

EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VAKUOVÉ INFUZE

Radek Januš

Bakalářská práce
2013

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek JANUŠ**
Osobní číslo: **T10219**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Experimentální studium vakuové infuze**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Rozdělení polymerních kompozitních materiálů, definice jednotlivých složek, význam matrice a výtzuže.
2. Přehled zpracovatelských technologií výroby kompozitních materiálů (rozdělení podle kritérií – mokrý/suchý proces, ruční/automatické způsoby zpracování)
3. Technologie vakuových infúzí (horizontální, vertikální), princip, zákonitosti, praktické využití.

II. Experimentální část

1. Experimentální studium zákonitostí vakuové infuze dle stanovených parametrů.
2. Popis a význam pomocných materiálů využívaných při technologii vakuové infuze.
3. Studium možností použitých typů systému pryskyřic vhodných pro infuzní technologie a jejich vplyv na stupeň vytvrzení.
4. Porovnání a diskuse dosažených výsledků.
5. Závěr.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

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

[2] Kořínek, Z.: Kompozity, dostupné na: www.volny.cz/zkorinek

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

[4] Daďourek, K.: Kompozitní materiály – druhy jejich užití, Liberec 2007

[5] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitu, Brno, 2003.

[6] Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího práce.

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

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Radek Januš

Obor: Technologická zařízení

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 14.5.2013

.....


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 vzdělávacího 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). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá výrobou polymerního kompozitního materiálu vyztuženým žebrováním pomocí technologie vakuové infuze pod pružnou folií. V teoretické části je popsáno rozdělení kompozitních materiálů, definice jednotlivých složek a přehled technologií výroby kompozitních materiálů. Praktická část dokumentuje výrobu kompozitního materiálu s výztužným žebrem pomocí vakuové infuze pod pružnou folií a dále návrh pomocných podpěr pro vakuovou infuzi.

Klíčová slova: vakuová infuze, kompozitní materiál, žebrování,

ABSTRACT

This bachelor thesis studies the vacuum foil infusion technology and production polymer composite material with ribs. The theoretical section describes the partition of composite materials, describes each components and overview of technologies manufacturing composite materials. The practical part documenting the production of composite material with a rib by vacuum foil infusion and design of auxiliary supports for vacuum infusion.

Keywords: composite material, vacuum infusion, ribs

Děkuji vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D za poskytnuté rady a připomínky, které mi pomohly v řešení problematiky bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při řešení ohybových vlastností. Poděkování také patří firmě FORM s.r.o. která zajistila potřebné materiály.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
1.1.1 Podle disperzní fáze	13
1.1.2 Podle typu matrice.....	13
1.1.3 Podle geometrie a orientace výztuže.....	13
1.2 MATRICE	14
1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice	14
1.2.2 Vinylesterové pryskyřice	15
1.2.3 Epoxidové pryskyřice.....	15
1.2.4 Fenolické pryskyřice	15
1.3 VÝZTUŽE.....	16
1.3.1 Částicové výztuže.....	16
1.3.2 Vlákenné výztuže	17
1.3.3 Skleněná vlákna	18
1.3.4 Uhlíková vlákna	19
1.3.5 Aramidová vlákna	20
1.3.6 Srovnání aramidových, uhlíkových a sklem vyztužených kompozitů	20
1.3.7 Forma výztuží.....	21
1.3.8 Multiaxilální tkaniny	22
2 TUHOST A PEVNOST VÝROBKŮ S ŽEBROVÁNÍM	23
2.1 OHYBOVÁ TUHOST A PEVNOST VYZTUŽENÝCH STĚN	23
3 PŘEHLED VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	25
3.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ	25
3.2 METODA VAKUOVÉHO VAKU	26
3.3 METODA TLAKOVÉHO VAKU	27
3.4 STRÍKÁNÍ.....	28
3.5 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ - RTM.....	29
3.6 NAVÍJENÍ.....	30
3.7 PULTRUZE	31
3.8 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	31
4 TECHNOLOGIE VAKUOVÝCH INFUZÍ	33
4.1 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ POMOCÍ VAKUA - VARTM	34
4.2 VFI – VAKUOVÁ TECHNOLOGIE POD PRUŽNOU FOLIÍ	34
4.3 RFI – RESIN FILM INFUSION	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	37
6 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VAKUOVÉ INFUZU POD PRUŽNOU FOLIÍ	38

6.1	POPIS A VÝZNAM POMOCNÝCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PŘI TECHNOLOGII VAKUOVÉ INFUZE	38
6.1.1	Odtřhová tkanina	38
6.1.2	Distribuční médium.....	39
6.1.3	Vakuová fólie	39
6.1.4	Resintrak	40
6.1.5	Hadice a konektor	40
6.1.6	Těsnící páska.....	41
6.1.7	Vakuová vývěva.....	41
6.1.8	Přepadová nádoba	42
7	VÝROBA VZORKŮ POMOCÍ VAKUOVÉ INFUZE.....	43
7.1	ŽEBROVÁNÍ S PET PĚNOU	43
7.2	ŽEBROVÁNÍ S PROFILEM „U“	49
8	STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	56
	ZÁKLADNÍ VÝPOČTY PRO 3-BODOVÝ OHYB:.....	56
8.1	OHYB LICHOBĚŽNÍKOVÉHO PROFILU - PET PĚNA	57
8.2	OHYB PROFILU „U“	58
8.3	OHYB TĚLÍSKA 20x150MM.....	59
8.4	OHYBOVÁ TUHOST	60
8.5	VYHODNOCENÍ OHYBOVÉ ZKOUŠKY	61
9	NÁVRH VÝROBY ŽEBROVANÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ POMOCÍ VAKUOVÝCH TECHNOLOGIÍ	63
10	PŘÍKLADY POUŽITÍ KOMPOZITŮ VYZTUŽENÝMI ŽEBROVÁNÍM.....	65
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK.....	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Kompozitní materiály jsou nové technické materiály, které se v dnešní době využívají v automobilovém, leteckém, chemickém i stavebním průmyslu. Za hlavní důvody používání kompozitních materiálů můžeme považovat jejich zvýšenou tuhost, pevnost, stabilitu, houževnatost a odolnost vůči korozi nebo chemickému prostředí. Kompozitem se nazývá materiál, který je složen alespoň ze dvou materiálových složek. Každý materiál má jiné vlastnosti a takto složený kompozitní materiál vykazuje podstatně odlišné vlastnosti.

Nadále se vyvíjí i jejich výrobní technologie. Jako jedna z první technologií pro výrobu kompozitních materiálů byla ruční laminace. Postupem času se technologie stále vyvíjely a v dnešní době se již používají technologie jako RTM, vakuová infuze, pultruze atd.

Tuhost kompozitních materiálů může být ovlivněna materiálově nebo řešením geometrického tvaru. Změna materiálu není vždy žádaná, a proto se tuhost materiálu zvyšuje vyztužením žebry. Všechny technologie neumožňují vyrobení výrobku s žebrem, a proto se následně žebra lepí. Lepení žebrování na kompozitní materiály je časově i ekonomicky náročná. Před lepením se materiál musí opracovávat, lepidla jsou poměrně drahá a vytvrzovací čas lepidla je také velký.

Praktická část bakalářská práce je zaměřena na výrobu polymerního kompozitního materiálu pomocí vakuových technologií s vyztuženými žebry v jednom kroku. Práce zahrnuje dokumentaci výroby, sledování technologických parametrů a stanovení ohybových vlastností.

Teoretická část popisuje rozdělení kompozitních materiálů, popis jednotlivých složek, technologie výroby a modifikace vakuové infuze. Teorie tuhosti a pevnosti žebrovaných konstrukcí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitním materiálem, nebo kompozitem je nazýván materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dvě nebo více komponentů nebo fází o lišících se fyzikálních a chemických vlastnostech. Kompozity mají s porovnáním jednotlivými komponentami (vlákna a pryskyřice) podstatně odlišné vlastnosti. Jestliže vyrobíme kompozitní materiál tím, že vhodně umístíme skleněná, uhlíková či organická vlákna (výztuž) v pryskyřici, která se poté nazývá pojivem nebo matricí, dostaneme novou entitu s vlastnostmi nedosažitelnými jednotlivými komponentami samotnými. Polymerní kompozity mají nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a vynikající odolnost vůči korozi. Při použití skleněných či organických výztuží i vynikající tepelné a elektrické izolační vlastnosti.[1]



Obr. 1. Karoserie autobusu - technologie ručního kladení [20]

1.1 Rozdělení polymerních kompozitních materiálů

K velkému sortimentu různých kompozitních materiálů je nutné použít k uspořádání určitá kritéria pro rozdělení kompozitů. Uvádí se tři nejběžnější způsoby dělení kompozitních materiálů. V zásadě musí mít kompozit jednu složku, která určuje tvar a rozměry kompozitu – matrice. Ostatní složky, které jsou v matrici rozptýleny, označujeme jako disperze.

1.1.1 Podle disperzní fáze

Nejběžnější fáze je případ, kdy disperzi tvoří pevná fáze, i když obecné definice kompozitu to nevyžadují. Proto je možné rozdělit kompozit na tři základní typy:

Kompozit prvního typu – disperze (jednu nebo více) je tvořena z pevné fáze. Tyto kompozity se používají v technice nejčastěji.

Kompozit druhého typu – má kapalnou disperzi. Tento druh není příliš častý, patří sem některé pórovité struktury s póry vyplněnými kapalinou.

Kompozit třetího typu – má plynou disperzi. Patří zde všechny pěnové materiály. Dnes často používané různé kovové pěny. [4]



Obr. 1 Kovové pěny [4]

1.1.2 Podle typu matrice

Kompozitní materiál: - s plastovou maticí (Plastic Matrix Composites – PMC)

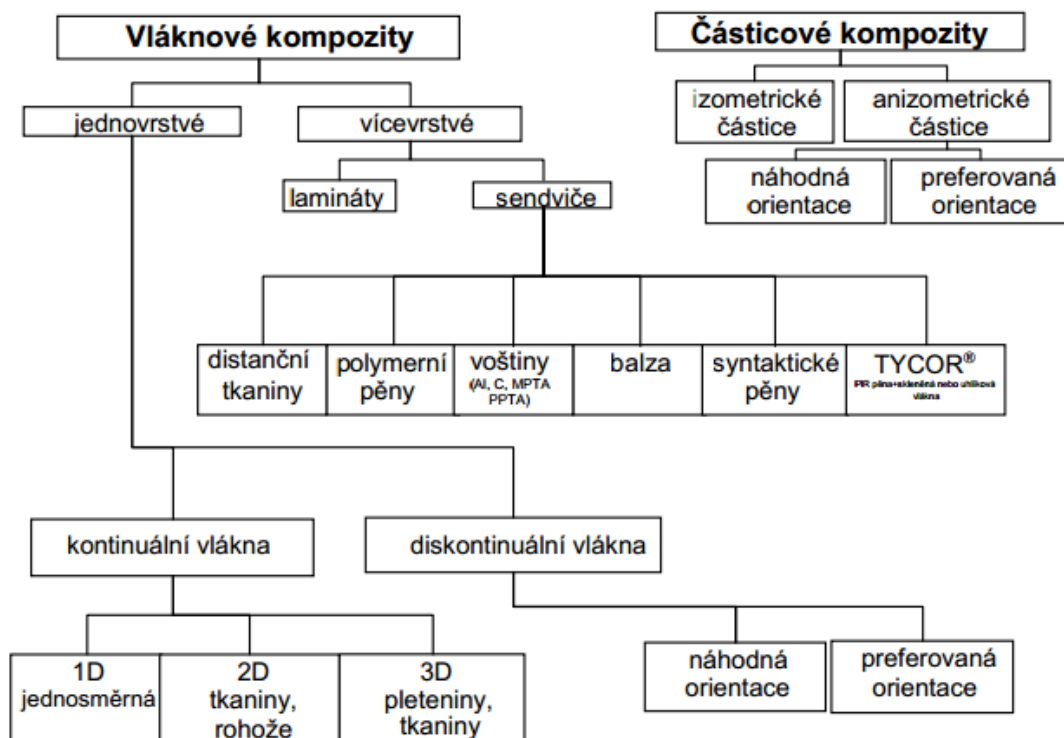
- s kovovou maticí (Metal Matrix Composites – MMC)

- s keramickou maticí (Ceramic Matrix Composites – CMC)

Některé materiály do tohoto rozdělení nezapadají, především se skleněnou maticí. Pro se podobné vlastnosti se přiřazují ke kompozitům s keramickou maticí.[4]

1.1.3 Podle geometrie a orientace výztuže

Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže je následující:



Obr. 2. Rozdělení podle geometrie a orientace výztuže [4]

1.2 Matrice

Matricí se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Matrice tedy zajišťuje spojení výztuže a udržuje výztuž ve správné orientaci. Úkol matrice je také chránit výztuž před vnějším prostředím, odděluje částice výztuže od sebe z důvodu šíření trhlin. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno dokonale smočilo. Před nanášením matrice se nejprve musí zkapalnit pomocí rozpouštědla a následně probíhá vytvrzování pomocí tvrdidel.

U polymerních kompozitů se matrice rozděluje na termoplasty a reaktoplasty. V praxi nejčastěji používají reaktoplasty (epoxydy, nenasyčené polyestery). [1], [2]

1.2.1 Nenasyčené polyesterové pryskyřice

Bezbarvý až slabě nažloutlý roztok pryskyřice, který je možno vytvrzovat za normální, nebo zvýšené teploty. Jde o roztok lineárních nenasyčených polyesterů, které obsahují ve svých molekulách reaktivní dvojnou C=C vazbu, v polymerace schopném rozpouštědle. Tím je nejčastěji styren. V průběhu vytvrzování jsou krátké oligomerní řetězce polyesterové pryskyřice spojovány styrenovými můstky. Nenasyčené polyesterové pryskyřice se vyrábějí reakcí dikarbonových kyselin (např. kyselina malinová) s glykoly (např. 1,2-

propylenglykol). Kromě kyseliny malinové se také nejčastěji používají anhydridy kyseliny ftalové.

Viskozita pryskyřice je z velké části závislá na obsahu styrenu, obvykle 30 až 50%. Aby byla pryskyřice snadně zpracovatelná a lépe prosycovala vlákna, můžeme viskozitu snížit zvýšením obsahu styrenu v určitých hranicích (velké množství styrenu způsobuje zkřehnutí). [1], [2]

1.2.2 Vinylesterové pryskyřice

Vinylestery jsou reaktoplasty velmi vhodné pro kompozity vyztuženými skleněnými i uhlíkovými vlákny. Jsou vhodné pro náročné aplikace, zejména do agresivního chemického prostředí, a pro kompozity vystavené velkému mechanickému namáhání. Sklem vyztužené vinylesterové výrobky prokázaly vynikající trvanlivost v aplikacích v chemickém průmyslu, v těžbě a zpracování ropy nebo papírenském průmyslu.

Surovina pro výrobu vinylesterových pryskyřic je bis-feno A, epichlorhydrin a kyselina akrylová. Zpracovávají se jako nenasycené polyesterové pryskyřice. Jsou většinou rozpuštěny ve styrenu, obsahují dvojnásobné vazby a vytvrzují pomocí peroxidu. Správně provedená esterifikace má za následek řetězec zakončený reaktivními vinylovými $-\text{CH}=\text{CH}_2$ vazbami. [1], [2]

1.2.3 Epoxidové pryskyřice

Jsou sloučeniny, které obsahují v molekule jednu, nebo dvě epoxidové skupiny. Tvrdidlo se přidává v kapalné, nebo pevné formě a obsahuje aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami pryskyřice. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a dochází pouze k malému celkovému smrštění. Tato vlastnost je výhodná pro výrobu přesných výrobků. Epoxidové pryskyřice se řadí mezi velmi hodnotné reaktoplasty s dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Vytvrzené epoxidové pryskyřice vykazují nejlepší mechanické a elektrické vlastnosti. Dobrá odolnost proti vodě, roztokům alkálií, kyselin a některých rozpouštědly. [1], [2]

1.2.4 Fenolické pryskyřice

Reaktoplasty s vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. Nejčastěji vznikají jako reakční produkt reakce fenolu s formaldehydem.

Dvoustupňová pryskyřice (novolak) se používá pro pryskyřice s molárním poměrem formaldehyd/fenol menším než 1. Může být vytvrzena použitím hexametyléntetraminu, který je produktem reakce amoniaku s formaldehydem. Při vytvrzování dochází k uvolňování amoniaku, a proto se tomuto typu pryskyřice říká dvojestupňová.

Jednostupňová pryskyřice (resol) se vyrábí reakcí formaldehydu s fenolem, kdy molární poměr formaldehyd/fenol je větší než 1. Při reakci se jako produkt polykondenzace uvolňuje voda.

Typická aplikace je výroba roštů, které odolávají teplotě až 900°C po dobu 40 minut, aniž by došlo k výraznému poškození. V tomto ohledu převyšují vlastnosti oceli. Největší předností je její vynikající termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost. [1], [2]

1.3 Výztuže

Výztuž v kompozitních materiálech zajišťuje zvýšení mechanických vlastností (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.). Typ a způsob uložení výztuže má velký vliv na výsledné vlastnosti. [1]



Obr. 3 Rozdělení kompozitních materiálů dle výztuže [10]

1.3.1 Částicové výztuže

V kompozitech je možné používat nejrůznější druhy částic. Jejich použití může sloužit ke zlepšení mechanických vlastností, ale spíše častěji ke zlepšení jejich vlastností jako např. tepelná odolnost, elektrická vodivost, útlum vibrací apod.. Použít lze libovolný materiál, ale nejčastěji se však setkáme s keramickými částicemi.

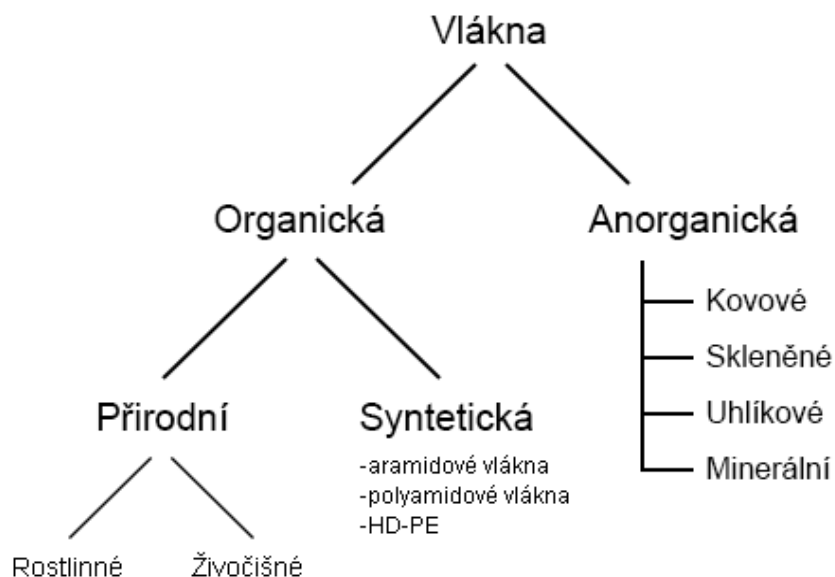
Při použití skla se používají plné, nebo duté (pro snížení hmotnosti) skleněné kuličky. [4]

Tab. 1. Vlastnosti keramických částic [4]

	Hustota (g/cm ³)	Pevnosti v tlaku (MPa)	Yongův modul (GPa)
Al ₂ O ₃	3,9	2500	390
SiO ₂	2,5	1100	70
Si ₃ N ₄	3,2	3000	280
SiC	3	500	240
ZrO ₂	6	2500	200
Sklo	2,5	50	90

1.3.2 Vláknové výztuže

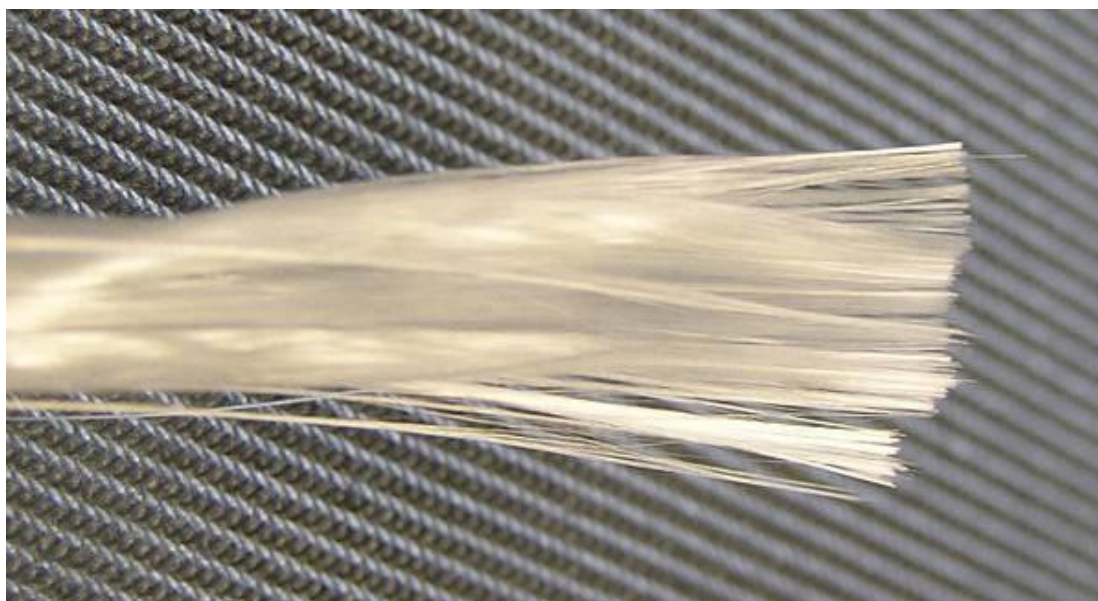
Vlákna mají pevnost v tahu výrazně vyšší než pevnost stejného materiálu v pevné formě (např. deska). Příčinou je malý průřez vláken. V tenkých vláknech jsou minimalizovány vady materiálu. Vady existují v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek, které jsou přednostně orientovány v podélném směru vlákna. Vlákna jsou tedy součástí kompozitu, které nesou zatížení a dodávají kompozitu tuhost a pevnost. Nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech jsou skleněná vlákna. [1], [3]



Obr. 4. Rozdělení nejčastěji používaných vláken [1]

1.3.3 Skleněná vlákna

Nejběžnější skleněná vlákna se vyrábějí především ze skloviny označována, jako sklo E. Velmi často se používají především v kompozitech s plastovou maticí. Vlákna se nyní vyrábějí kontinuálně, tzn. na jednom konci pece se sází sklářský kmen a na druhém se vytahuje vlákno. Potřebný průměr vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr 1mm). Konečný průměr závisí na rozdílu vytékání skloviny a odtahování vlákna. Toto vlákno má nejčastěji od 3,5 do 20 μm . Jednotlivá vlákna se sdružují do pramene a navíjí na navíjecí zařízení. Najednou se táhne 51 až 408 vláken. Mez pružnosti skleněného vlákna je kolem 3 % a nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna. Tepelné vlastnosti skleněných vláken jsou lepší než u jiných materiálů. Dlouhodobé teplotní působení 250°C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Jsou nehořlavá a tudíž ohnivzdorná. Modul pružnosti v tahu je přibližně stejný jako u hliníku a činí asi 1/3 hodnoty oceli. Vzhledem k nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken velmi vysoká. Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [1], [4], [11]



Obr. 5. Skleněná vlákna [15]

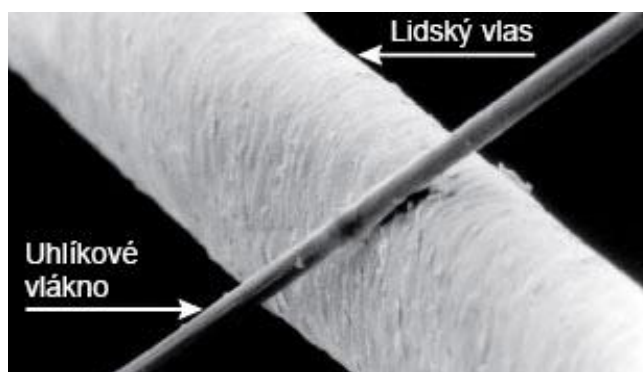
Tab. 2. Nejčastější druhy skel na vlákna do kompozitů [4]

Označení skla	Použití	Složení	Pevnost (GPa)
E	Elektrické izolace	$\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{B}_2\text{O}_5.\text{CaO}.\text{MgO}$	3
S	Vysoko pevnostní kompozity, vojenské účely	$\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{MgO}$	5
A	Tepelné izolace	$\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{MgO}.\text{CaO}.\text{K}_2\text{O}$	
C (pyrex)	Chemické aplikace	$\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{B}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{MgO}.\text{K}_2\text{O}$	2

1.3.4 Uhlíková vlákna

Technická vlákna s vysokou pevností, modulem pružnosti a tepelnou odolností s nízkou měrnou hmotností. Vzhledem na specifickou pevnost a modul pružnosti je překonávají pouze monokrystaly (whiskery) Al_2O_3 . Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou celulóza, polyakrylonitril (PAN) a smola.

Uhlíková vlákna se skládají z více než 90% z uhlíku, další prvky jsou dusík, kyslík a vodík. Jejich průměr je mezi 5 a 10 μm . E modul a pevnost se liší v závislosti na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst. Uhlíková vlákna jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. Proto se při zpracování povrchově upravují směsí epoxidové pryskyřice. Dynamické vlastnosti kompozitu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u všech ostatních materiálů. [2]



Obr. 6. Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm v porovnání s lidským vlasem. [12]

1.3.5 Aramidová vlákna

Vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejich kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Předností aramidových vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou vzájemně spojeny vazbami vodíkových můstků. Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Nejlehčí vyztužující vlákno z čeho plyne vysoká měrná pevnost v tahu. Aramidová vlákna ve formě kompozitu odolávají teplotě až 300°C a neroztaví se, proto jsou vhodná pro protipožární ochranné obleky. Dále se používají se jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pro pneumatiky a světlované kabely. [2]



Obr. 7. Aramidové vlákna [17]

1.3.6 Srovnání aramidových, uhlíkových a sklem vyztužených kompozitů

Vlastnosti nejdůležitějších vyztužujících vláken se liší nejen navzájem, ale také v závislosti na vlastnostech matrice, ve které jsou vlákna zabudována. Kromě anizotropie mechanických vlastností jsou to především hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti. U všech typů matric jsou hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti kladné a to přibližně $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, zatímco u skleněných vláken je tato hodnota $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a u aramidových a uhlíkových vláken jsou tyto hodnoty součinitele roztažnosti dokonce záporné. To umožňuje aplikaci dílů s velkou rozměrovou stálostí a při střídavých teplotách. Chemická odolnost kompozitů je závislá na druhu matrice, avšak vlákna mohou být silně poškozena pronikajícím agresivními médii. Uhlíková vlákna jsou inertní, zatímco skleněná a aramidová vlákna vykazují v kyselém i alkalickém prostředí pokles pevnosti. Uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá, zatímco skleněná a aramidová vlákna vykazují velký elektrický odpor. [2]

Tab. 3. Srovnání některých vlastností kompozitů [2]

Vlastnosti	Kompozity		
	sklem	aramidové	uhlíkové
Hustota	+ -	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
E-modul	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+ -	-

1.3.7 Forma výztuží

Pokud jsou po kompozitních výrobcích požadovány namáhání více než v jednom směru, jsou jako výztuže používána tkaniny, pleteniny, rovingy a rohože. Roving je pramenec tvořený individuálními vlákny navinutý na cívku. Dalším důvodem používání takového typu výztuží je rychlejší růst tloušťky stěny výrobku, snadnější manipulace a odolnost proti šíření vad. [1]



Obr. 8. Základní typy tkanin [1]

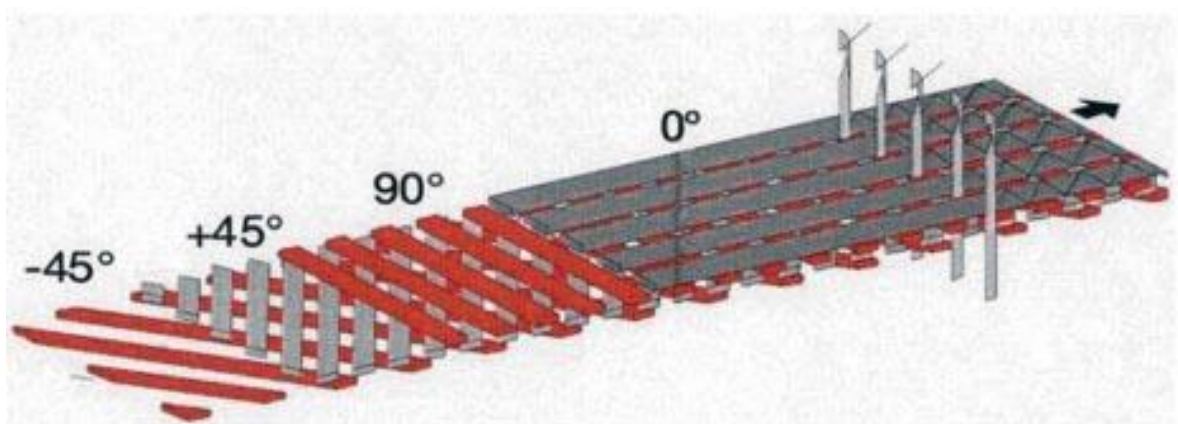
Plátňová vazba je nejpevnější a nejméně poddajná při tvarování. Keprová vazba je ohebnější, ale pouze při povrchové úpravě. Atlasová vazba je nejméně pevnou textilní vazbou. [13]



Obr. 9. Skelná tkaninová výztuž [22]

1.3.8 Multiaxiální tkaniny

Multiaxiální tkaniny firmy SEARTEX jsou jedním z nejnovějších ve vývoji moderních textilních výztuží použitelné v široké škále aplikací. Tkaniny jsou skládány ze dvou nebo více vrstev vláken a každá vrstva má jinou orientaci vláken. Takto poskládaná tkanina vykazuje lepší mechanické vlastnosti oproti ostatním tkaninám. Tkanina se nakonec proplétá pro snadnější manipulaci při dalším zpracování. [21]



Obr. 10. Schéma čtyřvrstvé multiaxiální tkaniny [21]

2 TUHOST A PEVNOST VÝROBKŮ S ŽEBROVÁNÍM

Snaha omezit hmotnost výrobku vedou nejčastěji k tomu, že výrobky z plastů jsou navrhovány jako tenkostěnné. Mění-li se tloušťka tenkostěnného prvku při daných okrajových podmínkách, závisejí hodnoty ohybových napětí nepřímo na kvadrátu poměru tlouštěk:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^2 \quad (1)$$

To znamená, že např. při zvýšení tloušťky stěny o 50 %, poklesnou ohybové vlastnosti 2,25krát.

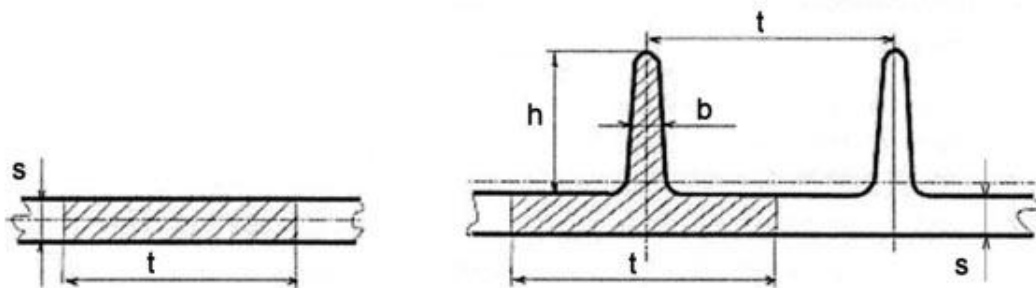
zvýšování ohybové tuhosti a pevnosti stěny výrobku zvětšením její tloušťky je tedy málo účinné a velmi neekonomické. Podle možností výrobní technologie se upravuje tvar výrobku tak, aby se podstatná část průřezu nacházela v relativně větší vzdálenosti od neutrální plochy plošného prvku. Poloha neutrální plochy je dána polohou těžiště průřezu. [5]

2.1 Ohybová tuhost a pevnost vyztužených stěn

Ohybová tuhost tělesa typu nosník resp. prutu je dána součinitelem EJ a může tak být ovlivňován materiálově (modul pružnosti) a geometricky (kvadratický moment plochy průřezu k neutrální ose průřezu).

U stěn vyztužených s větším počtem žebër s konstantní roztečí lze poměrné zvýšení tuhosti stěny odhadovat poměrem kvadratického momentu myšleného T-profilu s kvadratickým momentem průřezu nevyztužené stěny o šířce rovné rozteči žebër:

$$K_T = \frac{J}{J_0} \quad J_0 = \frac{t \cdot s^3}{12} \quad (2)$$



Obr. 11. Znárodnění vyztužení stěny jednosměrnými žebry [5]

Zjednodušeně lze odhadovat poměrné zvýšení ohybové únosnosti žebrované stěny jako srovnání velikosti jmenovitých ohybových napětí dle technické teorie lineárně elastického ohybu. Zvýšení je pak dáno:

$$k_u = \frac{W}{W_0} \quad W_0 = \frac{t \cdot s^2}{6} \quad (3)$$

Pro předběžné posouzení vlivu žeber na tuhost stěny slouží v technické praxi diagramy, z nich lze zvýšení tuhosti odečítat v závislosti na geometrických parametrech. Je patrné, že v oblasti malých poměrů h/s při současně vyšších poměrech t/b klesají poměry k_u pod 1. Znamená to, že nevhodně navržená konfigurace žeber snižuje ohybovou únosnost stěny.

V praxi se také zavádí pojem tzv. ekvivalentní tloušťky vyztužené stěny. Ekvivalentní tloušťka vzhledem k tuhosti vyztužené stěny je dána vztahem:

$$J = \frac{t \cdot s_t^3}{12} \quad (4)$$

vzhledem k úrovni ohybového napětí pak vztahem:

$$W = \frac{t \cdot s_p^2}{6} \quad (5)$$

kde: J, W – parametry vyztužené stěny

t - rozteč žeber [5]

3 PŘEHLED VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Správný výběr výrobní technologie hraje důležitou roli, která určuje výsledné vlastnosti kompozitního výrobku. Při výrobě kompozitních materiálů volíme různé druhy pryskyřice, vláken a jader, tohle dohromady vykazuje výsledné vlastnosti, jako jsou tuhost, pevnost, tepelná odolnost, houževnatost, ale také i cena.

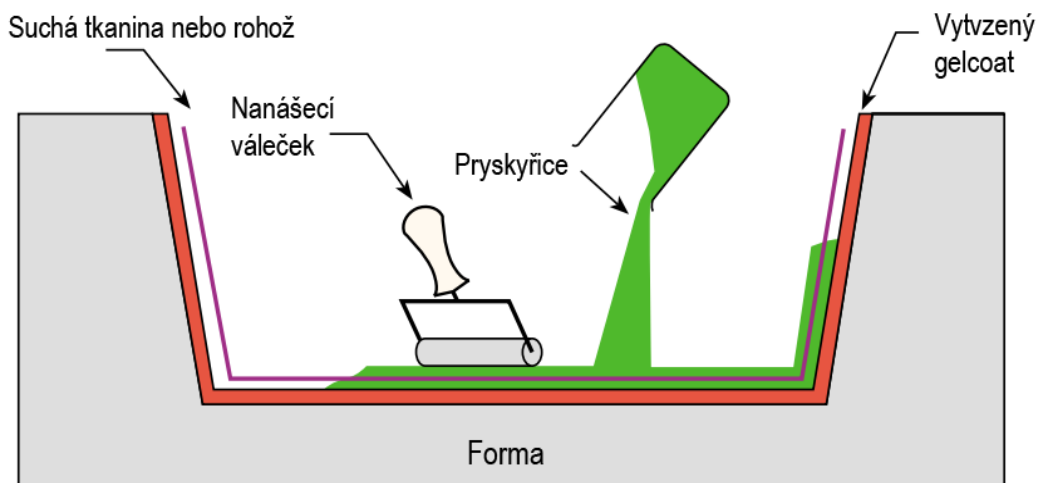
Konečné vlastnosti výrobku a ekonomiku výroby určuje správná volba technologického postupu, proto je třeba volbě technologie věnovat velkou pozornost. [6], [7]

Volba výrobní technologie je dána především:

- Sériovost
- Rozměrová charakteristika výrobku
- Kvalita povrchu
- Požadavky na výsledné vlastnosti

3.1 Ruční laminování

Pokládání výztuže se na formu provádí ručně. Pryskyřice se obvykle nanáší a prosycuje pomocí ručních nástrojů - válců a štětců. Je nutné zamezit vzniku vzduchových mezer, které zapříčiňují vady ve výrobku snížením mechanických vlastností. Úplné odvzdušnění při ručním laminování není možné a také závisí na kvalitě pracovníka. Lamináty většinou vytvrzují při atmosférickém tlaku a za normální teploty. Ruční laminování je vhodné spíše pro malou sériovost popřípadě prototypy. [1], [2]



Obr. 12. Schéma ručního laminování [7]

Výhody:

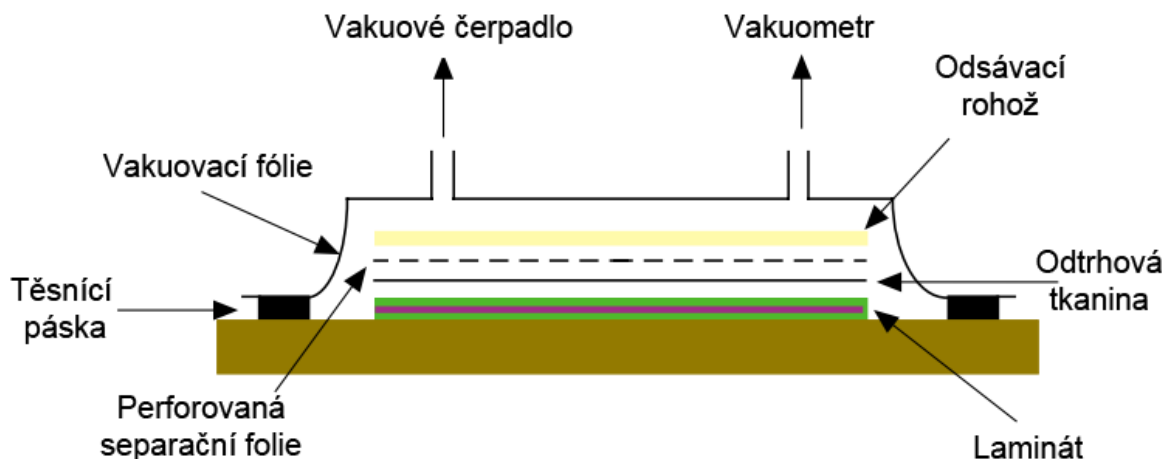
- Jednoduchá technologie, nízké nástrojové náklady
- Výroba složitých tvarů
- Velkorozměrné výrobky

Nevýhody:

- Jeden kvalitní povrch
- Kvalita výrobku závisí na zkušenostech a schopnostech pracovníka
- Tvorba vzduchových dutin
- Nutné odvětrávací systémy

3.2 Metoda vakuového vaku

Jde pouze o zlepšení metody ručního laminování v poslední fázi vytvrzování. Ručně položený laminát se přikryje odtrhovou tkaninou, na kterou se položí separační fólie a odsávací rohož. Nakonec je položena tenká vzduch nepropouštějící fólie, která se přilepí k zajištění vakua. Připojením čerpadla se forma vakuuje a laminát se zbaví vzduchových bublin. Přebytká pryskyřice se odvádí do zásobníku. Pomocí dvoudílné formy je i možné vyrobit výrobky s oboustranně hladkým povrchem. [1], [2]



Obr. 13. Schéma vakuového vaku [7]

Výhody:

- Vyšší kvalita výrobku
- Minimální obsah vzduchových bublin
- Vakuová fólie snižuje množství výparných látek pryskyřice
- Střední výrobní náklady

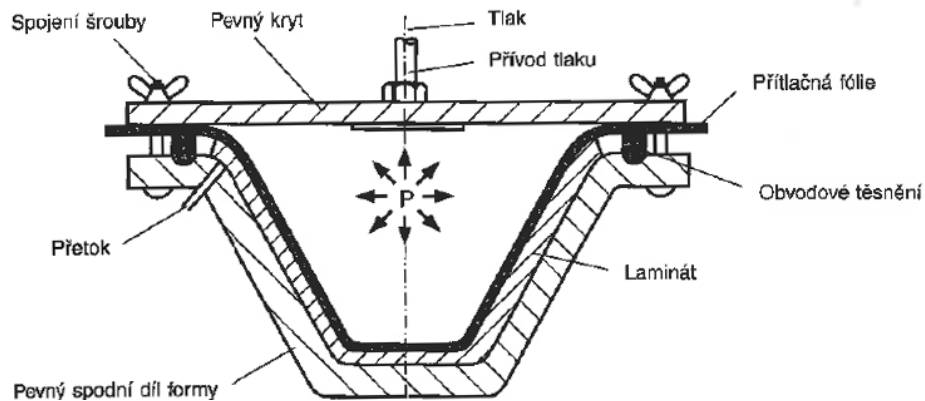
Nevýhody:

- Vyžaduje zručnou pracovní sílu
- Vakuování přidává další práci a proces je pomalý

Typické aplikace jsou vojenské a letecké součásti, lodě, díly do závodních aut. [3]

3.3 Metoda tlakového vaku

Jedná se pouze o obrácenou metodu vakuového vaku. Forma nyní musí být uzavřena krytem, aby došlo ve formě k rovnoměrnému přetlaku (až 8 barů). Tenká vzduch nepropouštějící fólie je položena na laminát a tlakem dojde k vytlačení nežádáných vzduchových bublin. [1], [2]

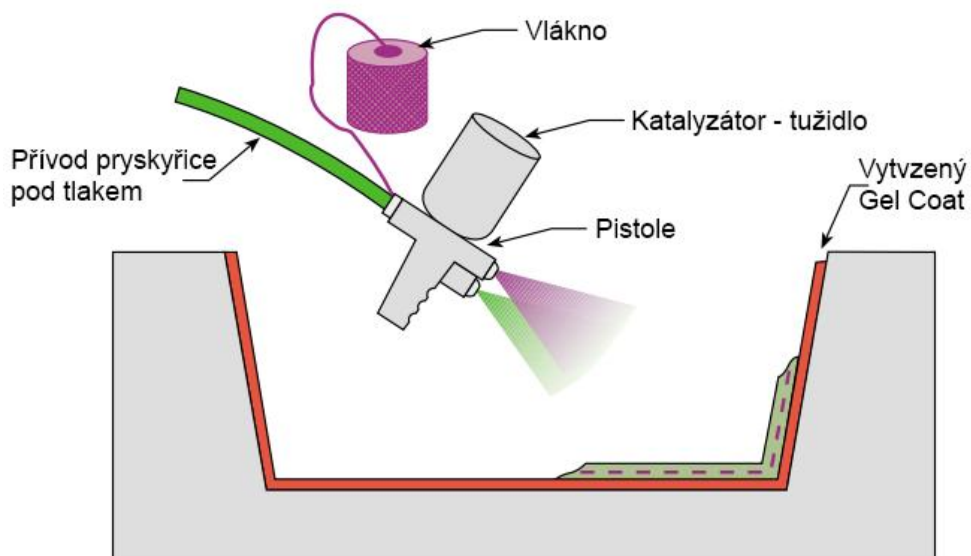


Obr. 14. Schéma metody tlakového vaku [2]

Výhodou je možnost připravit výrobky s minimálním obsahem vzduchových bublin. Všechny výhody ručního laminování jsou zachovány. Nevýhodami je velký odpad, zručnou pracovní sílu, velmi pomalý proces. [1]

3.4 Stříkání

Metoda stříkání je částečně mechanizovaná metoda ručního laminování. Technologie je vhodná pro malou sériovost a velké díly. Pryskyřice, výztuž a ostatní složky se nanášejí pomocí stříkací pistole. Vlákna jsou sekaná na délku 20 až 50 mm v ruční pistoli a současně s pryskyřicí jsou nanášena na formu. Nanášení se provádí převážně ručně, lze však metodu automatizovat. Nanesené vrstvy se nechávají vytvrzovat za normálních podmínek. [2]



Obr. 15. Schéma stříkání [7]

Výhody:

- Široce používané
- Rychlé nanášení vláken a pryskyřice
- Nízká cena nástroje

Nevýhody:

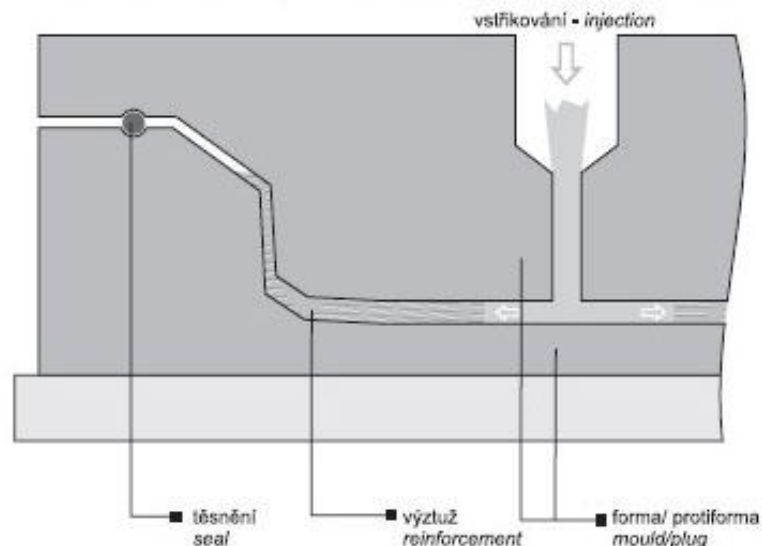
- Velké množství pryskyřice – vysoká hmotnost
- Použití krátkých vláken, které omezují vlastnosti laminátu
- Použité pryskyřice musejí mít malou viskozitu
- Vyšší koncentrace styrenu, který je škodlivý

Použití:

Používá se pro nanášení laminátové směsi na rub polymethylmetakrylátových sanitárních výrobků (vany, umyvadla, dna sprchových koutů) pro zvýšení jejich pevnosti a tvarové stability. Dále pro lehce zatěžované panely a aerodynamické prvky. [6], [7]

3.5 Vysokotlaké vstřikování - RTM

Metoda pracuje s dvojdílnou uzavírací formou. Obě formy se navoskují (separace) a poté se nanese gel coat. Po vytvrzení gel coatu je vložena suchá výztuž a do uzavřené formy je následně vstříknuta pryskyřice pod tlakem. Tlakem dochází k úplnému prosycení výztuže. Forma se nechá uzavřená až do úplného vytvrzení. Po vytvrzení dochází k otevření formy a vytažení výrobku. [1]



Obr. 16. Schéma RTM [6]

Výhody:

- Možnost výroby dílu s dobrým povrchem na obou stranách
- Pryskyřice neuvolňuje do ovzduší reaktivní rozpouštědlo
- Přesná výroba

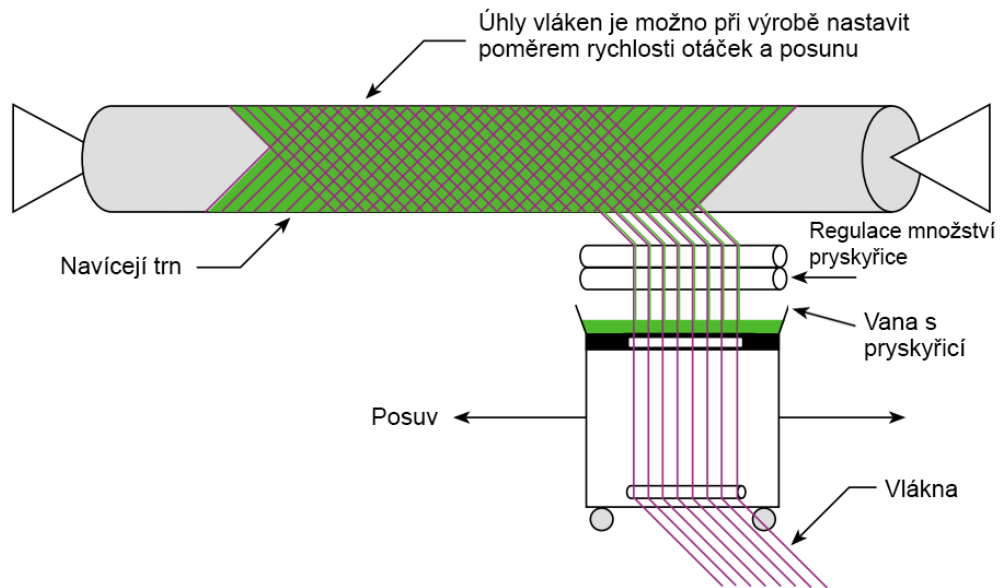
Nevýhody:

- Nutnost těžkých a drahých kovových forem
- Není možnost dosáhnout vysokého obsahu skla – nižší fyzikální vlastnosti

RTM se využívá pro výrobu dílů do automobilové, letecké a železniční dopravy.

3.6 Navíjení

Technologií je kontinuální navíjení svazku nebo jinak upravených výztuží na jednodílnou nebo skládací formu. Pro snadnější vyjmutí výrobku u jednodílných trnů se jsou trny vyrobeny s malým úkosem. Při navíjení se vzájemně spojují rotační pohyb trnu a posuvný pohyb vany s pryskyřicí. Požadovaných vlastností výrobku se dosahuje uspořádáním a orientací pramenů vláken a výztuží. Vytvrzení se provádí na trnu. [1], [2]



Obr. 17. Schéma navíjecího zařízení [7]

Výhody:

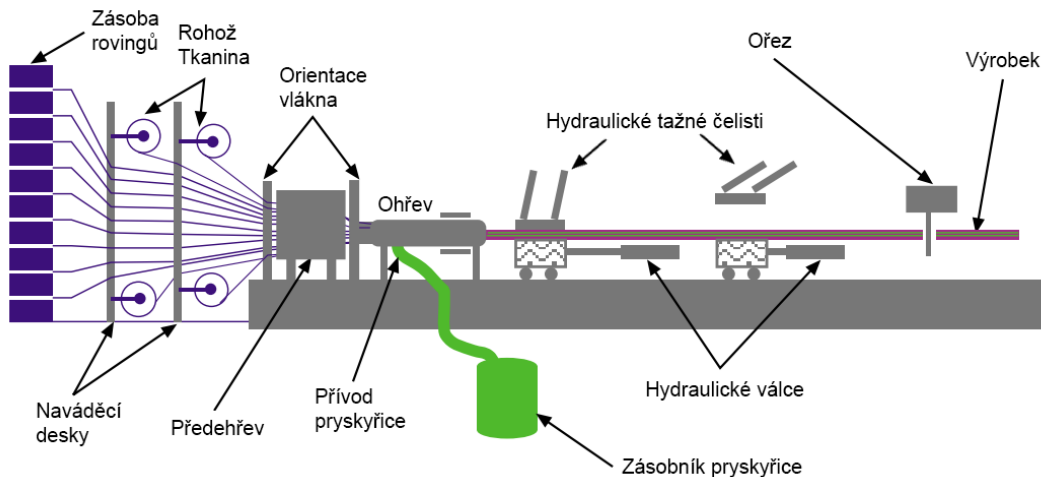
- Velká produktivita a možnost automatizace
- Vynikající fyzikální vlastnosti
- Rychlá a ekonomická metoda

Nevýhody:

- Vysoká cena navíjecího zařízení
- Obtížné odstraňování vnitřních forem
- Nízká produktivita u tlakových nádrží

3.7 Pultruze

Tato technologie je založena na tažení svazků vláken, rohoží a tkanin pryskyřičnou lázní, v které dochází k prosycení výztuže. V dalším kroku je prosycená výztuž tvarována do požadovaného průřezu a zároveň je celý kompozit vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě.



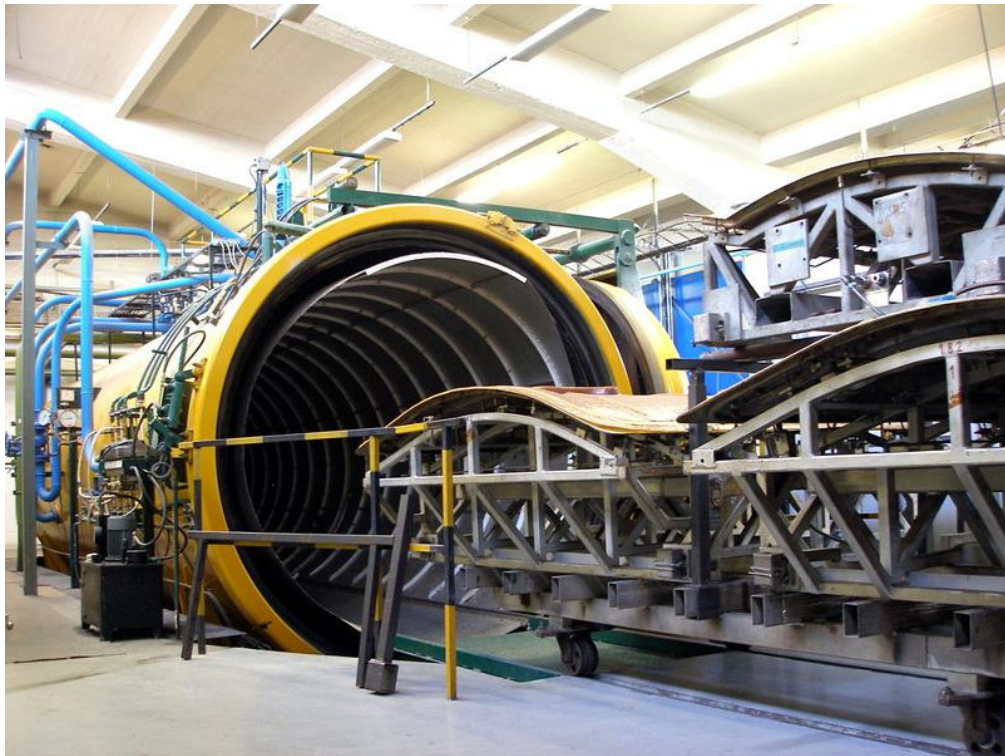
Obr. 18. Schéma pultruze [7]

Největšími výhodami pultruze jsou kompozity velmi dobrých vlastností, prakticky neomezená variabilita tvaru průřezu, velká délka vyráběného profilu, vysoká produktivita, minimální nároky na lidskou práci a vysoký stupeň automatizace.

Mezi nevýhody se řadí vysoké investiční náklady na pultruzní linku, relativně drahý provoz a nutnost kvalitního řídicího systému. [1]

3.8 Vytvrzování v autoklávu

Jedná se o nákladnou a složitou technologii, kde výchozím materiálem jsou vždy prepregy, které vyžadují vytvrzování za zvýšené teploty. Vrstvy jsou položeny stejně, jako při lisování vakuem, forma je pokrytá pružnou folií, kde proběhne vakuace podtlakem cca 0,8 bar. Jedná se o vytvrzení kompozitu pomocí tepla a tlaku v uzavřené nádobě (autoklávu). Teplota se obvykle pohybuje od 120°C do 180°C a tlak v autoklávu je cca 6 bar.



Obr. 19. Autokláv řízený počítačem - průměr 2,3 m, délka 7 m, max. pracovní teplota 200°C, max. pracovní tlak 0,7 MPa [14]

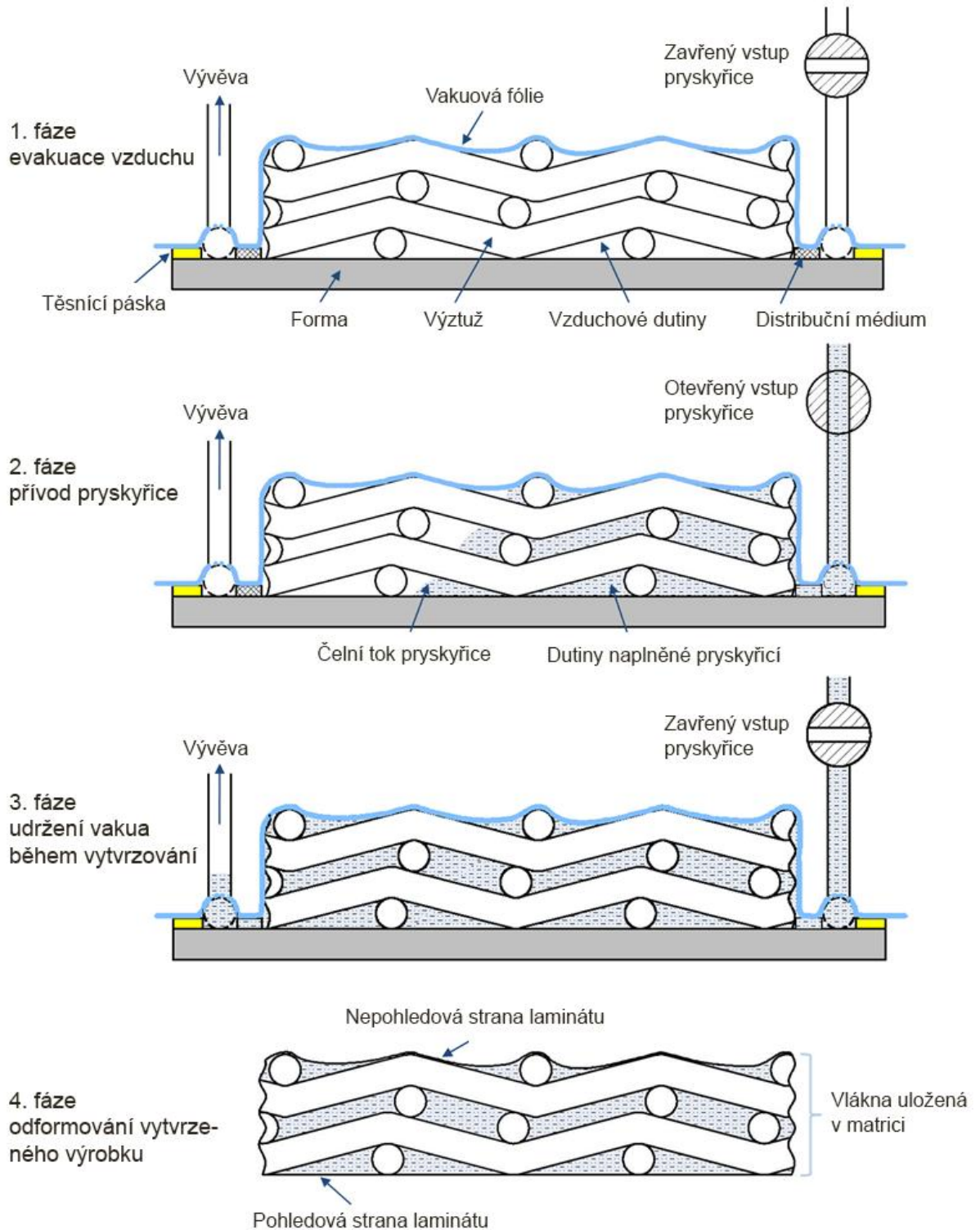
Výhodami je zvýšení obsahu výztuží, v jednom kroku může být vytvrzeno mnoho částí. Je možné proces automatizovat a ušetřit práci navíc.

Nevýhodami je vysoká cena autoklávů, metoda je velmi pracná a velikost vyráběných dílů je diktována rozměry autoklávu. Je produkováno poměrně hodně odpadu. [4], [6]

4 TECHNOLOGIE VAKUOVÝCH INFUZÍ

Vakuová infuze je proces, který využívá podtlak k prosycení pryskyřice přes suché výztuže. Klíčovou součástí vakuové infuze je evakuace vzduchu před přívodem pryskyřice.

V nejjednodušší formě můžeme proces rozdělit na následující fáze:



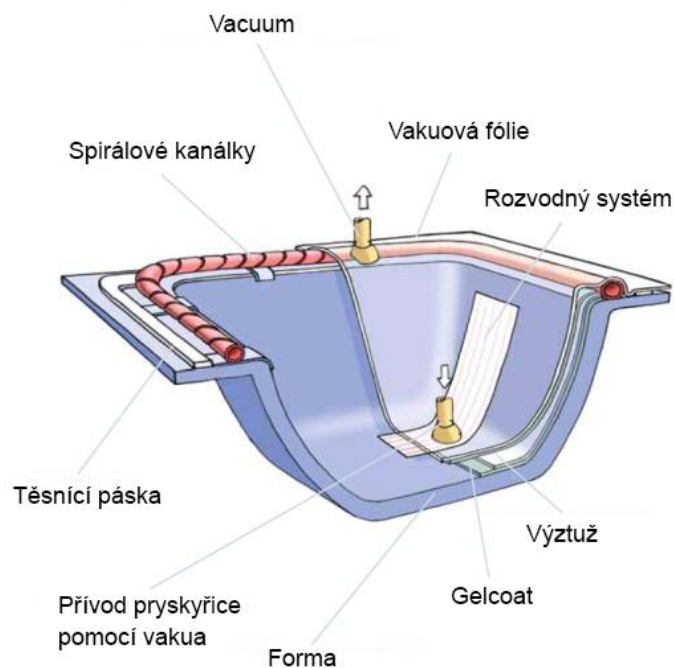
Obr. 20. Princip vakuové infuze [16]

4.1 Vysokotlaké vstřikování pomocí vakua - VARTM

Jedná se o klasické technologie RTM, kdy prosycení výztuže napomáhá vakuum. Pryskyřice je vtahována podtlakem do dvojdílné formy, ve které je umístěna výztuž. Běžněji se v praxi používají jednodílné formy. Druhá část se nahradí folií, filmem, nebo vakem. [6]

4.2 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. [6]



Obr. 21. Vakuová technologie pod pružnou folií [8]

Výhody:

- Vysoká kvalita
- Výroba velkoplošných výrobků
- Vysoká pevnost výrobku

Nevýhody:

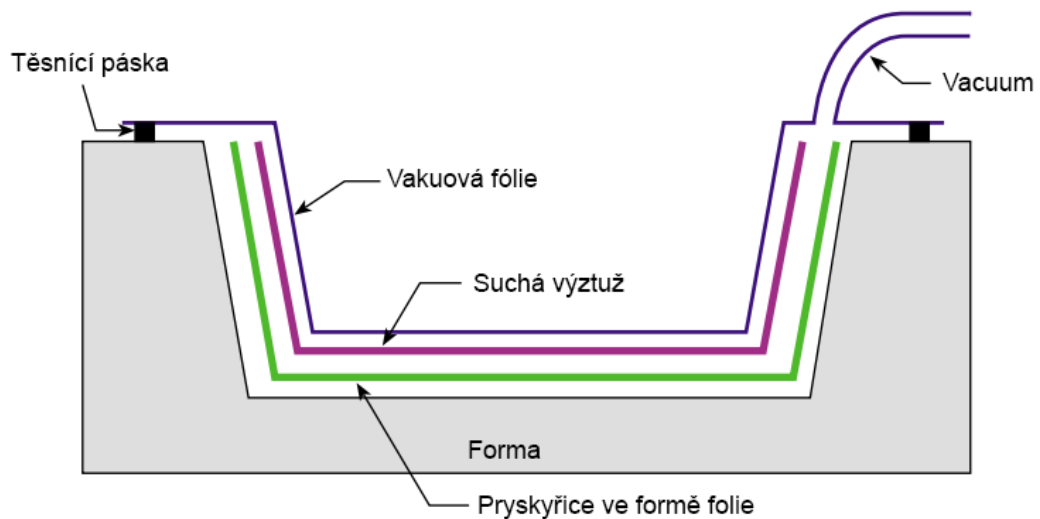
- Složitý proces

- Potřeba zkušených pracovníků

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

4.3 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). [9]



Obr. 22. Schéma RFI – Resin film infusion [7]

Výhody:

- Zkrácení doby cyklu
- Zlepšení kvality výrobku
- Nižší cena

Nevýhody:

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

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Předložená bakalářská práce popisuje možnosti výroby žebrovaných konstrukcí v jednom kroku v případě polymerních kompozitních materiálů. Tuto metody výroby lze aplikovat i na lamináty a sendvičové kompozitní materiály.

Cíle bakalářské práce můžeme shrnout do následujících bodů:

- I. Teoretická část
 1. Rozdělení kompozitních materiálů, popis jednotlivých složek, význam polymerního kompozitního systému.
 2. Přehled technologií výroby kompozitních materiálů.
 3. Princip a význam vakuové infuze.
- II. Praktická část
 1. Experimentální studium vakuové infuze, popis a význam pomocných technologických materiálů
 2. Návrh experimentu pro výrobu žebrovaných konstrukcí dle zadání vedoucího bakalářské práce.
 3. Samotná výroba žebrovaných kompozitních materiálu pomocí vakuové infuze, sledování technologických parametrů.
 4. Stanovení ohybových vlastností dle normy ČSN EN ISO 178 na vyrobených kompozitních vzorcích.
 5. Návrh výroby žebrovaných kompozitních materiálů pomocí vakuových technologií.
 6. Shrnutí dosažených výsledku, jejich vzájemné srovnání.
 7. Závěr

6 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VAKUOVÉ INFUZU POD PRUŽNOU FOLIÍ

Cílem této bakalářské práce bylo zhotovení žebrovaných kompozitních materiálů v jednom kroku, kde žebra jsou vkládána mezi skelné výztuže do vlastní skladby kompozitního systému. V praxi se žebra na kompozitní struktury (finální výrobky) lepí, kde ale vzniká menší pevnost (v závislosti od druhu povrchu, jeho povrchové úpravy, vhodné technologie lepení, druh lepidla) a lepidla jsou poměrně drahá. Na výrobu vzorků byla použita technologie vakuové infuze pod pružnou folií.

6.1 Popis a význam pomocných materiálů používaných při technologii vakuové infuze

Pro úspěšnou výrobu pomocí technologie vakuové infuze pod pružnou folií se používá mnoho pomocných materiálů, které jsou nezbytné. Z pomocných materiálů se po dokončení výroby a následného odformování stává odpad. V posledním době se zavádí použití univerzálních vákuovacích fólií vhodných pro vícenásobné odformování, použitelné pro série větší jak 200 kusů.

6.1.1 Odtrhová tkanina

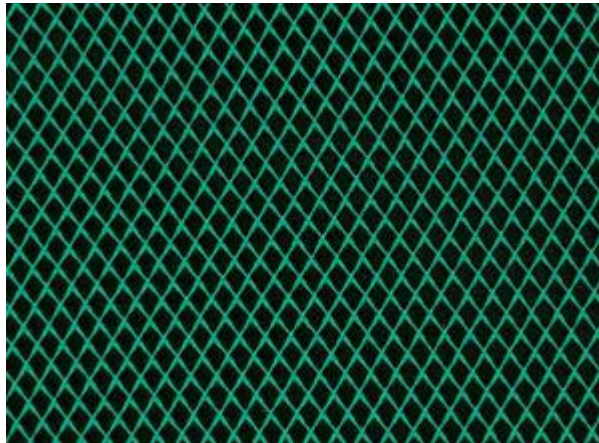
Tkanina ze syntetických vláken, která se klade jako první přímo na výztuže výrobku. Při odformování se odtrhová tkanina ztrhává z výrobku a vzniká drsný povrch potřebný pro další technologické operace – laminování, lepení, povrchové úpravy. Také slouží k oddělení všech dalších pomocných materiálů, které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



Obr. 23. Odtrhová tkanina Econostitch firmy AIRTECH

6.1.2 Distribuční médium

Distribuční médium se používá při technologii vakuové infuze pro lepší a rychlejší tok pryskyřice do všech částí výrobku. Stejně jako většina pomocných materiálů distribuční médium nelze po prosycení pryskyřice znovu použít. Může být použita i v několika vrstvách pro ještě lepší tok pryskyřice. Existuje mnoho druhů, které se vybírají podle použité technologie, použité pryskyřice a max. teploty použití. [18]



Obr. 24. Green Flow 75 [18]

6.1.3 Vakuová fólie

Pružná plastová fólie vyráběná především z PE, PA, PTFE umožňuje vytvoření vakua v horní části otevřené formy. Při vakuové infuzi překrývá všechny výrobní a pomocné materiály a její rozměry se volí o 30 až 40% větší než samotný výrobek. Fólie je teplotně, chemicky i mechanicky odolná. Materiál fólie se volí dle matrice, teploty použití a složitosti výrobku. [18]



Obr. 25. Vakuová fólie [18]

6.1.4 Resintrak

Resintrak je pletená páska navržená tak, aby během procesu vakuové infuze napomáhala toku pryskyřice. Páska se vyrábí z polyesteru. Má velmi vysokou propustnost a dopravuje pryskyřici podél povrchu do výztuží. Resintrak je také možné použít pro dopravu pryskyřice do méně přístupných míst a tím zkrátit čas procesu. [18]



Obr. 26. AIRTECH Resintrak [18]

6.1.5 Hadice a konektor

Hadice při vakuové infuzi slouží pro vytvoření vakua, dopravu a odvod přebytečné pryskyřice. Hadice je tepelně i chemicky odolná a je vyrobena z PE. Průměr hadice se volí společně s konektorem. Spirálová hadice slouží k odvodu přebytečné pryskyřice do rezervoáru a umísťuje se po obvodu formy.



Obr. 27. a) Hadice pro přívod pryskyřice, b) Spirálová hadice [18]

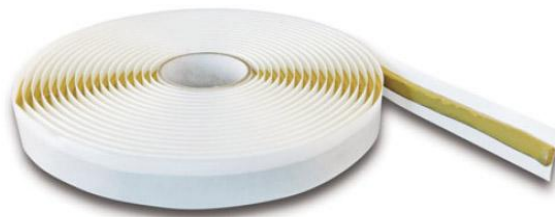
Konektor slouží jako levné spojení zavakuované formy a přívodu pryskyřice. Konektor AIRTECH RIC vyrobený z polyetylenu se používá pro aplikace do max. 80°C.



Obr. 28. Konektor AIRTECH RIC [18]

6.1.6 Těsnící páska

Oboustranná těsnící páska vytváří spoj mezi formou a vakuovou folií. Páska je odolná vůči teplotě až do cca. 260°C. Snadno se odstraňuje z kovových i nekovových materiálů. [18]



Obr. 29. Těsnící páska AT-200Y [18]

6.1.7 Vakuová vývěva

Vývěva slouží k vytvoření vakua a čerpání pryskyřice ze zásobníku do utěsněné formy. Pro technologii vakuové infuze je potřeba vytvořit podtlak 0,8 až 1,0 bar.



Obr. 30. Vakuová vývěva [19]

6.1.8 Přepadová nádoba

Slouží k zachycení přebytečné pryskyřice, která je z formy odsávána pomocí vakua. Umisťuje se mezi vývěvu a formu. Pokud by přepadová nádoba při technologii vakuové infuze nebyla použita, přebytečná pryskyřice by se dostala do vývěvy a došlo by k jejímu znehodnocení. Na přepadovou nádobu se také často umisťuje měřič podtlaku.



*Obr. 31. Přepadová nádoba RB451
firmy AIRTECH [18]*

7 VÝROBA VZORKŮ POMOCÍ VAKUOVÉ INFUZE

V experimentální části bakalářské práce se zabývám problematikou výroby kompozitních materiálů s žebrováním. Cílem je získat zkušenosti ohledně výroby žebrovaných výrobků pomocí vakuové infuze v jednom kroku a vytvořit postup výroby. Následně vyrobený výrobek byl nařezán a testován ohybovou zkouškou.

V praxi se žebra na výrobky lepí, kde ale vzniká menší pevnost a lepidla jsou poměrně drahá. Cílem experimentální části je zjistit, zdali je možné vyrábět žebrované konstrukce vkládané mezi výztuže, zjistit složitost výroby, porovnat pevnost v ohybu a ze získaných zkušeností navrhnout ideální a co nejjednodušší postup výroby. Experiment byl prováděn s dvěma typy žeber při stejných podmínkách a podobném postupu.

Ve všech případech byla použita polyesterová pryskyřice POLYLITE 420-100 která je vhodná pro technologii vakuové infuze. Jako výztuže byla vždy použita multiaxiální skelná tkanina +45/-45, 980 g/m².

Před samotnou výrobou je nutné stanovit si dobu gelace pryskyřice. Doba gelace je přímo čas, ve které již nelze vytáhnout tyčinku z reagující pryskyřice. Od tohoto okamžiku pryskyřice ztrácí schopnost prosycovat výztuže. Naše stanovená doba gelace byla po přidání 2% iniciátoru (butanoxu) 10 min.

Při výrobě vzorků nebyl použit gelcoat.

7.1 Žebrování s PET pěnou

Tab. 4. Použité materiály vzorku s PET pěnou

Vzorek č.1 – PET pěna	
Výztuž:	Multiaxiální skelná tkanina +45/-45, 980 g/m ²
Počet vrstev:	4
Materiál žebra:	PET pěna
Hmotnost výztuží a žebra:	615g
Hmotnost použité pryskyřice:	900g (POLYLITE 420-100)
Hmotnost použitého tvrdidla:	19g (BUTANOX 2%)
Použité pomocné materiály:	Odrhová tkanina, rozvodná tkanina, oboustranná lepicí páska, plná a spirálová hadice, kolínka „T“ a „L“, vakuovací folie, fixační sprej

Vakuová infuze 100%	ANO
Vakuová infuze 100% [min.]	4:55
Začátek gelace 100% [min.]	10:10

Při první výrobku byla jako žebro použita PET pěna ve tvaru rovnoběžného lichoběžníku. V pěně byly vyvrtány díry pro lepší prosycení a spojení s výztuží. PET pěna je velmi přizpůsobivá, recyklovatelná, má termoplastické jádro s dobrými mechanickými vlastnostmi, teplotní a chemická odolnost, malá hmotnost a velké využití pro širokou škálu aplikací.

Postup výroby:

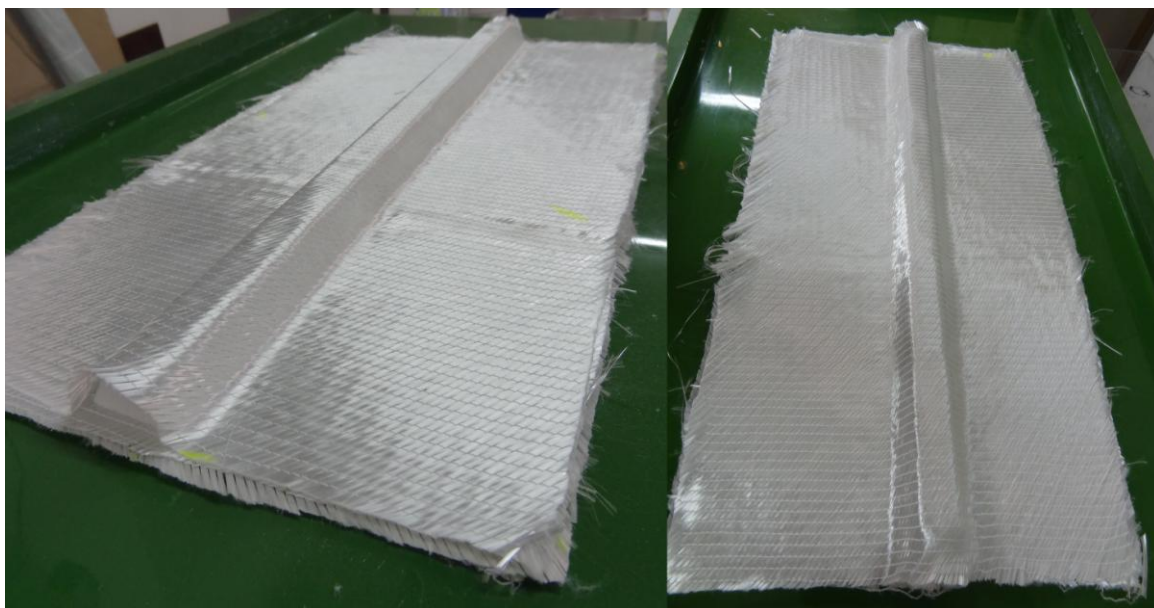
Na naseparovanou formu byly poleženy dvě vrstvy skelných výztuží o rozměru 500 x 280 mm. Výztuže musí být kladeny na sebe tak, aby vlákna byly orientované ve stejném směru. Pro lepší spojení výztuží bylo použito fixační lepidlo AIRTAC 2 ve spreji, která zafixuje vrstvy výztuže. Na tyto dvě vrstvy bylo položeno připravené žebro z PET pěny. Délka pěnového žebra byla 500mm.



Obr. 32. Dvě spodní vrstvy tkaniny a pěnové žebro

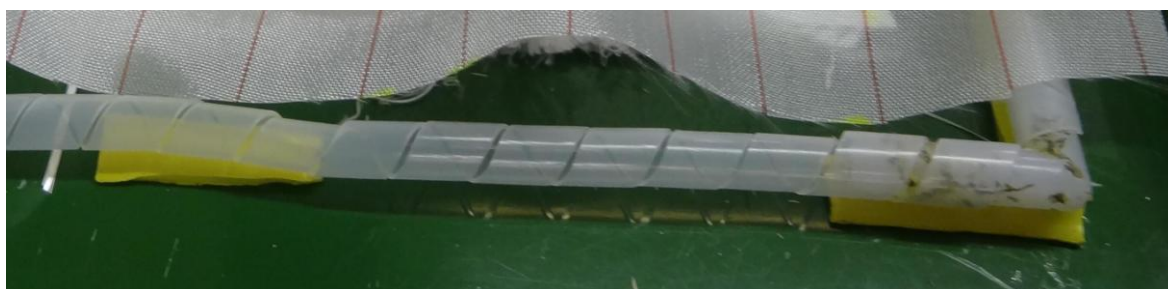
Následně byly kladeny další dvě stejně orientované tkaniny. Tkaniny se musely založit na výztužné žebro, to se dosáhne pomocí fixačního spreje a přitlačných válečků. Zde nevznikl žádný problém, jelikož mezi tkaninou a žebrem je tupý úhel. Při pokládání horních vrstev

tkanin jsme museli počítat s větším rozměrem kvůli přechodu přes žebro. Tato velikost vždy závisí na druhu a počtu a velikosti žeber.



Obr. 33. Horní vrstvy výztuže

Dalším krokem byla příprava odvodu přebytečné pryskyřice pomocí spirálových trubiček. Na formu byla nalepena oboustranná těsnící páska AT-200Y. Páska nebyla nalepena po celém obvodu, ale pouze v některých částech a to kvůli úspoře materiálu. Spirálové hadice byly v rozích spojeny „L“ kolínky. Pro napojení odvodu pryskyřice na rezervoár bylo použito „T“ kolínko.

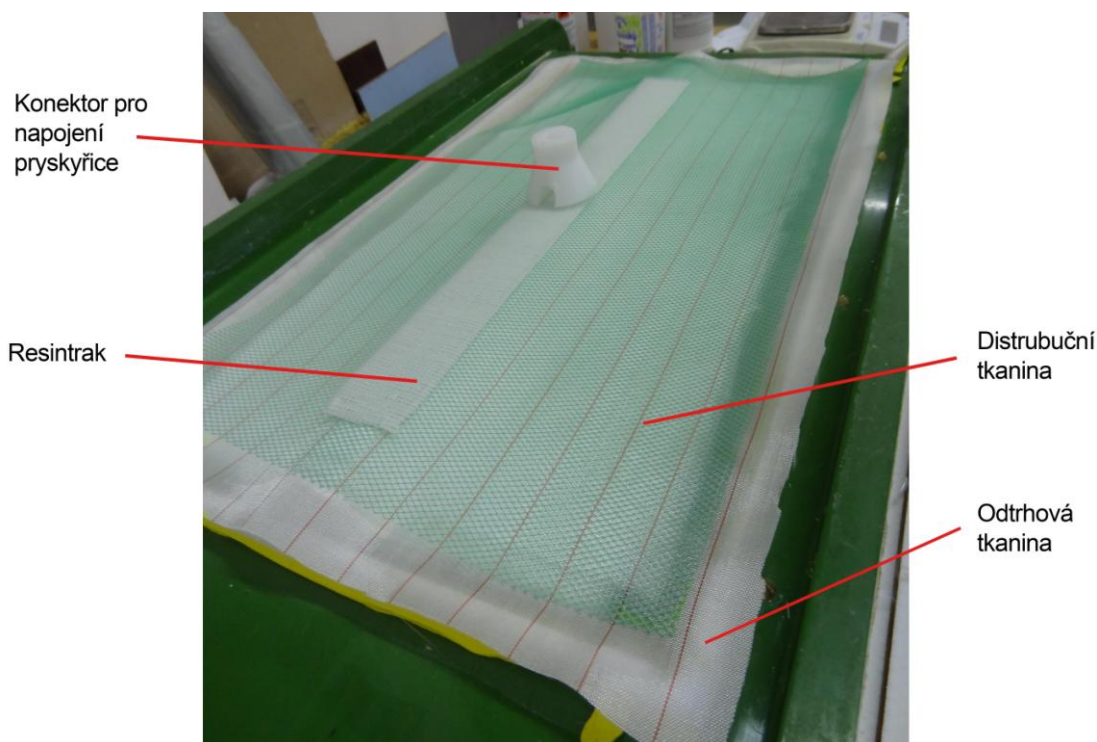


Obr. 34. „L“ kolínko a přichycení spirálové hadice k formě

Na takto připravenou formu se následně kladou pomocné vrstvy. Jako první tkanina, která se pokládá přímo na výztuž je odtrhová. Její rozměr musí přesahovat přes spirálové hadice a je nutno počítat s tím, že překládáním přes žebra bude nutno použít o něco větší rozměr.

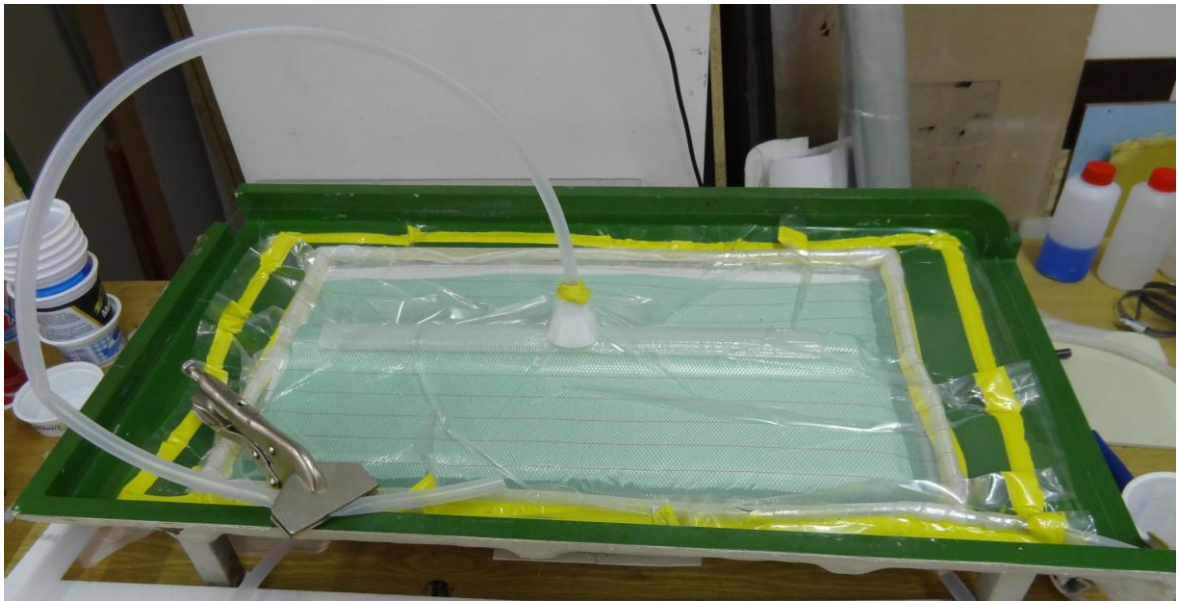
Další pomocná vrstva byla použita distribuční médium, které zajišťuje lepší tok pryskyřice. Musí být na místech, kde chceme, aby pryskyřice prosytila výztuže. Další pomocný materiál pro lepší rozvod pryskyřice byl použit Resintrak. Jeho umístění bylo zvoleno přímo na

pěnové žebro. Pro lepší rozvod pryskyřice byla jeho délka zvolena téměř přes celou délku žebra.



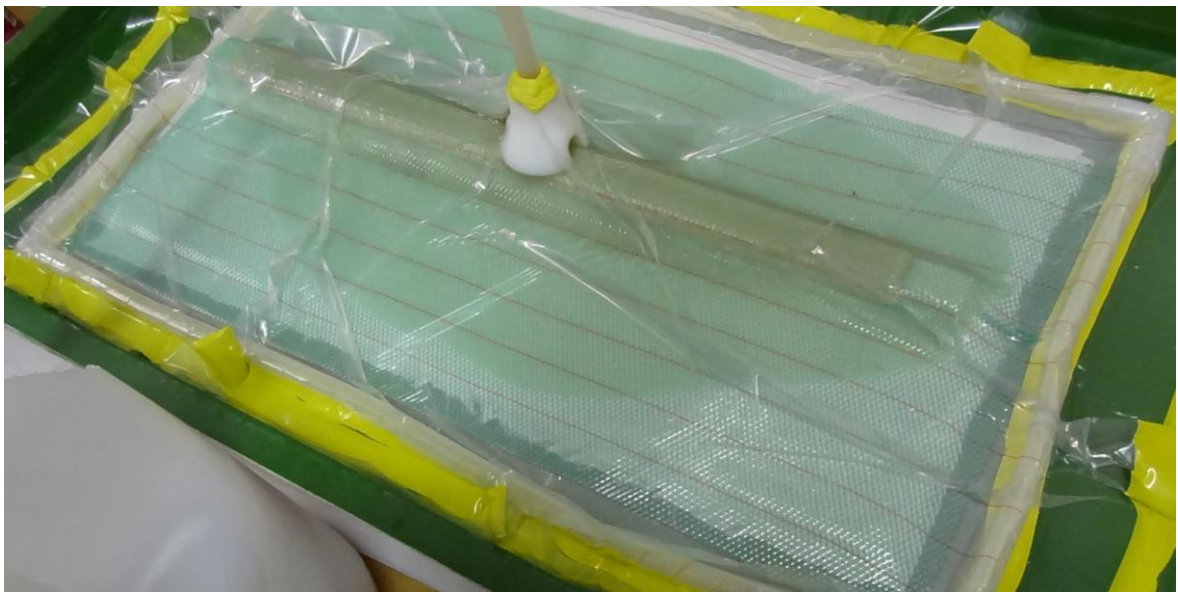
Obr. 35. Pomocné materiály pro vakuovou infuzi

Poslední vrstva je vakuová fólie, která pokrývá všechny pomocné materiály. Důležitou roli hraje rozměr vakuové fólie, ten byl zvolen cca. o 30% větší než odtrhová tkanina. Fólie musí být volná, nenapnutá a to kvůli plnému pokrytí rohů a členitých částí výrobku. Na folii se po okrajích nalepí oboustranná těsnicí páska k utěsnění vakua. Připravená folie se přilepí na formu a důkladně se utěsní. Při utěsňování se nechal působit podtlak. Špatně utěsněná místa byly zalepeny těsnicí páskou. Správně se utěsněná folie se kontrolovala pomocí měřiče podtlaku, kdy se hodnota pohybovala okolo 1 Bar. Po vypnutí vakuové vývěvy musí podtlak po nějakou dobu neklesat. Přívodní polyethylenové hadice byla spojena s přívodním konektorem a utěsněna těsnicí páskou. Druhý konec hadice byl sepnut kleštěmi, aby do formy nevnikal nežádoucí vzduch.



Obr. 36. Pohled na zavakuovaný výrobek

Pryskyřice se v nádobě promíchala s iniciátorem, v našem případě to byl butanox. Před začátkem gelace byla přívodní hadice ponořena do pryskyřice a kleště odpojeny. Tím začal proces infuze, kdy byla pryskyřice dopravována pomocí podtlaku do výrobku.



Obr. 37. Proces infuze

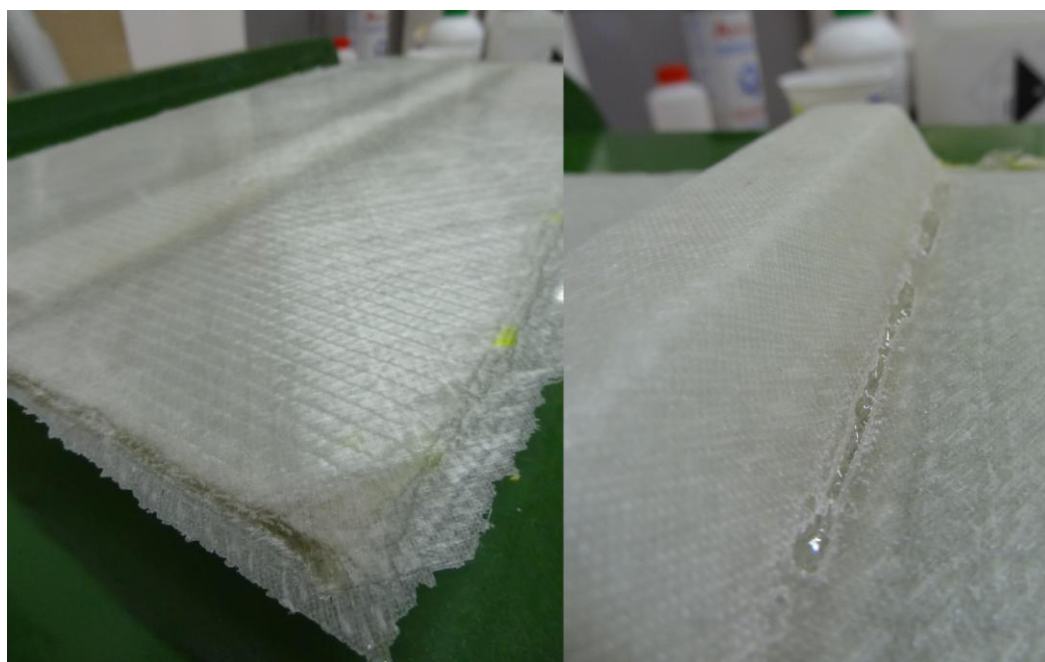
Zhodnocení

Při výrobě výrobku s PET pěnou došlo ke 100% zaplnění. Tok pryskyřice byl rovnoměrný. Po odformování byly na nepohledové straně výrobku zjištěny vzduchové kapsy mezi žebrem a výztuží. Snížení těchto vad by se dalo dosáhnout nastřížením horních výztuží a následným založením do rohů. Rozvodnou tkaninu také nastříhnout a založit do rohů. Pohle-

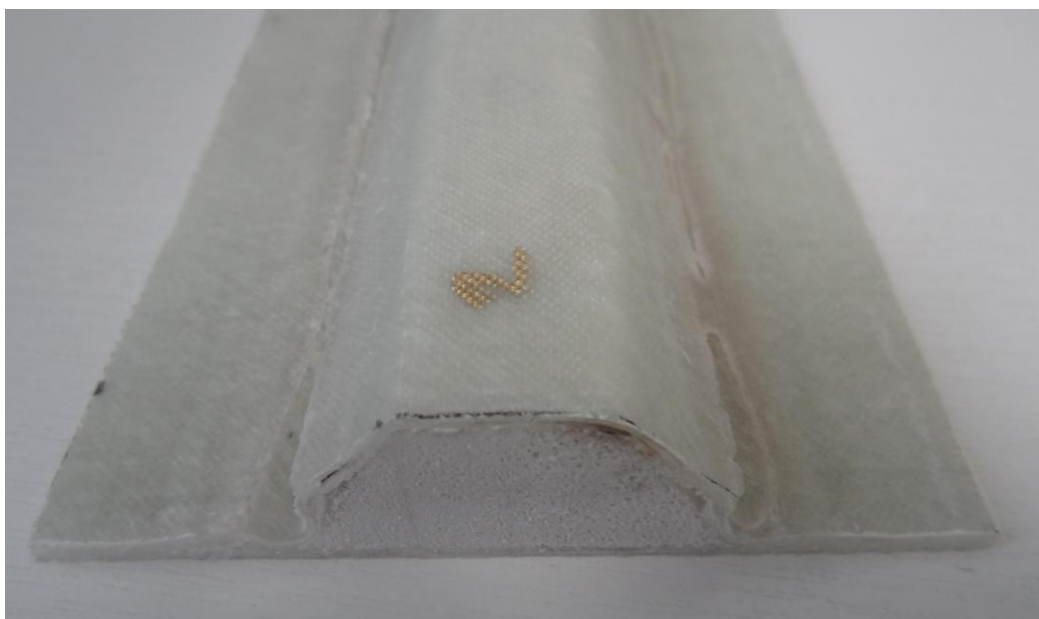
dová strana bez vady. Výsledný výrobek se jeví velmi pevně a experiment můžeme považovat za zdařilý.



Obr. 38. Pohled na výsledný výrobek



Obr. 39. Detail pohledové strany a vzduchových bublin



Obr. 40. Detail řezu lichoběžníkového žebra z PET pěny

7.2 Žebrování s profilem „U“

Tab. 5. Použité materiály vzorku profilu „U“

Vzorek č.2 – profil U	
Výztuž:	Multiaxiální skelná tkanina +45/-45, 980 g/m ²
Počet vrstev:	4
Materiál žebra:	Samolepící sklená výztuž
Hmotnost výztuží a žebra:	802g
Hmotnost použité pryskyřice:	1095g (POLYLITE 420-100)
Hmotnost použitého tvrdidla:	21,5g (BUTANOX 2%)
Použité pomocné materiály:	Odrhová tkanina, rozvodná tkanina, oboustranná lepící páska, plná a spirálová hadice, kolínka „T“ a „L“, vakuovací folie, fixační sprej, samolepící skelná výztuž
Vakuová infuze 100%	ANO
Vakuová infuze 100% [min.]	5:45
Začátek gelace 100% [min.]	10:30

Samotná výroba profilu „U“ spočívala v ohýbání samolepící skelné výztuže, za pomoci fixačního spreje, do požadovaného tvaru. Před ohýbáním byla tkanina pokryta pevnou fo-

lí, aby nedošlo k slepení nežádoucích částí. Ohýbání se provádělo přes obdélníkové plastové profily.

Postup výroby:

Na naseparovanou formu se položily dvě vrstvy skelných výztuží, vlákna byly orientované ve stejném směru. Bylo použito fixační lepidlo AIRTAC 2 pro lepší spojení výztuží. Na spodní dvě vrstvy byly položeny dva profily „U“ o rozměrech 70 x 500 mm.

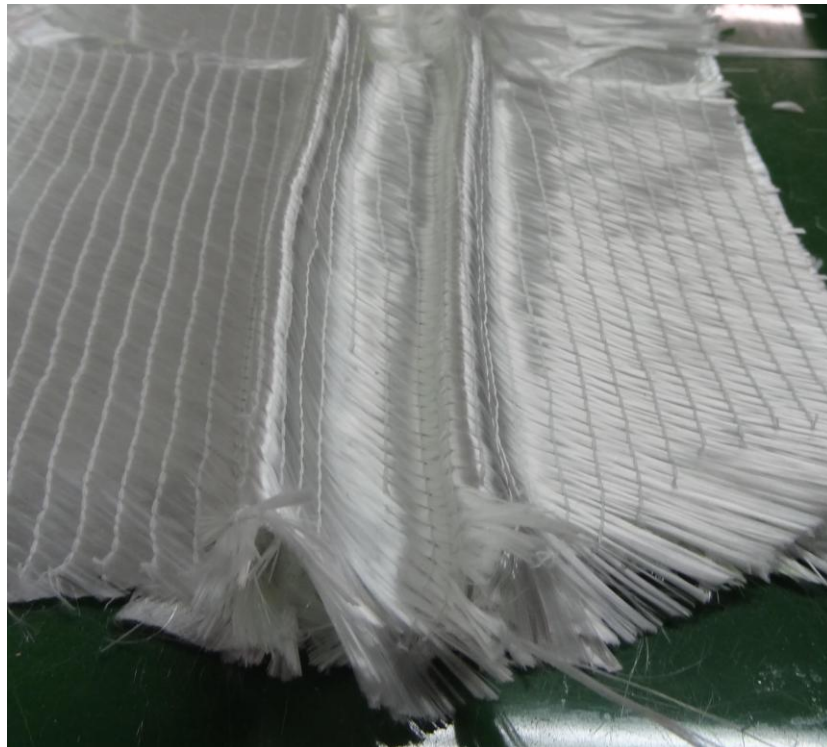


Obr. 41. Detail „U“ profilu a pohled shora

Horní dvě vrstvy se musely co nepřesněji kopírovat tvar žebra. Největší problém vznikal mezi výztuží a žebrem, kde vzniká pravý úhel, který se těžko dosahoval. Pomocí přítlačných válečků a fixačního spreje AIRTAC 2 se položily skelné tkaniny. Z důvodu úspory materiálu nebyly horní vrstvy v celku, jako je to u výrobku s PET pěnou.



Obr. 42. Horní vrstva skelné výztuže založená do profilu „U“



Obr. 43. Detail založení profilu „U“

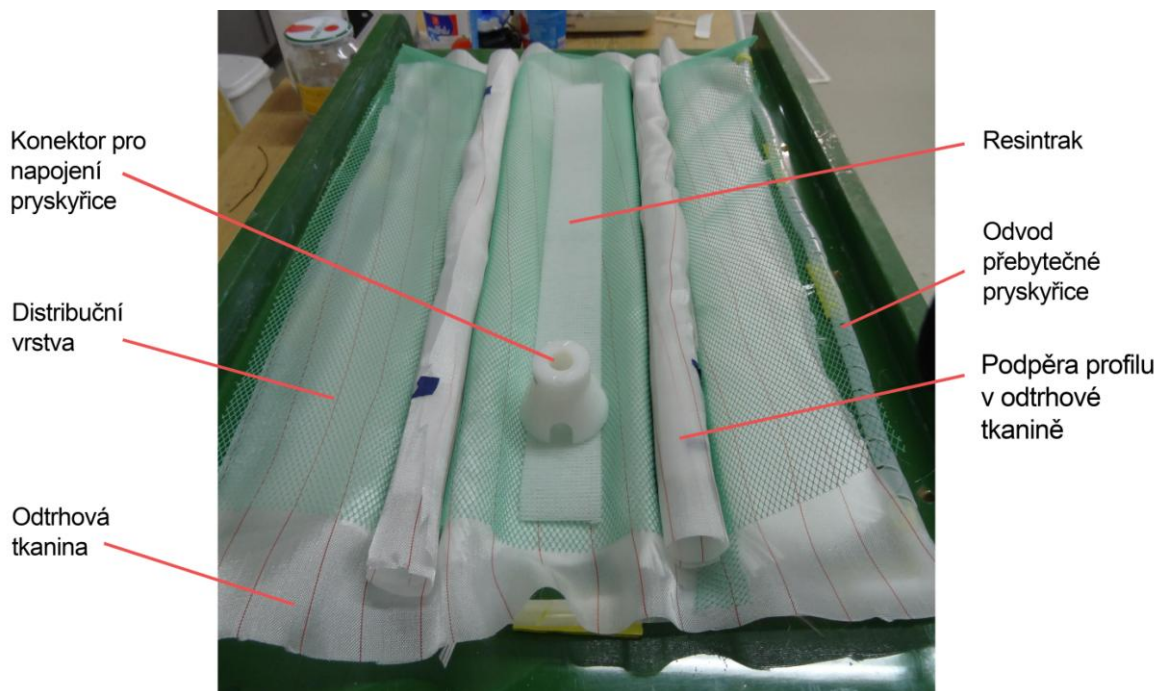
Dalším krokem byla příprava odvodu přebytečné pryskyřice pomocí spirálových trubiček. Na formu se nalepila oboustranná těsnící páska AT-200Y. Páska nebyla nalepena po celém obvodu, ale pouze v některých částech, a to kvůli úspoře materiálu. Spirálové hadice byly v rozích spojeny „L“ kolínky. Pro napojení odvodu pryskyřice na rezervoár bylo použito „T“ kolínko.

Tkanina, která se pokládá přímo na výztuž je odtrhová. Její rozměr musí přesahovat přes spirálové hadice a je nutno počítat s tím, že překládáním přes žebra bude nutno použít o něco větší rozměr.

Jako další pomocná vrstva bylo použito distribuční médium, které zajišťuje lepší tok pryskyřice. Musí být na místech, kde chceme, aby pryskyřice prosytila výztuže. Další pomocný materiál pro lepší rozvod pryskyřice byl použit Resintrak o délce 400mm.

Vzniklý podtlak o hodnotě 1 bar by bez pomocné podpěry profil žebra zcela zdeformoval. Bylo nutno vyrobit podpěru, která by zabránila zdeformování profilu a držela tvar při působení podtlaku. Podpora byla vyrobena z dřevěné desky o velikosti 25 x 25 x 400 mm. Kvůli snadnějšímu odformování byla podpěra zabalena do odtrhové tkaniny. Takto zabalená podpěra byla následně vložena do profilu. Podpěra se umístila pouze mezi vnitřní stěny

výrobku. Cílem bylo, aby působení tlaku tlačilo profil směrem na podpěru, z toho důvodu byla podpěra zvolena pouze uprostřed. Pro lepší tok pryskyřice byla pod podpěrou vložena další vrstva rozvodné tkaniny.

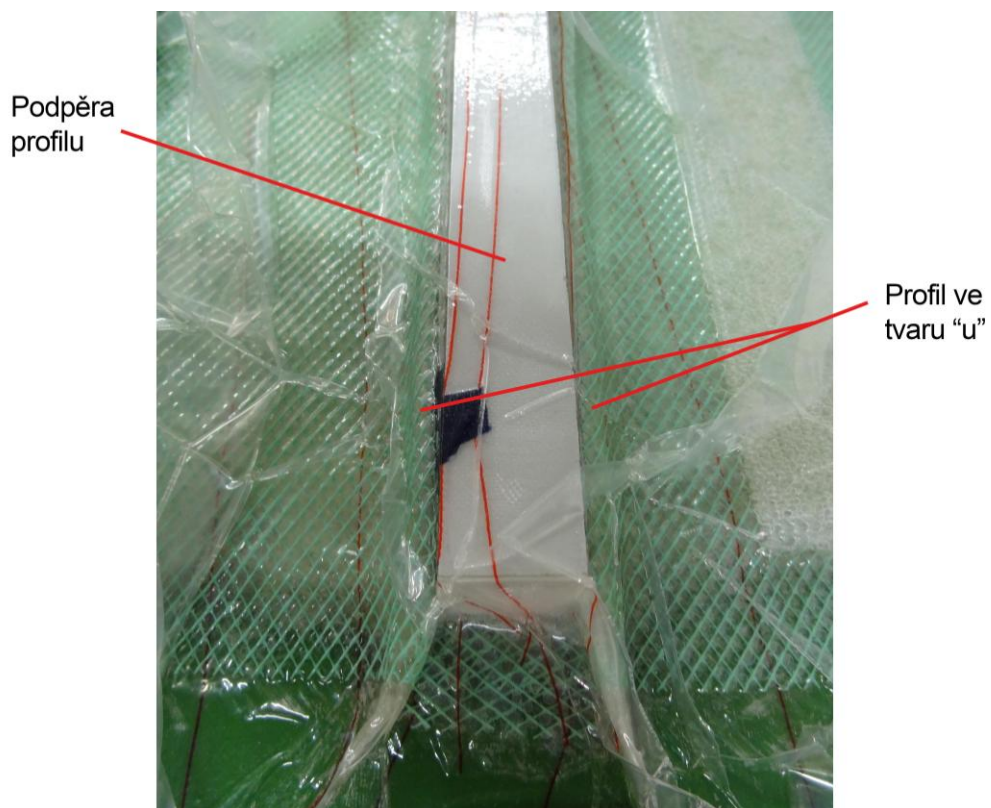


Obr. 44. Pomocné materiály při výrobě profilu „U“

Následovala příprava a aplikace vakuovací folie jako v případě u výrobku s PET pěnou. Proběhlo utěsnění folie a kontrola podtlaku na vakuometru. Do konektoru pro přívod pryskyřice byla připojena hadice, která byla na druhém konci sepnuta kleštěmi. Po správném utěsnění se pryskyřice v nádobě promíchá s iniciátorem, v našem případě to byl butanox. Při začátku gelace byla přívodní hadice ponořena do pryskyřice a kleště odpojeny. Tím začal proces infuze, kdy byla pryskyřice dopravována pomocí podtlaku do výrobku.



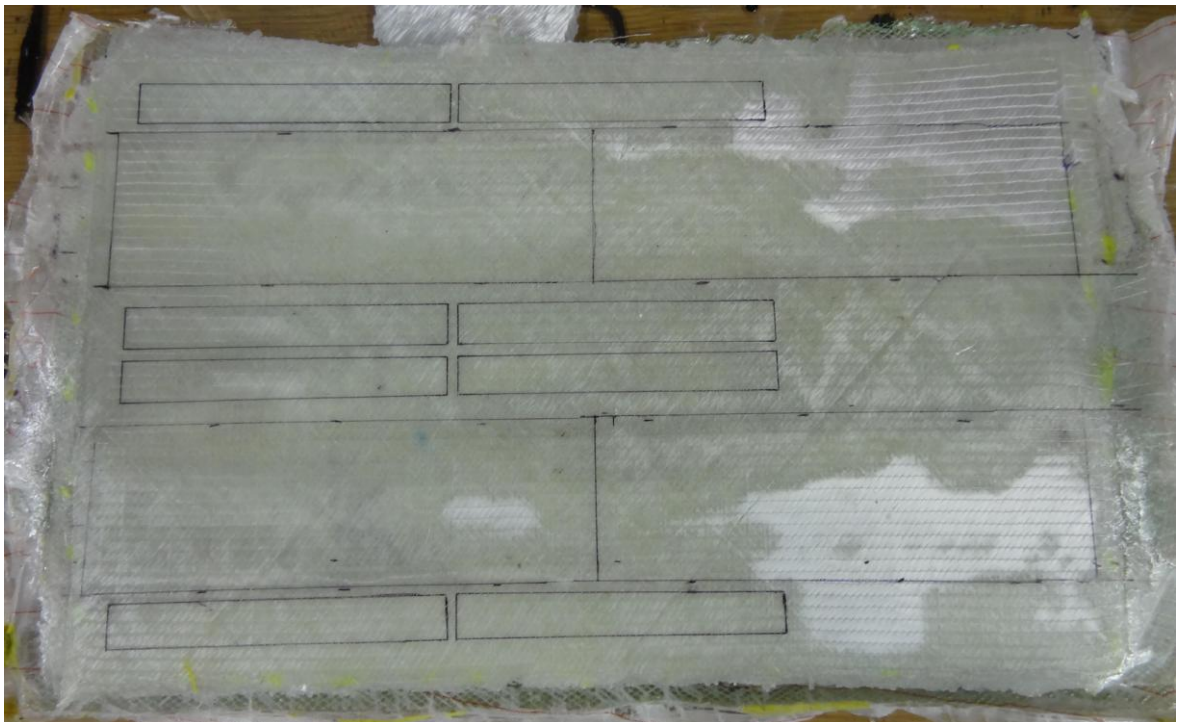
Obr. 45. Proces infuze



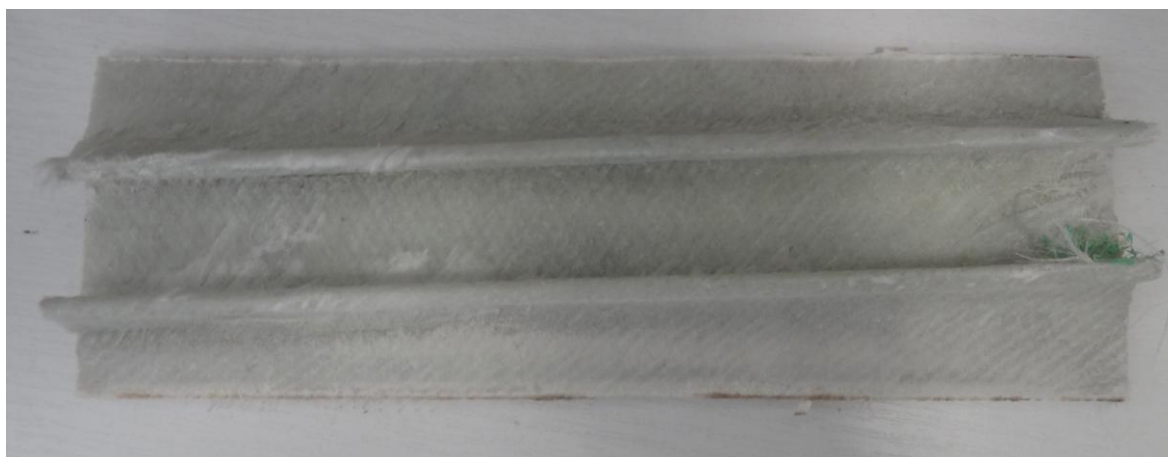
Obr. 46. Detail podpěry při procesu infuze

Zhodnocení

Při samotném procesu infuze se prosycení výztuží jeví jako bezproblémové. Kompozitní vzorek měl suchá místa (obr. 47.), jejich příčinou může být kolísání podtlaku při samotném procesu infuze. Na testování ohybových vlastností tedy byla použita pouze prosycená část výrobku. Komplikace nastaly při odstranění odtrhovací tkaniny spolu s dalšími pomocnými materiály včetně podpěry. Podpěra vytvořila velmi pevný spoj s výrobkem na nepohledové straně, který nešel odstranit. Tento problém vyřešila firma FORM s.r.o. která použila pro odstranění podpěry stlačený vzduch. Jako návrh na zlepšení je zvýšení hmotnosti použité pryskyřice, nebo použít pryskyřici s větší hustotou pro pomalejší odvod pryskyřice z výrobku. Pro snadnější odstranění podpěry profilu z vyrobeného výrobku lze využít vakuovou folii i pro obalení podpěry. Při použití folie tak nedojde k vytvoření silného spojení mezi výrobkem a podpěrrou. Po nařezání na vzorky pro ohybovou zkoušku se zjistilo, že profil žebra je mírně zdeformován. Tento problém lze vyřešit lepším návrhem podpěry žebra, kterou se zabývám v další části bakalářské práci.



Obr. 47. Pohledová strana s neprosycenými místy



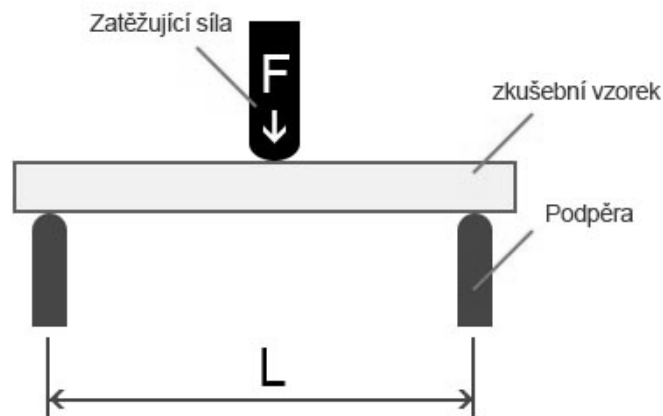
Obr. 48. Nepohledová strana výrobku po nařezání



Obr. 49. Detail žebra „U“

8 STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ

Stanovení ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178 bylo provedeno na stroji ZWICK 1456 pomocí 3-bodové ohybové zkoušky. Síla F působila uprostřed kolmo na vzorek, kde docházelo k jeho prohnutí a následnému prasknutí. Kompozitní materiály měly houževnatý lom, který vedl ke stálému deformování materiálu a následnému sklouznutí z podpěr. Vzdálenost podpěr se volila podle vztahu $L = 16.h$. Naším cílem při ohybové zkoušce bylo zjistit, jaký vliv mají žebrované konstrukce na mechanické vlastnosti.



Obr. 50. Schéma ohybové zkoušky

Základní výpočty pro 3-bodový ohyb:

$$\text{Ohybové napětí:} \quad \sigma = \frac{M_{max}}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

$$\text{Maximální ohybový moment :} \quad M_{max} = \frac{F_{max} \cdot L}{4} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (7)$$

Pro vzorek o šířce b (mm) a výšce h (mm) platí:

$$\text{Ohybový modul průřezu:} \quad W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad [\text{mm}^3] \quad (8)$$

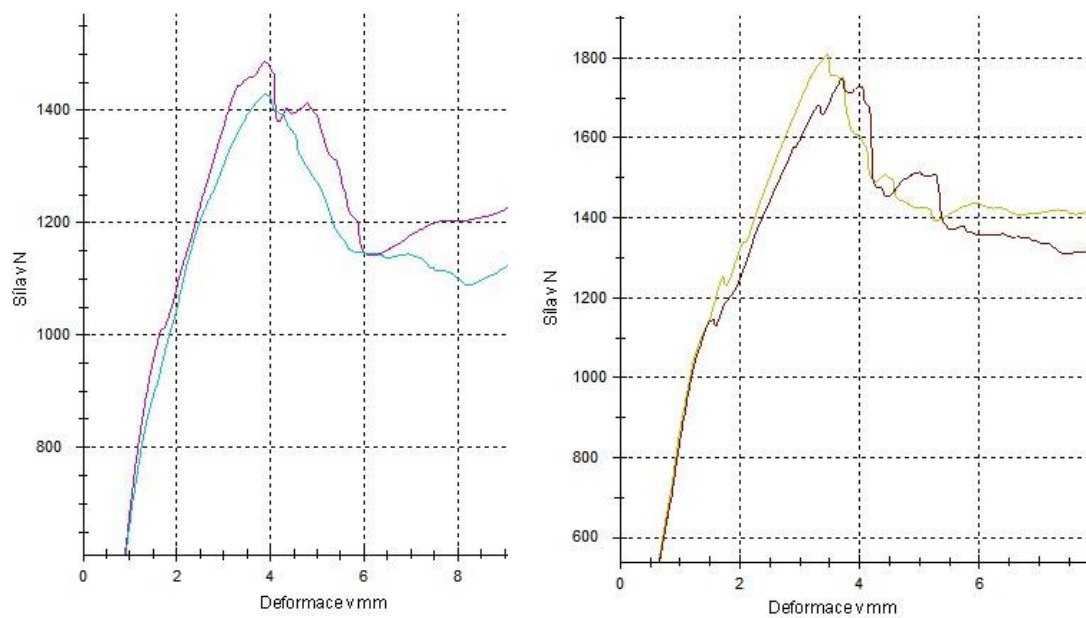
Kde: L – vzdálenost podpěr [mm]

F_{max} – zatěžující síla [N]

8.1 Ohyb lichoběžníkového profilu - PET pěna



Obr. 51. Provedení ohybové zkoušky



Obr. 52. Ohybové křivky

Tab. 6. Naměřené hodnoty lichoběžníkového PET profilu

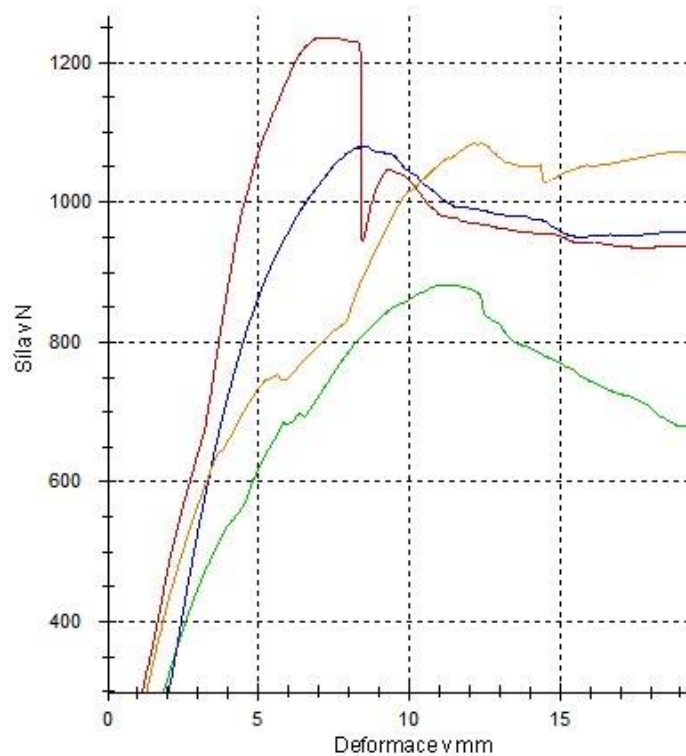
n=4	E_f [MPa]	σ_{fy} [MPa]	F_{max} [N]	ε_{fM} [%]	W_{fM} [N.mm]	W_0 [mm ³]
\bar{x}	2525	12,675	1990	12,32	68561,54	2899,9
s	384,75	1,14	327,5	1,9	19522,4	0
v	15,23	9,05	16,46	15,50	28,47	0

Průměrná hodnota maximální síly, kterou kompozit vydržel, činí **1990 +/- 16,46 N**.

8.2 Ohyb profilu „U“



Obr. 53. Delaminace při provedení ohybové zkoušky



Obr. 54. Ohybové křivky profilu „U“

Tab. 7. Naměřené hodnoty profilu „U“

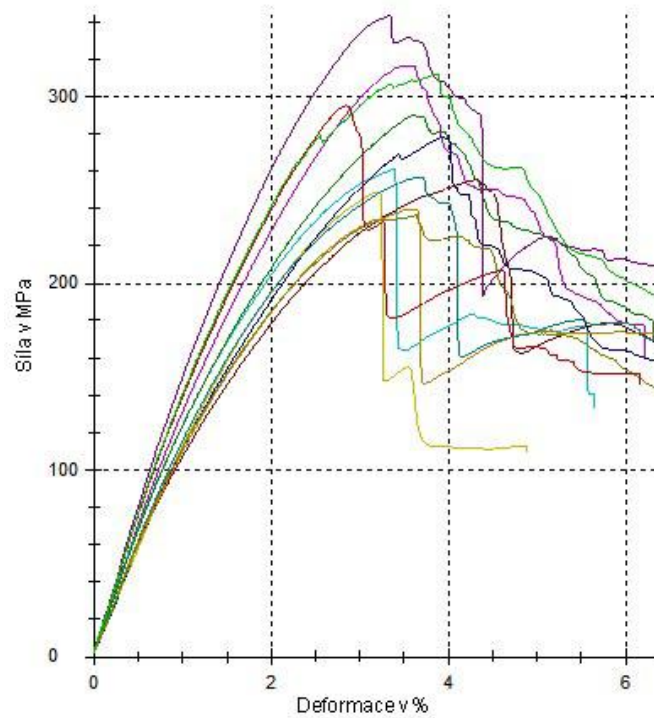
n=4	E_r [MPa]	σ_{fy} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_{fM} [%]	W_{fM} [N.mm]	W_0 [mm ³]
\bar{x}	543	7,87	1078	4,1	11082,11	243,8
s	271	2,29	148,0	2,8	10094,98	0
v	49,78	29,11	13,73	70,03	91,09	0

Průměrná hodnota maximální síly, kterou kompozit vydržel, činí **1078 +/- 13,73 N**.

8.3 Ohyb tělíska 20x150mm



Obr. 55. Tělíska 20 x 150 mm



Obr. 56. Ohybové křivky – 20 x 150 mm

Tab. 8. Naměřené hodnoty tělíska 20 x 150 mm

n=12	E_f [MPa]	σ_{fy} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]	W_{fM} [N.mm]	a [mm]	b [mm]	S [mm ²]
x	12500	180	278	3,6	1795,27	2,8	20	56
s	1510	28,7	33,9	0,4	277,43	0	0	0
v	12	15,95	12,22	10,45	15,45	0	0	0

Ohybové napětí vztažené na průřezovou plochu vzorku **278 +/- 12,22 MPa**.

8.4 Ohybová tuhost

Žebrovanými konstrukcemi se zvyšuje ohybová tuhost. Následující tabulky porovnávají poměr teoretické ohybové tuhosti mezi vzorky s žebrováním a bez žebrování (bez změny tloušťky stěny).

J, W - parametry s žebrováním

J_0, W_0 - parametry bez žebrování

Tab. 9. Ohybová tuhost profilu „U“

Vzorek	s žebrováním	bez žebrování	J/J ₀	W/W ₀
J [mm ⁴]	3297	72	45,8	-
W[mm ³]	243,8	48	-	5

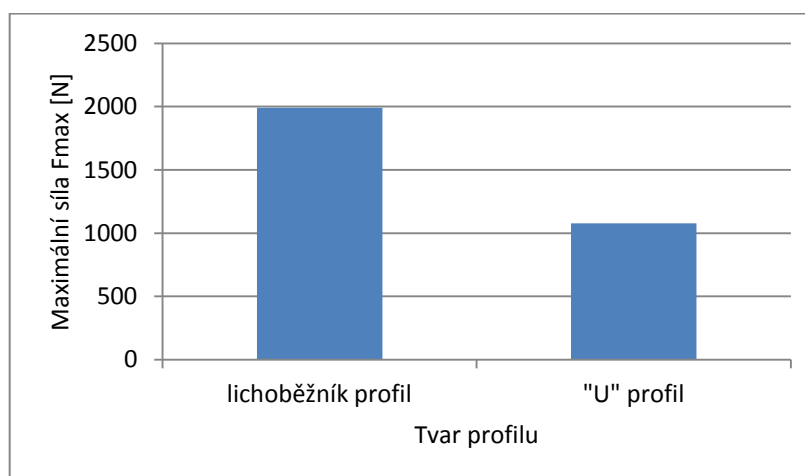
Dle tab. 9. je zřejmé, že při přesné výrobě žebrovaného kompozitu profilu „U“ bychom zvýšili tuhost 45,8krát oproti stejnému vzorku bez žebrování. Stanovaná ohybová únosnost $k_u=5$. Rozpětí žeber $t=32$ mm.

Tab. 10. Ohybová tuhost lichoběžníkové profilu

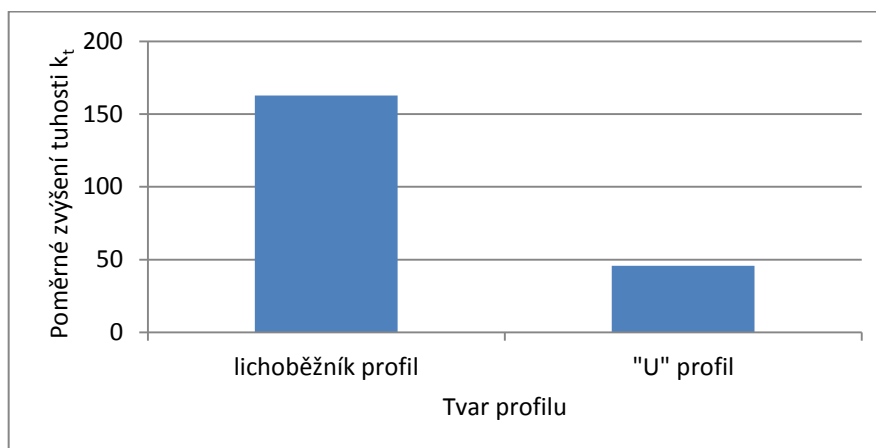
Vzorek	s žebrováním	bez žebrování	J/J ₀	W/W ₀
J [mm ⁴]	37698	231,8	162,7	-
W[mm ³]	2899,9	154,5	-	18,8

Dle tab. 10. je zřejmé, že při přesné výrobě žebrovaného kompozitu lichoběžníkového profilu z PET pěny bychom zvýšili tuhost 162,7krát oproti stejnému vzorku bez žebrování. Stanovaná ohybová únosnost $k_u=18,8$. Rozpětí žeber $t=103$ mm.

8.5 Vyhodnocení ohybové zkoušky



Obr. 57. Hodnoty maximální síly z ohybové zkoušky



Obr. 58. Poměrné zvýšení tuhosti

Tuhost experimentálně vyrobených výrobků technologií vakuové infuze byla zvyšována žebrováním. Byly navrženy dva tvary profilů, lichoběžníkový a myšlený U-profil. Při porovnání tvarů, které jsme v experimentu použili, můžeme konstatovat lichoběžníkový tvar z hlediska tuhosti vyšší. Sílu, kterou kompozit s lichoběžníkovým tvarem vydržel, činí 1990N a poměrné teoretické zvýšení tuhosti $K_t=162,7$, tedy 162,7krát vyšší než stěna bez výztuže žebrováním.

Profil tvaru „U“ vydržel sílu 1078N a jeho poměrné teoretické zvýšení tuhosti je 45,8krát vyšší než u stěny bez žebrování.

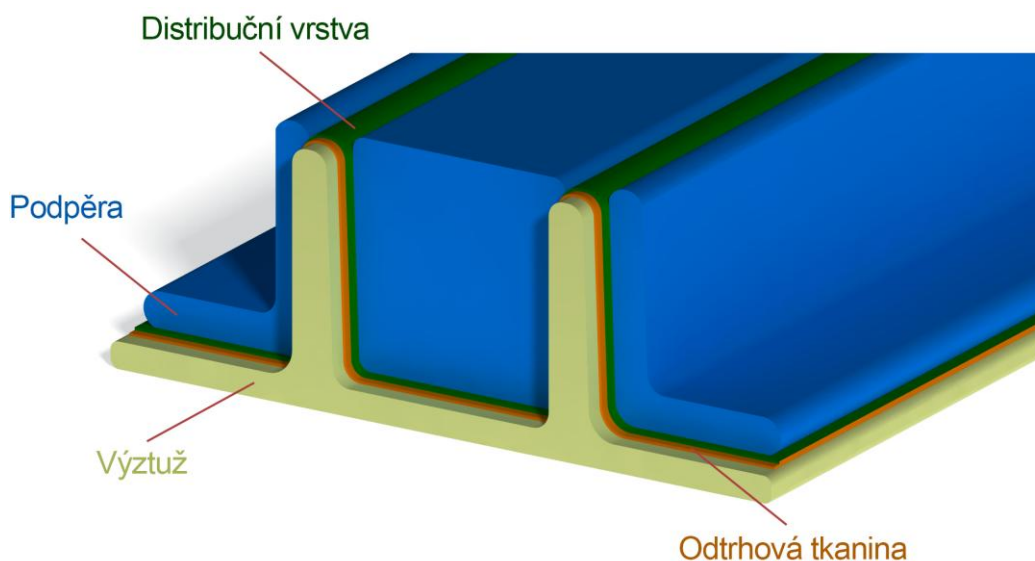
Lichoběžníkový tvar je tedy velmi dobře tvarově vyřešen, jeho výroba je i jednodušší než myšlený U-profil.

Při vyhodnocení experimentálně stanovených hodnot tuhosti a únosnosti navržených profilů, je třeba brát zřetel, že v našem případě jsme měli u lichoběžníkového profilu použitou PET pěnu, celý profil tedy nebyl z jednoho materiálu – skelná tkanina/PET pěna. Proto je velmi obtížné srovnat teoretické a experimentálně stanovené hodnoty. V případě U profilu je potřeba zajistit fixování profilu v průběhu vákuování, protože tlakem dochází ke zborcení. Proto byl navržen způsob jejich fixování, viz kapitola 9, které by eliminovali deformace žeber a tím by byla lepší shoda mezi teoretickými a praktickými hodnotami. Teoretické a praktické hodnoty se výrazně liší i díky delaminaci kompozitního materiálu při ohybové zkoušce.

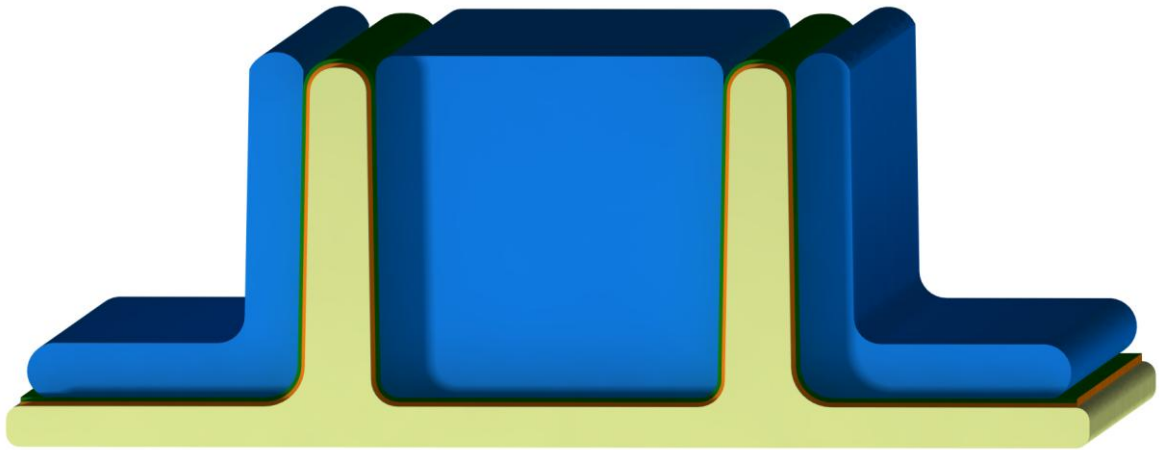
9 NÁVRH VÝROBY ŽEBROVANÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ POMOCÍ VAKUOVÝCH TECHNOLOGIÍ

Při výrobě kompozitního výrobku byla použita podpěra z dřevotřísky. Jak se ukázalo, mezi výztuží a podpěrou se vytvořil velmi silný spoj díky adhezni (přilnavé) síle. Tuto sílu můžeme minimalizovat vysokou jakostí a přesností ploch podpěry. Volba materiálu podpěry závisí na použité pryskyřici, vytvrzovací teplotě. Lze využít např. polypropylen, který je chemicky odolný a odolává teplotě až 80°C. Při výrobě technologií vakuové infuze byl na formu použit separátor, který má za úkol zvýšit povrchové napětí na ploše formy a tak zajistit aby matrice nevytvořila spoj s vyráběným dílem. Tento separátor lze nanést na plochy podpěry a snížit tak adhezni sílu. Separátor nesmí chemicky ani mechanicky poškozovat formu. Všechny tyto vlastnosti splňuje také nanokapalina, která se v dnešní době nejčastěji využívá pro ochranu materiálu před vlhkostí a nečistotami. Po nanesení na povrch podpěry se nosná kapalina vypaří a na povrchu zůstane pouze vrstva nanočástic. Lze předpokládat, že takto upravený povrch bude vykazovat menší přilnavost k výztužím.

Vzniklý podtlak při výrobě technologií vakuové infuze je poměrně velký a je třeba minimalizovat deformaci profilu. Při výrobě profilu „U“ bylo zjištěno, že použitá podpěra není dostatečná a profil je částečně zdeformován. Dřevěná podpěra o čtvercovém průřezu rozměru 25 x 25 mm má ostré hrany, které neumožňují správné dosednutí do rohů profilu, což může mít za následek deformaci. Pro správný tvar profilu je vhodné také použít podpěry z obou stran.



Obr. 59. Návrh výroby profilu „U“



Obr. 60. Návrh výroby profilu „U“

Podpěry se pokládají na pomocné vrstvy, tzn. pod vakuovou folii. Použité podpěry jsou dostupné u firem zabývajících se výrobou plastových profilů. Základním tvarovým požadavkem pro správně zvolenou podpěru je vytvořené zaoblení na vnější straně. Polypropylenové profily lze používat opakovaně a i pro jiné rozměry vyráběných výrobků.

Před aplikací vakua lze připravené podpěry sepnout svěrkami. Svěrky spolehlivě zafixují budoucí tvar výztužných žebek a sníží možnou deformaci.



Obr. 61. Svěrky 510 firmy JC-metal s.r.o. [24]

10 PŘÍKLADY POUŽITÍ KOMPOZITŮ VYZTUŽENÝMI ŽEBROVÁNÍM

Kompozitní materiály jsou dnes už velmi známy. Jejich použití nalezneme v automobilovém, leteckém, lodním a energetickém průmyslu, výrobě kolejových vozidel, manipulační a automatizační techniky, vojenské techniky, výrobní stroje a zařízení. Kompozity jsou již dnes používány jako dynamicky namáhané součásti. Žebrované konstrukce zvyšují pevnost daného výrobku a zajišťují tak plnit funkci nosných konstrukcí.

Příklady použití kompozitních materiálu vyztuženými žebrováním:

- Protipovodňové zábrany
- Nosné konstrukce
- Prvky do agresivního prostředí
- Trupy letadel



Obr. 62. Mobilní protipovodňová zábrana [23]

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá experimentální výrobou žebrovaných kompozitních materiálů vakuovou infuzí pod pružnou folií, kde jsou žebra kladeny mezi skelné výztuže. Vzniká tak žebrovaný kompozitní materiál vyrobený v jednom kroku. Byly vyrobeny dva typy žeber při použití stejné pryskyřice POLYLITE 420-100 a multiaxiální výztuže SEARTEX +45/-45, 980 g/m². Praktická část popisuje postup experimentální výroby, který byl u obou případů podobný. Z hlediska výroby můžeme považovat experiment, i přes drobné problémy, za zdařilý. Podařilo se totiž vytvořit pomocí vakuové technologie žebrovaný polymerní kompozit.

Lichoběžníkový profil z PET pěny byl výrobně jednoduchý, při výrobě nenastaly žádné problémy a po odformování byl výrobek v celé jeho tloušťce prosycen. Při ohybové zkoušce tělísko vydrželo sílu 1990N. Poměrné teoretické zvýšení tuhosti se zvětšilo až 162krát při rozpětí žeber 103mm. Výhodou je jednodušší výroba a větší tuhost.

Myšlený U-profil byl vyroben ze samolepící multiaxiální skelné tkaniny a pomocí plastových profilů byl ohnut do požadovaného tvaru. Postup výroby byl podobný jako u předchozího vzorku. Změna nastala po kladení horních výztuží, kde vytvořené žebro by se při aplikaci podtlaku zdeformovalo. Proto byla vytvořena jednoduchá dřevěná podpěra, která držela tvar žebra. Při ohybové zkoušce tělísko vydrželo sílu 1078N. Poměrné teoretické zvýšení tuhosti se zvětšilo až 45,8krát při rozpětí žeber 32mm.

Ze získaných zkušeností při výrobě vakuovou infuzí pod pružnou folií byla navržena podpěra pro výrobu u-profilu. Tato podpěra nevytvoří spojení s matricí a bude snadno odformovatelná. Další změnou je podepření žebra z každé strany a sevření podpěr svěrkami kvůli snížení možné deformace. Žebrované kompozitní materiály vyrobené v jednom kroku mají velký význam oproti žebřům lepeným. Lepení žeber je totiž časově i finančně náročnější.

Závěrem lze říct, že cíl bakalářské práce byl dosažen. Podařilo se vytvořit kompozitní materiál vakuovou infuzí v jenom kroku. Z experimentální části vyplývá, že výrobně i pevnostně je na tom lépe lichoběžníkový profil z PET pěny. Využití najde např. při výrobě protipovodňové zábrany, výrobě nosných konstrukcí, trupy letadel apod.

Téma bakalářské práce bylo pro mě zajímavé a poučné. Velkým přínosem pro mě byla i část praktická, kde jsem získal zkušenosti s výrobou kompozitních materiálů, které se mohou v budoucnu hodit.

SEZNAM POUŽITÉ 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. Praha: 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] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [6] Technologie jejich popis a schémata. *Havel-composites.com* [online]. 2005 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [7] Guide to Composites. *Gurit.com*. [online]. [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites.pdf
- [8] Vacuum foil infusion / Resin transfer moulding. *Reichhold*. [online]. [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/reichhold/vacuum-foil-rtm-process-emea/37855-152670.html>
- [9] Infuzní technologie výroby kompozitů a jejich simulace v MKP. F. Martaus VZLÚ, a.s. [online]. [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Infuze_VZLU.pdf
- [10] Kompozity. *FSI VUT v Brně*. [online]. [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>
- [11] ING. ZDENĚK KOŘÍNEK, CSc. Kompozity [online]. [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [12] ZOLTEK. *Carbon Fiber* [online]. [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: <http://www.zoltek.com/carbonfiber/>
- [13] ROVINGOVÉ TKANINY. *Altima Bohemia s.r.o.* [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.altimaboheemia.cz/rovingove-tkaniny.html>

- [14] Technologie. *LA COMPOSITE*. [online]. [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: <http://www.lacomposite.com/technologie-kompozitni-autoklav.html>
- [15] Glass fiber. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber
- [16] What is resin infusion (or vacuum infusion)?. *VACMOBILES.COM*. [online]. [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: http://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html
- [17] Aircraft spruce canda: *KEVLAR 49 ROVING*. [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: <http://www.aircraftspruce.ca/catalog/cmpages/kevlar49.php>
- [18] Airtech.lu [online]. c2011 [cit. 2011-03-12]. Catalogue Airtech. Dostupné z WWW: <<http://catalogue.airtech.lu/index.php?lang=EN>>
- [19] Industrial Use Vacuum Pumps & Valves: blog. Telstar Vacuum Solution [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.telstar-vacuum.com/en/node/5073>
- [20] Karoserie autobusu. Compact [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.compact-composite.cz/hotove-produkty-autobus.html>
- [21] Tailor-made reinforcements. *SAERTEX* [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: http://www.saertex.com/uploads/media/reinforcements_01.pdf
- [22] Casemodding: Kompozitní zázrak – laminát [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hlavni-stranka/12243?start=3>
- [23] Mobilní protipovodňové zábrany. *VOP Dolní Bousov* [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.vop-db.cz/protipovodnova_ochrana_zabrany.html
- [24] Svěrky a ztužidla: 510 - 530. *JC-METAL S.R.O.* [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://jcmetal.cz/2-produkty/12-sverky-a-ztuzidla.html>

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 žeber [mm]
K_u	koeficient zvýšení únosnosti
K_t	koeficient zvýšení tuhosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Kovové pěny [4]</i>	13
<i>Obr. 2. Rozdělení podle geometrie a orientace výztuže [4]</i>	14
<i>Obr. 3 Rozdělení kompozitních materiálů dle výztuže [10]</i>	16
<i>Obr. 4. Rozdělení nejčastěji používaných vláken [1]</i>	17
<i>Obr. 5. Skleněná vlákna [15]</i>	18
<i>Obr. 6. Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm v porovnání s lidským vlasem. [12]</i>	19
<i>Obr. 7. Aramidové vlákna [17]</i>	20
<i>Obr. 8. Základní typy tkanin [1]</i>	21
<i>Obr. 9. Skelná tkaninová výztuž [22]</i>	22
<i>Obr. 10. Schéma čtyřvrstvé multiaxiální tkaniny [21]</i>	22
<i>Obr. 11. Znázornění vyztužení stěny jednosměrnými žebry [5]</i>	23
<i>Obr. 12. Schéma ručního laminování [7]</i>	25
<i>Obr. 13. Schéma vakuového vaku [7]</i>	26
<i>Obr. 14. Schéma metody tlakového vaku [2]</i>	27
<i>Obr. 15. Schéma stříkání [7]</i>	28
<i>Obr. 16. Schéma RTM [6]</i>	29
<i>Obr. 17. Schéma navijecího zařízení [7]</i>	30
<i>Obr. 18. Schéma pultruze [7]</i>	31
<i>Obr. 19. Autokláv řízený počítačem - průměr 2,3 m, délka 7 m, max. pracovní teplota 200°C, max. pracovní tlak 0,7 MPa [14]</i>	32
<i>Obr. 20. Princip vakuové infuze [16]</i>	33
<i>Obr. 21. Vakuová technologie pod pružnou folií [8]</i>	34
<i>Obr. 22. Schéma RFI – Resin film infusion [7]</i>	35
<i>Obr. 23. Odrhová tkanina Econostitch firmy AIRTECH</i>	38
<i>Obr. 24. Green Flow 75 [18]</i>	39
<i>Obr. 25. Vakuová folie [18]</i>	39
<i>Obr. 26. AIRTECH Resintrak [18]</i>	40
<i>Obr. 27. a) Hadice pro přívod pryskyřice, b) Spirálová hadice [18]</i>	40
<i>Obr. 28. Konektor AIRTECH RIC [18]</i>	41
<i>Obr. 29. Těsnící páska AT-200Y [18]</i>	41
<i>Obr. 30. Vakuová vývěva [19]</i>	41
<i>Obr. 31. Přepadová nádoba RB451 firmy AIRTECH [18]</i>	42

<i>Obr. 32. Dvě spodní vrstvy tkaniny a pěnové žebro</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 33. Horní vrstvy výztuže</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 34. „L“ kolínko a přichycení spirálové hadice k formě</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 35. Pomocné materiály pro vakuovou infuzi</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 36. Pohled na zavakuovaný výrobek</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 37. Proces infuze</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 38. Pohled na výsledný výrobek</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 39. Detail pohledové strany a vzduchových bublin</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 40. Detail řezu lichoběžníkového žebra z PET pěny</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 41. Detail „U“ profilu a pohled shora</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 42. Horní vrstva skelné výztuže založená do profilu „U“</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 43. Detail založení profilu „U“</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 44. Pomocné materiály při výrobě profilu „U“</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 45. Proces infuze</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 46. Detail podpěry při procesu infuze</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 47. Pohledová strana s neprosycenými místy</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 48. Nepohledová strana výrobku po nařezání</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 49. Detail žebra „U“</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 50. Schéma ohybové zkoušky</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 51. Provedení ohybové zkoušky</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 52. Ohybové křivky</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 53. Delaminace při provedení ohybové zkoušky</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 54. Ohybové křivky profilu „U“</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 55. Tělisko 20 x 150 mm</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 56. Ohybové křivky – 20 x 150 mm</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 57. Hodnoty maximální sil z ohybové zkoušky</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 58. Poměrné zvýšení tuhosti</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 59. Návrh výroby profilu „U“</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 60. Návrh výroby profilu „U“</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 61. Svěrky 510 firmy JC-metal s.r.o. [24]</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 62. Mobilní protipovodňová zábrana [23]</i>	<i>65</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vlastnosti keramických částic [4].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2. Nejčastější druhy skel na vlákna do kompozitů [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 3. Srovnání některých vlastností kompozitů [2]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 4. Použité materiály vzorku s PET pěnou.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5. Použité materiály vzorku profilu „U“</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 6. Naměřené hodnoty lichoběžníkového PET profilu</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 7. Naměřené hodnoty profilu „U“</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 8. Naměřené hodnoty tělíska 20 x 150 mm</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 9. Ohybová tuhost profilu „U“</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 10. Ohybová tuhost lichoběžníkové profilu</i>	<i>61</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I - Materiálový list pryskyřice POLYLITE 420-100

PŘÍLOHA P I - Materiálový list multiaxiální tkaniny SEARTEX

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PRYSKYŘICE POLYLITE 420-10

Technický informační list NORPOL 420-100

POPIS

NORPOL 420-100 je středně reaktivní, orthoftalová polyesterová pryskyřice pro injekční vstřikování. NORPOL 420-100 neobsahuje urychlovač a není thixotropizována.

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI V KAPALNÉM STAVU PŘI 23°C

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Viskozita			
-Kužel-Deska	180-210	mPa.s(cP)	ISO 2884-1974
Hustota	1,10	g/cm ³	ISO 2811-1974
Číslo kyselosti	22	mg KOH/g	ISO 2114-1974
Obsah styrenu	43±2	% hm.	-
Bod vzplanutí	34	°C	ASTM D 3278-73
Doba želatínace:			
-1% Norpol 1			
-1% Co urychlovač(1%)	20-30	min.	-
Skla dovratelnost	6	měsíce při teplotě do 23°C	

VLASTNOSTI VÝROBKU VE VYTVRZENÉM STAVU

Vlastnost	Čistá prys.	Skleněná rohož	Jednotka	Zkušební metoda
Obsah skla	-	25-35 35-40	% hm.	ISO 1172-1975
Pevnost v tahu	70	110 160	MPa	ISO 527-1993
E-modul v tahu	3700	8000 10300	MPa	ISO 527-1993
Protažení	3,5	2,0 2,2	%	ISO 527-1993
Tvarová stálost za tepla	67	- -	°C	ISO 75-1993
Pevnost v ohybu	140	155 215	MPa	ISO 178-1993
E-modul v ohybu	3600	7200 10000	MPa	ISO 178-1993
Rázová houževnatost	12	- -	mJ/mm ²	ISO 179-1982

Hodnoty uvedené v tabulce byly dosaženy na laminátu vystuženém standardní práškově pojenou rohoží, ruční laminací aby se dosáhlo hodnot, srovnatelných s ostatními typy polyesterových pryskyřic.

Bezpečnostní údaje

Vše je uvedeno v Bezpečnostním listě, se kterým je nutno se před prvním použitím výrobku seznámit.

Označení nebezpečí

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou označovány jako **X_n** – **Zdraví škodlivý**.

POZNÁMKA

Údaje v tomto informačním listu byly získány laboratorními zkouškami v technickém odboru Jotun Polymer A/S. Všechny grafy jsou na bázi průměrných hodnot s rozptylem přibližně +10%. Uvedené informace jsou podle našeho nejlepšího vědomí správné a mají sloužit jako vodítko pro uživatele, nezakládají však žádnou právní zodpovědnost.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST MULTIAXIÁLNÍ TKANINY SEARTEX



SAERTEX® GmbH & Co. KG
Brochterbecker Damm 52
D-48369 Saerbeck
phone: ++49/2574/902-0
fax: ++49/2574/902-209
e-mail: info@saertex.com

DATASHEET

STYLE NO.
S32EX010-00980-01270-283000

DESCRIPTION OF STYLE BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m ²]	TOLERANCE [+/--%]	MATERIAL	LINEAR DENSITY tex
-45°	476	5	E-Glass	900
90°	29	5	E-Glass	300
+45°	476	5	E-Glass	900
STITCHING:	6	5	PES 76 dtex	

BINDER: Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 1270

mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 988

g/m²

TOTAL TOLERANCE: 5,0

%

Threads of stabilization in 0° (E-Glass 34tex)