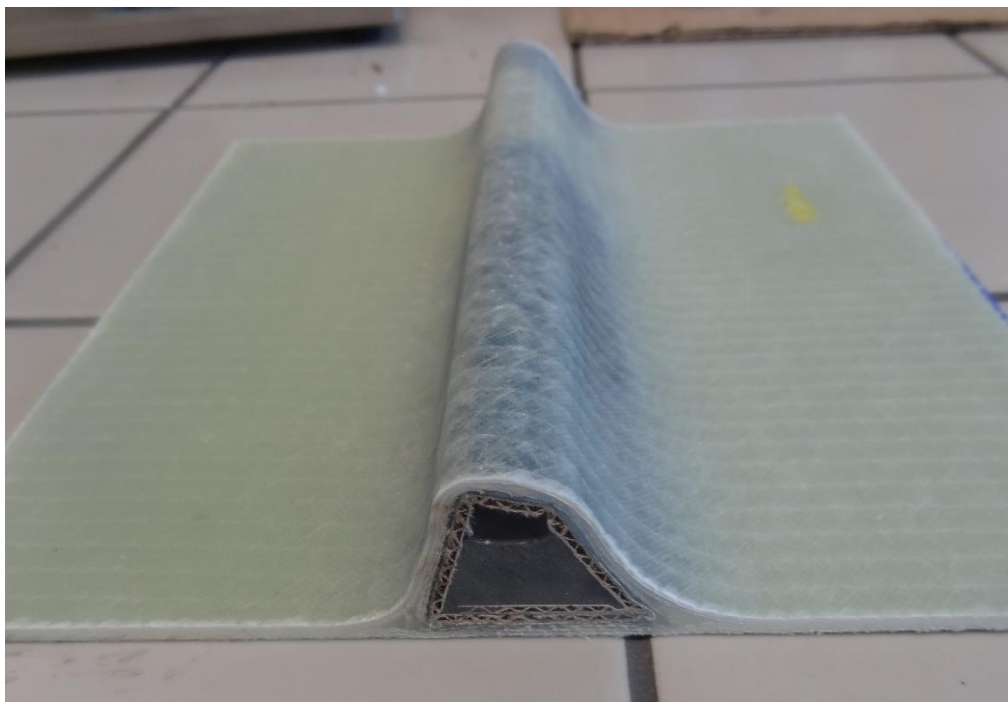
Proběhlo zavakuování a kontrola vakua. Pro výrobu dutého profilu bylo použito 3kg pryskyřice a 70ml MEKP.



Obr. 65. Výrobní proces infuze

Zhodnocení

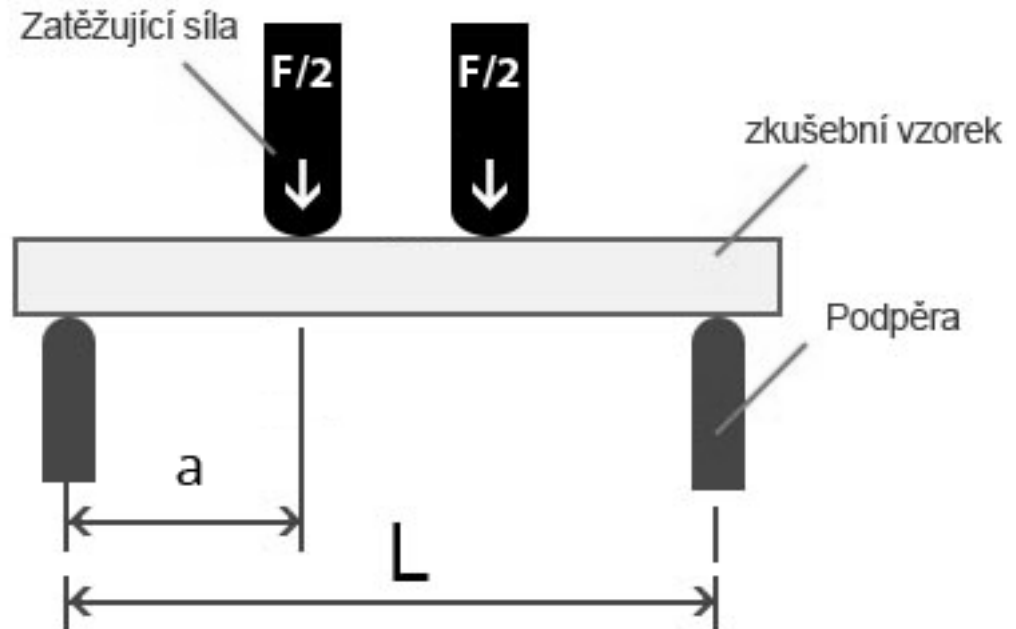
Tok pryskyřice byl rovnoměrný a množství pryskyřice bylo zvoleno ideálně. Laminovaný dutý profil se pod vakuem nezdeformoval. Po odformování a nařezání bylo zjištěno, že dutý profil byl z velké části zaplněn pryskyřicí. Pohledová strana bez vady a výrobek bude testován na ohybové vlastnosti.



Obr. 66. Zaplněný dutý profil

6 TESTOVÁNÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ

Testování ohybových vlastností proběhlo na stroji ZWICK 1456 pomocí 4-bodové ohybové zkoušky.



Obr. 67. 4-bodová ohybová zkouška

U každého vzorku byl vypočítán koeficient zvýšení únosnosti K_u a zvýšení tuhosti K_t . Testované vzorky měli nedefinovatelný tvar, proto bylo potřeba z ohybové zkoušky naměřit maximální sílu F_{max} , kterou daný vzorek vydržel. Pomocí této síly se pak výpočtem zjistilo ohybové napětí σ_{fm} .

$$K_u = \frac{W}{W_0} \quad (8)$$

$$K_t = \frac{J}{J_0} \quad (9)$$

$$M_{max} = \frac{1}{2} F a \text{ [N.mm]} \quad (10)$$

$$W_0 = \frac{J_z}{y} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (11)$$

$$\sigma_{fm} = \frac{M_{max}}{W_0} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

Ohybové napětí pro složený průřez z více materiálů:

$$\sigma_i = \frac{E_i M}{E_1 J_r} y_{tr} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

$$J_r = J_1 + \frac{E_2}{E_1} J_2 \text{ [mm}^4\text{]} \quad (14)$$

Hodnoty jako kvadratický moment průřezu J_r a poloha těžiště y byla odečtena z programu CATIA.

6.1 Výpočet ohybové tuhosti a únosnosti

Aby bylo dosaženo relevantních výsledků při výpočtu koeficientu zvýšení tuhosti K_t a únosnosti K_u , byla zvolena jednotná rozteč profilů $t=150\text{mm}$.

6.1.1 Tuhost

Tab. 7. Zvýšení tuhosti

Vzorek	J [mm ⁴]	J ₀ [mm ⁴]	K _t [-]
PET pěna	47890	535,94	89,36
U profil	55070	337,5	163,17
I profil	40550	337,5	120,15
Duty profil	10500	535,94	19,59

Nejvyšší zvýšení tuhosti jsme dosáhli u profilu ve tvaru „U“, kde nastalo zvýšení 162x oproti desce bez profilu.

6.1.2 Únosnost

Tab. 8. Zvýšení únosnosti

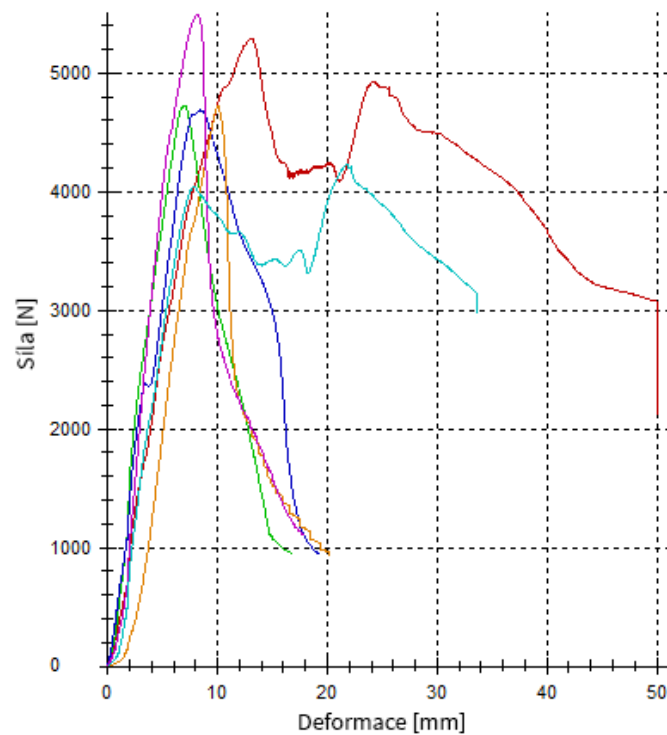
Vzorek	J [mm ⁴]	J ₀ [mm ⁴]	K _t [-]
PET pěna	2937,32	306,25	9,59
U profil	2097,90	225	9,32
I profil	1315,28	225	5,85
Duty profil	472,97	306,25	1,54

Nejvyšší zvýšení únosnosti jsme dosáhli u profilu ve tvaru „I“, kde nastalo zvýšení 5,85x oproti desce bez profilu.

6.2 Testování „U“ profilu



Obr. 68. Testování vzorku s profilem „U“

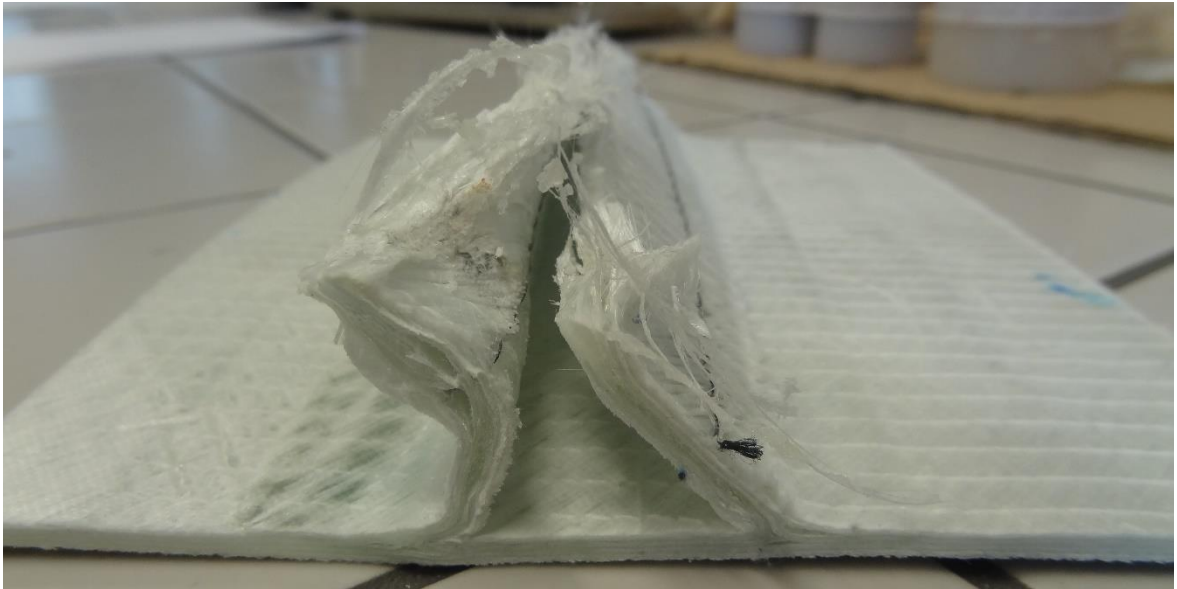


Obr. 69. Ohybové křivky profilu „U“

Tab. 9. Naměřené a vypočítané hodnoty profilu U

n=6	F_{\max} [N]	ε_{fM} [%]	ε_{fM} [mm]	σ_{fm} [MPa]
\bar{x}	4860	1,6	11,1	52,76
s	457	0,8	5,4	-
v	9,41	48,1	48,92	-

Maximální sílu, kterou vzorek vydržel, byla **4860 +/- 9,41 N**. Ohybové napětí vztahované na průřez profilu $\sigma_{fm} = 52,76\text{MPa}$.



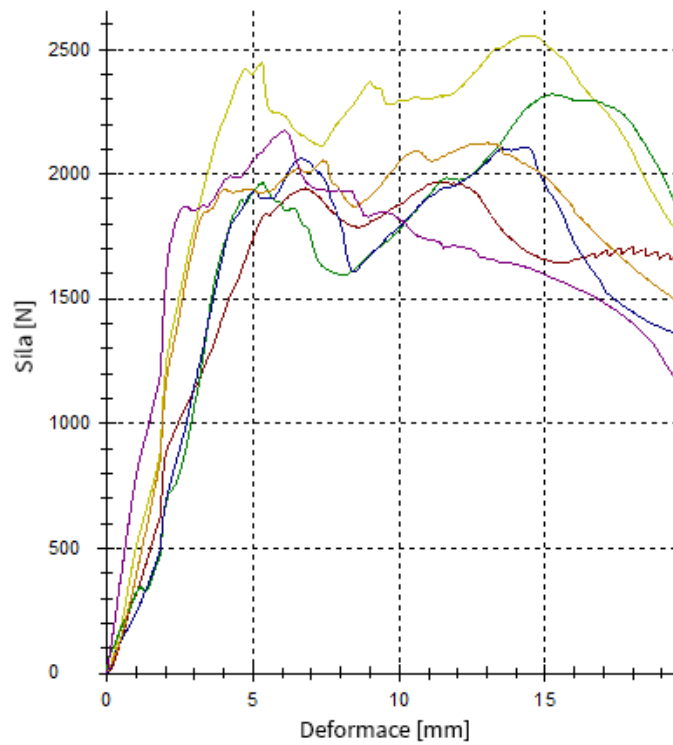
Obr. 70. Zdeformovaný profil

6.3 Testování „I“ profilu

Vzorek musel být položen pohledovou stranou na podpěry, kvůli stabilitě tělesa.



Obr. 71. Ohybové testování profilu „I“

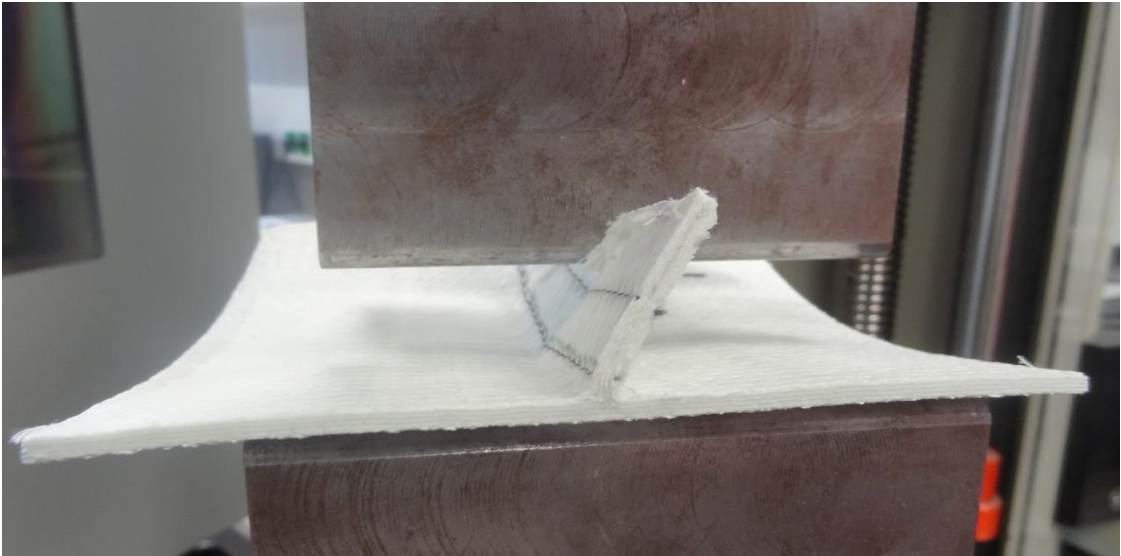


Obr. 72. Ohybové křivky „I“ profilu

Tab. 10. Naměřené a vypočítané hodnoty profilu I

n=6	F_{\max} [N]	ε_{fM} [%]	ε_{fM} [mm]	σ_{fm} [MPa]
\bar{x}	2210	1,7	12,4	36,85
s	206	0,5	3,3	-
v	9,32	27,07	26,91	-

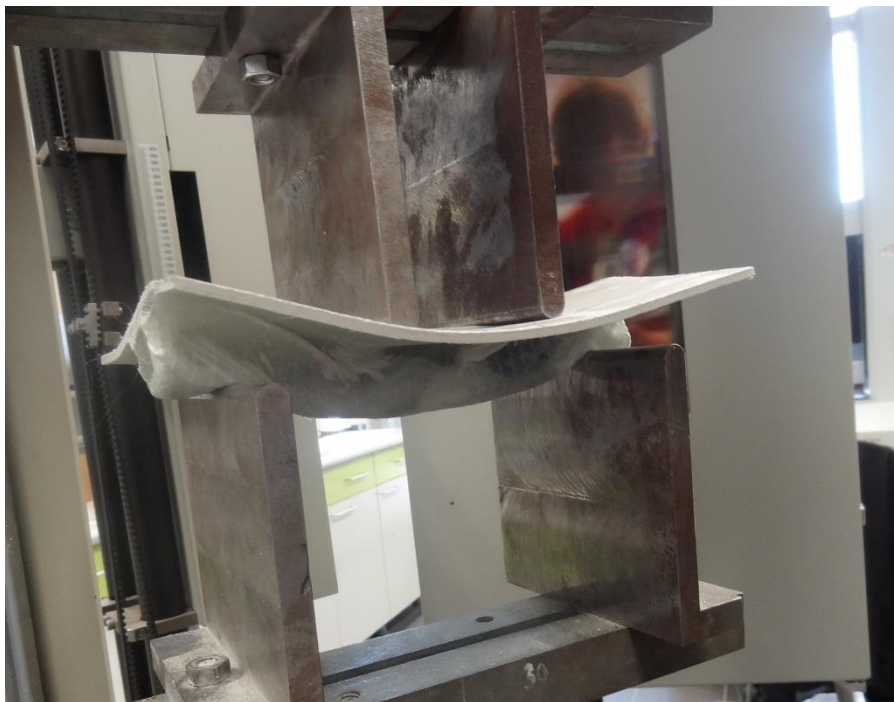
Maximální sílu, kterou vzorek vydržel, byla **2210 +/- 9,32 N**. Ohybové napětí vztažené na průřez profilu $\sigma_{fm} = 36,85\text{MPa}$.



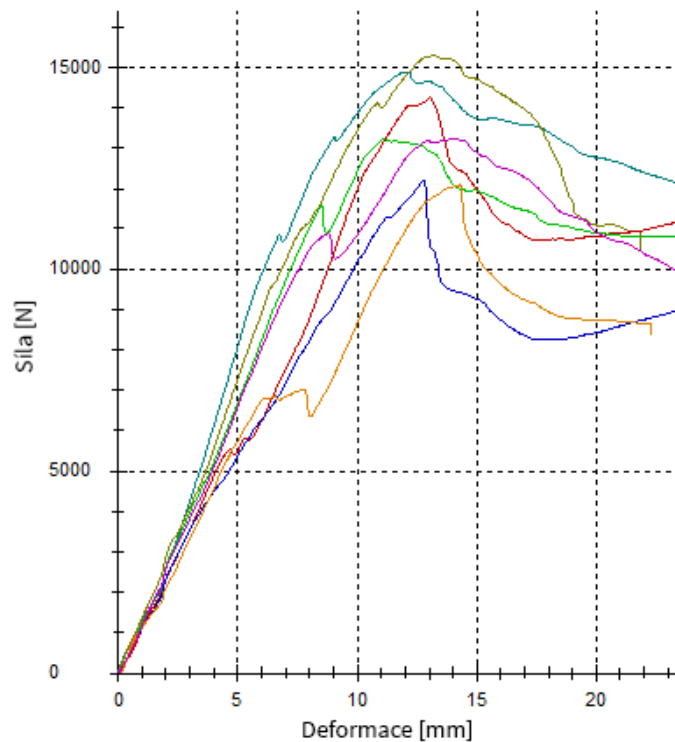
Obr. 73. Deformace profilu při testování

6.4 Testování dutého profilu

Dutý profil je složen ze dvou materiálů. Bylo potřeba hodnoty vypočítat s ohledem na tuto odlišnost. 1-pryskyřice se skelnou výztuží, 2-čistá pryskyřice.



Obr. 74. Dutý profil při testování ohybem



Obr. 75. Ohybové křivky dutého profilu

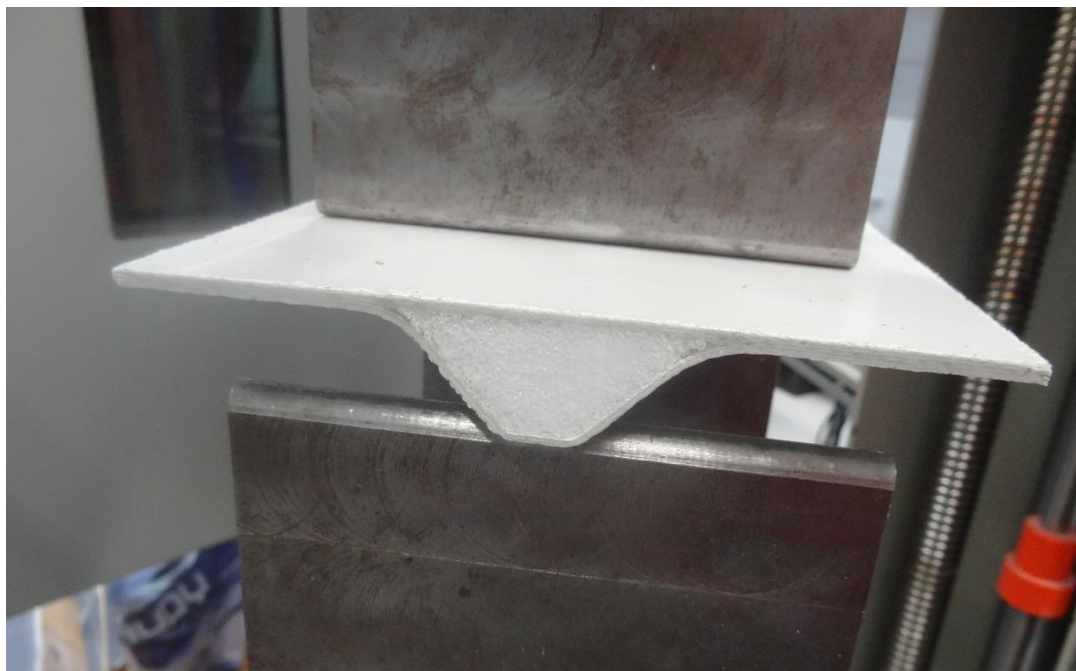
Tab. 11. Naměřené a vypočítané hodnoty dutého profilu

n=7	F_{\max} [N]	ε_{fM} [%]	ε_{fM} [mm]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	σ_{fm1} [MPa]	σ_{fm2} [MPa]
\bar{x}	13600	1,8	13	6410	2760	42,01	18,09
s	1260	0,2	1,1	-	-	-	-
v	9,27	8,77	8,8	-	-	-	-

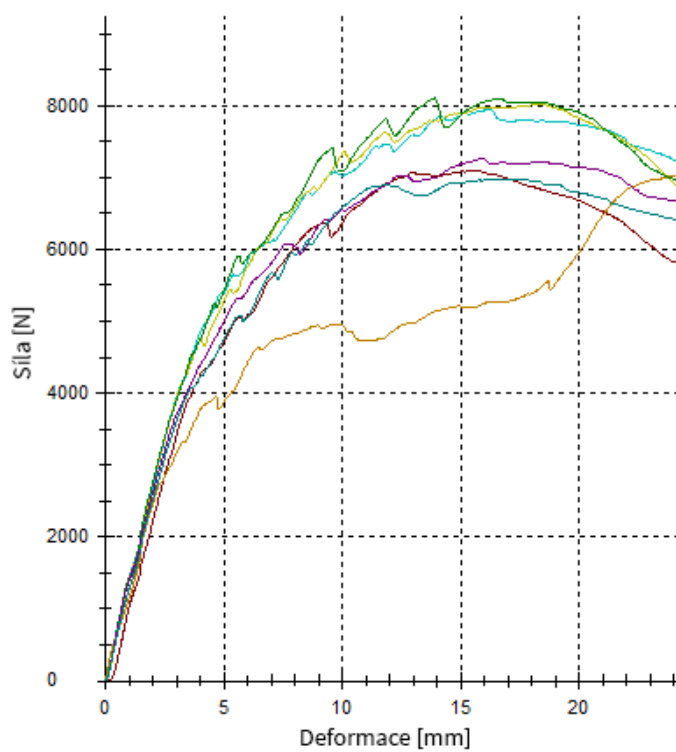
Maximální sílu, kterou vzorek vydržel, byla **13600 +/- 9,27 N**. Ohybové napětí vztažené na průřez profilu $\sigma_{fm1} = 42,01\text{MPa}$ a $\sigma_{fm2} = 18,09\text{MPa}$.

6.5 Testování profilu s PET pěnou

PET profil je složen ze dvou materiálů. Bylo potřeba hodnoty vypočítat s ohledem na tuto odlišnost. 1-pryskyřice se skelnou výztuží, 2-PET pěna.



Obr. 76. Vzorek s PET pěnou při 4-bodovém ohybu



Obr. 77. Ohybové křivky profilu s PET pěnou

Tab. 12. Naměřené a vypočítané hodnoty profilu s PET pěnou

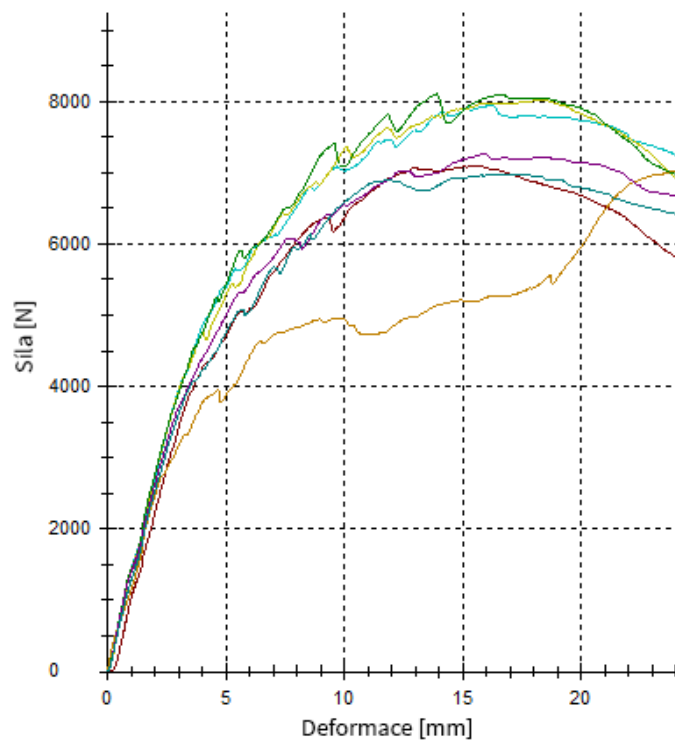
n=7	F_{\max} [N]	ε_{fM} [%]	ε_{fM} [mm]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	σ_{fm1} [MPa]	σ_{fm2} [MPa]
\bar{x}	7490	3,1	17,4	6410	120	109,23	2,04
s	506	0,6	3,4	-	-	-	-
v	6,75	19,36	19,69	-	-	-	-

Maximální sílu, kterou vzorek vydržel, byla **7490 +/- 6,75 N**. Ohybové napětí vztažené na průřez profilu $\sigma_{fm1} = 109,23\text{MPa}$ a $\sigma_{fm2} = 2,04\text{MPa}$.

6.6 Testování tělíska 20x3,5x100mm



Obr. 78. 4-bodový ohyb tělíska



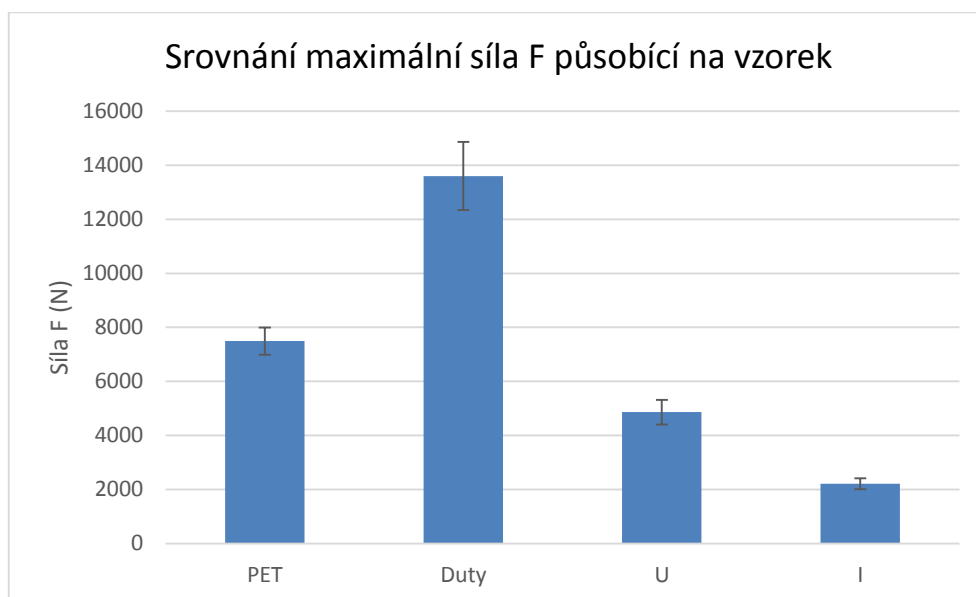
Obr. 79. Ohybové křivky tělíska 3,5x20mm

Tab. 13. Naměřené hodnoty tělíska 3,5x20x100

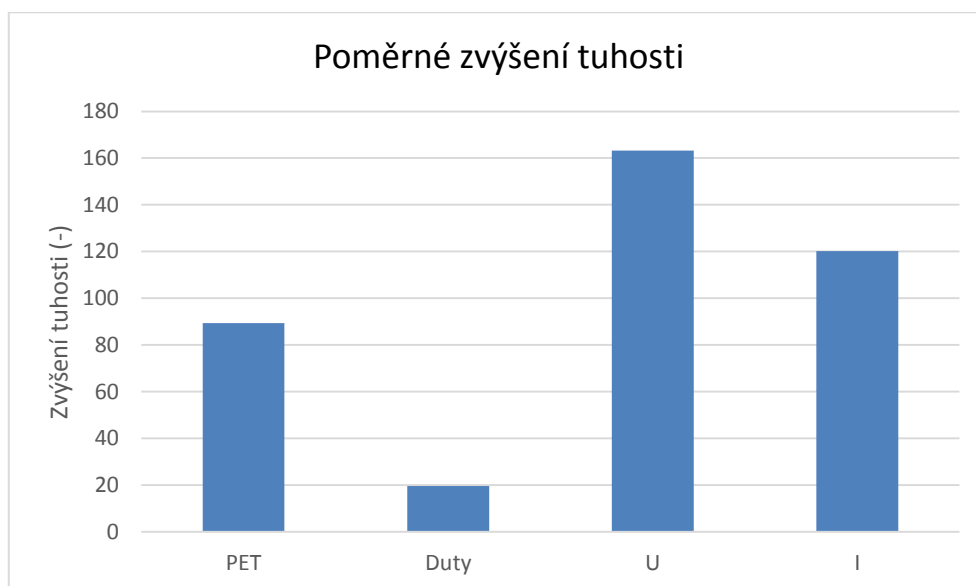
n=10	E_f [MPa]	σ_{fy} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]	W_{fM} [N.mm]	a [mm]	b [mm]	S [mm ²]
x	6410	91,1	133	3,5	3095,24	3,5	20	70
s	648	11	11,9	0,6	777,99	0	0	0
v	10,11	12,12	8,99	16,86	25,14	0	0	0

Ohybové napětí vztažené na průřez profilu tělíska $\sigma_{fm} = 133 \pm 8,99$ MPa.

6.7 Zhodnocení testovaných vzorků



Obr. 80. Hodnoty maximální působící síly z ohybové zkoušky včetně chybových úseček



Obr. 81. Graf poměrného zvýšení tuhost vzorků



Obr. 82. Výsledné ohybové maximálního napětí z testování

Technologií vakuovou infuzí byly vyrobeny 4 vzorky s výztužnými profily. Profily se zvyšuje tuhost. U každého vzorku jsme několikanásobně zvětšili tuhost, největší zvětšení bylo zaznamenáno u profilu „U“, kde byla tuhost zvětšena 163,17krát oproti vzorku bez profilu. Vzorek není na výrobu s pomocí podpěr složitý a můžeme konstatovat, že je dobře navržený. Maximální ohybové napětí vzorku „U“ je 52,76MPa a sílu kterou kompozit vydržel, byla 4860N.

Ze srovnání maximální síly působící na vzorek, lze vidět, že dutý profil vydržel maximální sílu až 13600N. Dutý profil nebyl vyroben podle představ a vnitřní část byla zaplněna pryskyřicí. Výrobek je tedy dost obtížně hodnotit, neboť je mezi výztužemi také vložen laminovaný kartonový profil, který také ovlivňuje mechanické vlastnosti.

Je třeba brát v úvahu, že některé vzorky nejsou z jednoho materiálu a teoretické hodnoty se od skutečných můžou lišit. Dále pak působením podtlaku vakua nejsou výrobky v průřezu úplně symetrické a velmi obtížné přesně zjistit průřezové charakteristiky.

7 APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ VYZTUŽENÝMI PROFILY V PRAXI

Praktickým experimentem bylo potvrzeno, že kompozitní materiály vyztuženými profily lze vyrobit v jednom výrobním cyklu. Měřením také bylo ověřeno, že jejich mechanické vlastnosti se zvýšili. Takto vyrobené výrobky určitě mají uplatnění v praxi.

Chemickém a agresivním prostředí: rošty, konstrukční profily, schody, podlahy

Průmyslové budovy: konstrukční profily, díly pro stavbu lešení.

Městské prvky: lavičky, můstky, prvky na koupališti, kanálové poklopy, zastávky, protipodňové zábrany

Přepavní průmysl: Zvýšení mechanických vlastností přepravních systémů

Doprava: Trup lodí, trupy letadel

Experiment v této diplomové práci je vyráběn pouze na rovné desce. Pro aplikaci v praxi bude určitě nutné vymyslet výrobu i jiných tvarů, než jen rovná deska. Např. při výrobě trupu letadla by bylo potřeba podpěrné desky zkonstruovat tak, aby kopírovali tvar vnitřní části trupu. Toho by šlo docílit zhotovením pryžových podpěr, které by umožnily kopírovat požadovaný tvar.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá výrobou kompozitního materiálu s polymerní matricí a výztužným profilem vyrobeným v jednom výrobním cyklu. Samotné výztužný profil se vkládalo mezi skelné výztuže a byly vyrobeny celkem 4 typy profilů. Jako zvolená technologie byla použita vakuová infuze pod pružnou folii, s kterou jsem měl zkušenosti z mé bakalářské práce. Praktická část je zaměřena na dokumentaci postupu výroby, který byl ve všech případech obdobný. Výroba proběhla ve firmě FORM s.r.o., která disponuje potřebnými materiály a zařízením. S pomocí odborné obsluhy se úspěšně podařilo vyrobit požadované profily.

Profil s PET pěnou byl, co se týče výroby jednoduchý. Výroba proběhla bez problému a po odformování byl výsledný výrobek bez viditelných vad. Maximální sílu, který výrobek vydržel, byla 7490N. Jeho teoretické zvýšení tuhosti bylo zvětšeno 89krát, oproti výrobku bez profilu. Výhodou je jednoduchost výroby.

U profilu ve tvaru „I“ byly použity dřevěné podpěry, které fixovali tvar budoucího žebra. Při prvním pokusu výroby nastaly komplikace s pokládáním skelných výztuží ve tvaru požadovaného profilu do formy. Skelné výztuže nedržely požadovaný tvar a tak se muselo výztužné žebro sešít a vložit do formy. Po odformování bylo ale zjištěno, že žebro není zcela prosyceno a tak se experiment opakoval. Při druhém pokusu po odformování nebyly zjištěny žádné viditelné vady. Výrobek byl tedy otestován ohybovou zkouškou a sílu, kterou vydržel, byla 2210N.

Výroba profilu „U“ vycházela z předchozího experimentu a byl vytvořen kompozitní výrobek, který vydržel sílu 4860N. Pohledová strana byla bez viditelných vad, což taky považujeme za úspěch, protože při výrobě obdobných výrobků vznikají vady ve formě prohlubní.

Cílem dalšího experimentu bylo vytvořit dutý profil. Toho jsem chtěl docílit vložením kartonového profilu mezi výztuže. Takto vytvořený profil ale nevydržel tlak vakua a zdeformoval se. Pro zpevnění profilu z kartonu se nechal ručně laminovat. Výsledný laminovaný profil působil velmi pevně a byl tak použit ve výrobě. Po odformování ale bylo zjištěno, že výsledný profil, který měl být dutý, byl zaplněn pryskyřicí. I takto vytvořený byl otestován ohybem a maximální sílu, kterou výrobek vydržel, činila 13600N.

V diplomové práci se podařilo vytvořit 4 kompozitní profily, které měli výsledný tvar velmi stabilní, nezdeformovaný a kolmý k podstavě. Využití těchto výrobků se určitě najde v konstrukční aplikaci, neboť se žebrováním zvyšuje jejich tuhost.

Byl bych rád, kdyby tato předložená diplomová práce byla přínosem pro rozvoj výroby kompozitních materiálů s výztužnými žebry.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Pra-ha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.
- [3] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [4] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [5] RUSNÁKOVÁ S.: Přednášky z předmětu zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK; FT UTB. 2012
- [6] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [7] VAŇKOVÁ, M. Měření kríповých vlastností polymerních kompozitů se skleněnou výztuží připravených technologií pultruze. Diplomová práce. Vedoucí práce Petr Slobodian , 2011. Zlín: FT UTB 84 s.
- [8] COMPOSITE WORLD. *Closed molding: Vacuum Infusion Process* [online]. [cit. 2014-11-04]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/knowledgecenter/closed-molding/Closed-Mold-Process/Vacuum-Infusion-Process>
- [9] What is resin infusion (or vacuum infusion)?. *VACMOBILES.COM*. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html
- [10] Vacuum Bagging Techniques. WEST SYSTEM. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.westsystem.com/ss/assets/HowTo-Publications/Vacuum-Bagging-Techniques.pdf>
- [11] Glossary. COMPOSITE ONE. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.compositesone.com/glossary/>
- [12] METHODS FOR DETECTING DEFECTS IN COMPOSITE REHABILITATED CONCRETE STRUCTURES. OREGON DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.oregon.gov/odot/td/tp_res/docs/reports/detect_defects_comp_structures.pdf
- [13] Technologie jejich popis a schémata. Havel-composites.com [online]. 2005 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>

- [14] Close Molding: Light Resin Transfer Molding. *Composite World* [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/knowledgecenter/closed-molding/Closed-Mold-Process/Resin-Transfer-Molding>
- [15] Vacuum foil infusion / Resin transfer moulding. Reichhold. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/reichhold/vacuum-foil-rtm-process-emea/37855-152670.html>
- [16] Infuzní technologie výroby kompozitů a jejich simulace v MKP. F. Martaus VZLÚ, a.s. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Infuze_VZLU.pdf
- [17] Guide to Composites. Gurit.com. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv5webpdf.pdf>
- [18] Erben, M. Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií [online]. Pardubice, 2008 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf>
- [19] The VIP Primer: Vacuum Infusion Process. GRP GURU. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.grpguru.com/vipupdate.asp>
- [20] Viskozita. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Viskozita>
- [21] AIRTECH. *Catalogue Airtech* [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://catalogue.airtech.lu/catalogue_pdf.php?lang=EN
- [22] Makes RTM easier. APLICATOR SYSTEM AB. *RI 15* [online]. Sweden [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://aplicator.co.uk/prod/ri15.htm>
- [23] PAVLICA, R. Vytvrzování polymerní matrice kompozitů, doktorská disertační práce. Zlín, UTB FT, 2003
- [24] Pultruze. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pultruze>
- [25] Kompozitní profily PREFEN. PREFA KOMPOZITY, a.s. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/produkt/kompozitni-profily-prefen>
- [26] Materiálové vlastnosti: Vlastnosti kompozitů PREFEN. PREFA KOMPOZITY, a.s. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/materialove-vlastnosti>
- [27] Antikorozivní a chemický průmysl. GDP KORAL S.R.O. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/antikorozivni-a-chemicky-prumysl/p92>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

n	počet měření
E_f	modul pružnosti v ohybu [MPa]
σ_{fy}	napětí na horní mez kluzu v ohybu [MPa]
σ_{fM}	napětí na mezi úměrnosti v ohybu [MPa]
ε_{fM}	deformace ohybem [%]
W_{fM}	práce při mezi úměrnosti v ohybu [N.mm]
h	výška vzorku [mm]
b	šířka vzorku [mm]
S	plocha průřezu vzorku [mm ²]
F_{max}	maximální síla [N]
W	ohybový modul průřezu [mm ³]
J	kvadratický moment průřezu [mm ⁴]
t	rozpětí profilů [mm]
M	Ohybový moment [N.mm]
K_u	Koeficient zvýšení únosnosti
K_t	Koeficient zvýšení tuhosti
J_r	Redukovaný kvadratický moment průřezu [mm ⁴]
a	Vzdálenost působící síly od podpěry [mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Vakuová technologie pod pružnou folii [15]</i>	11
<i>Obr. 2. Schéma RFI – Resin film infusion [17]</i>	12
<i>Obr. 3. Schéma Light RTM [5]</i>	14
<i>Obr. 4. Schéma lisování prepregů [17]</i>	15
<i>Obr. 5. Fáze evakuace vzduchu [9]</i>	15
<i>Obr. 6. Fáze přívodu pryskyřice [9]</i>	16
<i>Obr. 7. Fáze vytvrzování [9]</i>	16
<i>Obr. 8. Fáze odformování výrobku [9]</i>	16
<i>Obr. 9. Tlak před a po aplikaci vakua [10]</i>	18
<i>Obr. 10. Pit and pinholes [5]</i>	19
<i>Obr. 11. Makroskopický pohled skrz kompozit [5]</i>	19
<i>Obr. 12. Delaminace kompozitního výrobku [5]</i>	20
<i>Obr. 13. Oblast velkého množství pryskyřice [5]</i>	20
<i>Obr. 14. Zvlnění výztuže [12]</i>	21
<i>Obr. 15. Rozdělení vývěv [18]</i>	24
<i>Obr. 16. A: Membránová vývěvy, B: dvoukomorová Membránová vývěva [18]</i>	24
<i>Obr. 17. A: Dvoustupňová rotační olejová vývěva, B: rotační olejová vývěva. [18]</i> ..	25
<i>Obr. 18. A: Schéma vodní vývěvy, B: plastová vodní vývěvy [18]</i>	26
<i>Obr. 19. Přepadová nádoba s měřičem podtlaku firmy AIRTECH [21]</i>	26
<i>Obr. 20. Regulátor vakua firmy AIRTECH [21]</i>	27
<i>Obr. 21. Injekční zařízení pro RTM firmy Aplicator Systém AB [22]</i>	28
<i>Obr. 22. Odsávací rohož [21]</i>	29
<i>Obr. 23. Distribuční médiu [21]</i>	29
<i>Obr. 24. Odtrhová tkanina [21]</i>	30
<i>Obr. 25. Aplikace v chemické čistírně [27]</i>	32
<i>Obr. 26. Aplikace na větrné elektrárně [27]</i>	32
<i>Obr. 27. Aplikace při výrobě sportovních luků [27]</i>	33
<i>Obr. 28. Aplikace ve vodárně [27]</i>	33
<i>Obr. 29. Ukázka rozdělení profilu dle tvaru firmy Prefa kompozity a.s. [25]</i>	34
<i>Obr. 30. Pultruzní linka [24]</i>	37
<i>Obr. 31. Profily vyrobené technologií pultruze [25]</i>	39
<i>Obr. 32. Dřevěné podpěry</i>	43

<i>Obr. 33. Schéma rozložení tkanin a PET pěny</i>	44
<i>Obr. 34. Umístění PET pěny ve formě</i>	45
<i>Obr. 35. Příprava formy</i>	46
<i>Obr. 36. Zavakuovaná forma pod pružnou folii</i>	47
<i>Obr. 37. Přívod pryskyřice při infuzi</i>	48
<i>Obr. 38. Výsledný výrobek s PET pěnou</i>	48
<i>Obr. 39. Připravený vzorek pro testování</i>	49
<i>Obr. 40. Schéma rozložení tkanin a dřevěných podpěr</i>	50
<i>Obr. 41. Použití dřevěných podpěr ve formě</i>	51
<i>Obr. 42. Zavakuovaná forma s „I“ profilem</i>	52
<i>Obr. 43. Tečení pryskyřice při procesu infuze</i>	53
<i>Obr. 44. Výsledný žebrovaný výrobek</i>	54
<i>Obr. 45. Neprosycené místo na výsledném žebrovaném výrobku</i>	54
<i>Obr. 46. Schéma „I“ profilu ze skelných výztuží</i>	55
<i>Obr. 47. Sešitý „I“ profil</i>	55
<i>Obr. 48. Měření geltimu vývojové pryskyřice</i>	56
<i>Obr. 49. Rozložení formy při prosycování výztuží</i>	57
<i>Obr. 50. Výrobek s „I“ profilem</i>	58
<i>Obr. 51. Výsledný tvar profilu</i>	58
<i>Obr. 52. Schéma rozložení tkanin a dřevěných podpěr</i>	59
<i>Obr. 53. Schéma sešití „U“ profilu</i>	60
<i>Obr. 54. Sešitý profil ve formě</i>	60
<i>Obr. 55. Umístění resintracku a konektoru na podpěrných deskách</i>	61
<i>Obr. 56. Výroba „I“ profilu</i>	62
<i>Obr. 57. Nepohledová strana profilu „U“</i>	63
<i>Obr. 58. Kompozitní deska s žebrováním</i>	63
<i>Obr. 59. Schéma pro výrobu dutého profilu</i>	64
<i>Obr. 60. Rozměry kartonového profilu</i>	65
<i>Obr. 61. Vpravo vakuem zdeformovaný profil, vlevo nezdeformovaný</i>	65
<i>Obr. 62. Laminovaný kartonový profil</i>	66
<i>Obr. 63. Duté profily vložené mezi skelné výztuže</i>	67
<i>Obr. 64. Umístění resintracku doprostřed formy</i>	67
<i>Obr. 65. Výrobní proces infuze</i>	68

<i>Obr. 66. Zaplněný dutý profil</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 67. 4-bodová ohybová zkouška</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 68. Testování vzorku s profilem „U“</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 69. Ohybové křivky profilu „U“</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 70. Zdeformovaný profil</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 71. Ohybové testování profilu „I“</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 72. Ohybové křivky „I“ profilu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 73. Deformace profilu při testování</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 74. Dutý profil při testování ohybem</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 75. Ohybové křivky dutého profilu</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 76. Vzorek s PET pěnou při 4-bodovém ohybu</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 77. Ohybové křivky profilu s PET pěnou.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 78. 4-bodový ohyb tělíska</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 79. Ohybové křivky tělíska 3,5x20mm</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 80. Hodnoty maximální působící síly z ohybové zkoušky</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 81. Graf poměrného zvýšení tuhost vzorků</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 82. Výsledné ohybové maximálního napětí z testování</i>	<i>82</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Klasifikace tlaků dle hodnot [18]</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2. Použité materiály při výrobě kompozitu s PET pěnou</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 3. Použité materiály při výrobě „I“ profilu.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 4. Časové hodnoty geltimu.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 5. Použité materiály při výrobě „U“ profilu</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 6. Použité materiály při výrobě dutého profilu.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 7. Zvýšení tuhosti</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 8. Zvýšení únosnosti.....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 9. Naměřené a vypočítané hodnoty profilu U.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 10. Naměřené a vypočítané hodnoty profilu I</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 11. Naměřené a vypočítané hodnoty dutého profilu.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 12. Naměřené a vypočítané hodnoty profilu s PET pěnou</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty tělíska 3,5x20x100</i>	<i>80</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I – Materiálový list skelné tkaniny Bidiagonal X-E-988

PŘÍLOHA P II - Materiálový list PET pěny AIREX® T90

PŘÍLOHA P III - Materiálový list testovací pryskyřice FR-4/12

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST SKELNÉ TKANINY

BIDIAGONAL X-E-988



DATENBLATT

(nach EN 13473-1)

SAP-MATERIAL-NR.
30000464

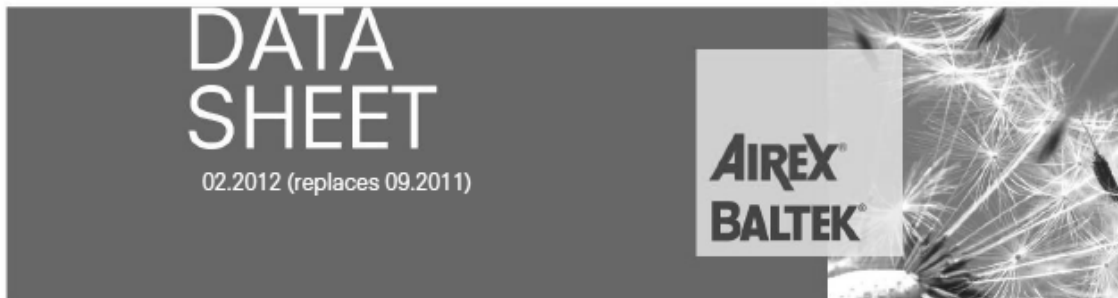
TEXTILE STRUKTUR
7000237

ARTIKEL-BEZEICHNUNG
X-E-988g/m²-1270mm

KONSTRUKTION	FLÄCHENGEWICHT [g/m ²]	TOLERANZ [+/- %]	MATERIAL
<i>Oberlage</i>			
45 °	476	5	E-Glas 900 tex
90 °	29	5	E-Glas 300 tex
0 °	1	5	E-Glas 34 tex
-45 °	476	5	E-Glas 900 tex
<i>Unterlage</i>			
NÄHFADEN:	6 g/m ²	+/- 1 g/m ²	PES 76 dtex

Nähbindung:	Franse	Nähfeinheit :	5,0
Breite::	1.270 mm	Gesamttoleranz:	5,1 %
Flächengewicht:	988 g/m ²		

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST PET PĚNY AIREX® T90



AIREX® T90

Easy Processing Structural FST Foam

CHARACTERISTIC

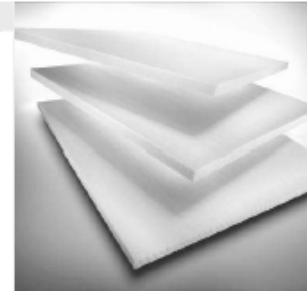
- Superior fire resistance (FAR 25.853; NF 16-101; DIN 5510)
- Outstanding fatigue strength
- Excellent long term thermal stability up to 100 °C (212 °F)
- Best thermal stability in process up to 150 °C (302 °F)
- Good thermal insulation
- Highly consistent material properties
- Easy to process with all types of resin and lamination processes
- Good adhesion (skin-to-core bond)
- Very high chemical stability
- No water absorption, no after-expansion, no outgassing

APPLICATIONS

- **Road and Rail**
Floors, sidewalls, front ends, interiors, roofs, engine covers
- **Marine**
Decks, interiors, superstructures
- **Industrial**
Covers, containers, x-ray tables, sporting goods
- **Architecture and Construction**
Roofs, claddings, domes, portable building

PROCESSING

- Contact molding (hand/spray)
- Vacuum infusion
- Resin infusion / injection (VARTM / RTM)
- Adhesive bonding
- Pre-preg processing
- Compression molding (GMT, SMC)
- Very easy to thermoform



AIREX® T90 is a closed-cell, thermoplastic and recyclable polymer foam with excellent fire, smoke & toxicity (FST) properties.

It has very good mechanical properties and an extraordinary resistance to fatigue, is chemically stable, UV-resistant and has negligible water absorption.

It is thermally stable during high temperature processing and post curing. T90 is designed for easy use with all resin systems and processing technologies.

AIREX® T90 is the ideal core material for structural sandwich applications requiring high fire resistance.

AIREX® BALTEK®

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	kg/m ³	Average <i>Typ. range</i>	65 60 - 70	110 105 - 115	145 140 - 150	210 200 - 220
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	0.80 0.7	1.4 1.2	2.2 2.0	3.5 3.2
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	50 35	85 75	115 100	170 145
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	1.5 1.2	2.2 1.6	2.7 2.2	3.0 2.4
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	85 70	120 90	170 140	225 180
Shear strength	ISO 1922	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	0.46 0.4	0.8 0.7	1.2 1.1	1.85 1.5
Shear modulus	ISO 1922	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	12 10.5	20 18	30 26	50 44
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.033	0.033	0.036	0.041
Standard sheet	Width ²⁾	mm ± 5		610	610	610	610
	Length ²⁾	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm except compressive modulus (40 mm)

²⁾ Alternative width 1220 mm, alternative length 2440 mm

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR 25.853/ABD0031	Flammability	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Smoke density	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Toxicity	passed	passed	passed	passed
Rail	DIN 5510/2	Flammability	S4	S4	S4	S4
	DIN 5510/2	Smoke density	SR2	SR2	SR2	SR2
	DIN 5510/2	Dripping	ST2	ST2	ST2	ST2
	DIN 5510/2 / DIN 53438-2	Edge flaming	K1	K1	K1	K1
	DIN 5510/2	Toxicity (FED)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rail	NF F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	CEN TS 45545-2	(Nov. 2006)	Certification depending on sandwich design			

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST TESTOVACÍ PRYSKYŘICE FR-4/12

Na základě výsledků dosažených u laboratorně připravené pryskyřice FR-4/12 byla navržena její příprava v poloprovozním zařízení UKA-1N v Synpo, a.s., která se konala ve dnech 21. a 22. 11. 2012.

Pryskyřice byla doředěna na viskozitu přibližně 460 mPa.s a následně byl testován iniciační systém tak, aby splňoval požadavky FORM, s.r.o. pro otestování v RTM zařízení. Bylo požadováno, aby geltime pryskyřice se pohyboval v rozmezí 25 – 45 minut a maximální teplota při stanovení reaktivity nepřesáhla 170 °C, ideálně se pohybovala mezi 120 – 140 °C.

Vzhledem k tomu, že pryskyřice obsahuje látku s fosforem v molekule, není možné ji vytvrzovat užitím standardního iniciačního systému složeného z kobaltnaté soli jako promotoru a methylethylketon peroxidu. Proto byla navržena kombinace methylethylketon peroxidu a soli vanadu. Tabulka 1 zobrazuje geltime (20 °C) a reaktivitu směsi (pokojová teplota) pro jednotlivě navržené kombinace peroxidu a promotoru.

Vzorek: Testovací pryskyřice FR-4/12 připravená v poloprovozním zařízení

Tabulka 1: Dávkování iniciačního systému složeného z methylethylketon peroxidu a roztoku vanadu a jeho vliv na geltime a reaktivitu poloprovozně připravené pryskyřice FR-4/12.

Číslo systému	Koncentrace MEKP	Koncentrace V (0,5 %)	Geltime	Reaktivita	
	(%)	(%)	(min)	Čas (min)	T_{max} (°C)
1.	1	1,0	4 - 10	41	88
2.	1	0,9	32 - 38	53	97
3.	1	0,8	45 - 49	76	98
4.	2	0,5	28 - 30	150	64