

Výužití 3D tisku při vyztužování kompozitních panelů

Bc. Michal Jurásek

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

nascannované zadání s. 1

nascannované zadání s. 2

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 2.5.2018

.....

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

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

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

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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá aditivní výrobou různých typů vyztužujících žeber. Konkrétně jejich aplikací u kompozitních panelů za účelem vyztužení při výrobě pomocí vakuové infuze. V teoretické části se popsáno rozdělení kompozitních materiálů, definice jednotlivých složek a přehled aditivních technologií pro výrobu žeber. Praktická část dokumentuje výrobu navržených vzorků žeber aditivní technologií, jejich laminaci pomocí vakuové infuze a testování mechanických vlastností pomocí zkoušky tříbodového ohybu.

Klíčová slova: Vakuová infuze, kompozitní materiál, 3D tisk, žebra, pryskyřice

ABSTRACT

The master thesis deals with additive production of different types of reinforcing ribs. Specifically, their application to composite panel as the reinforcement during their production using a vacuum infusion. The theoretical part describes the division of composite materials, the definition of individual components and the overview of additive technologies for the production of ribs. The practical part documents the production of designed reinforcing structures by additive technology, their lamination using of vacuum infusion and mechanical properties testing in three-point bending test.

Keywords: Vacuum infusion, composite material, 3D print, ribs, resin

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavu Fojtlovi Ph.D. za odborné rady, ochotu a pomoc, při psaní této práce. Také za jeho volný čas, věnovaný při konzultacích. Dále také Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi Ph.D. za pomoc při 3D tisku a veškerou odbornou diskuzi k danému tématu. Velký dík patří také rodině a přátelům.

Motto:

„ Za svůj dlouhý život jsem pochopil jedno - ve srovnání s objektivní realitou je naše věda dětinská a prostá, ale přece je tím nejlepším co vůbec máme. ”

Albert Einstein

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 3D TISK	12
2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE A ROZDĚLENÍ	14
2.1 POUŽÍVANÉ METODY 3D TISKU	14
2.2 METODY NA BÁZI KAPALNÝCH MATERIÁLŮ	15
2.2.1 Solid Ground Cutting – SGC	15
2.2.2 Stereolitografie – SLA	16
2.2.3 PolyJet – PJ	16
2.3 METODY NA BÁZI PEVNÝCH MATERIÁLŮ	17
2.3.1 Fused Deposition Modeling - FDM.....	17
2.3.2 Direct Metal Laser Sintering - DMLS	18
2.3.3 Selective Laser Sintering – SLS	19
2.3.4 Laminated Object Manufacturing – LOM	20
2.3.5 Multi Jet Modeling – MJM	21
2.3.6 3D Printing – 3DP	22
2.4 JEDNOTLIVÉ VÝROBNÍ METODY A JEJICH SROVNÁNÍ.....	23
2.5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	24
2.5.1 Využití AM ve strojírenství	24
2.5.2 Architektura.....	25
2.5.3 Letecký průmysl	26
3 ZÁKLADNÍ METRIÁLY PRO TECHNOLOGII FDM	28
3.1 ABS (AKRYLONITRIL BUTADIEN STYREN)	28
3.1.1 Variace materiálu ABS	28
3.2 PLA (Kyselina polyléčná - POLYLACTIC ACID)	29
3.3 PA (POLYAMID, NYLON)	29
3.4 PETG (POLYETHYLEN TEREFTALÁT - GLYKOL)	30
3.5 PC (POLYKARBONÁT).....	30
3.6 TPE (TERMOPLASTICKÝ ELASTOMER).....	30
3.7 PODPŮRNÉ MATERIÁLY PŘI TISKU	31
4 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	32
4.1 VÝZTUŽE	33
4.1.1 Vláknové výztuže	35
4.1.2 Částicové výztuže.....	37
5 SEDVIČOVÉ STRUKTURY	38
5.1 VAKUOVÁ INFUZE	38
5.1.1 Princip vakuové infuze	40
6 VYZTUŽOVÁNÍ POLYMERNÍCH STĚN ŽEBROVÁNÍM	42
6.1 OHYBOVÁ TUHOST A PEVNOST VYZTUŽENÝCH STĚN	42
7 APLIKAČNÍ POTENCIÁL 3D TISKU	44
II PRAKTICKÁ ČÁST	45
8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	46

9	3D TISKÁRNA STRATASYS DIMENSION SST 768.....	47
10	VÝROBA VZORKŮ ŽEBER POMOCÍ 3D TISKU	49
11	EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VAKUOVÉ INFUZE POD PRUŽNOU FOLIÍ.....	53
11.1	POMOCNÉ MATERIÁLY A ZAŘÍZENÍ.....	53
11.1.1	Forma.....	53
11.1.2	Separáční vosk M 700/C - WAX	53
11.1.3	Vakuov� vývěva	53
11.1.4	Rezervoár	54
11.1.5	Hadice pro dopravu pryskyřice	54
11.1.6	Těsnicí páska	55
11.1.7	Odtrhov� fólie	55
11.1.8	Odtrhov� tkanina	56
11.1.9	Rozvodn� s�t' - distribuční medium	56
11.1.10	Vakuovací folie	57
11.2	MATERIÁLY TVOŘIC� KOMPOZIT.....	57
11.2.1	Použit� pryskyřice	57
11.2.2	Skeln� tkanina AEROGLOSS 280 g/m ² - kepr.....	58
12	VÝROBA VZORKŮ VAKUOVOU INFUZÍ.....	59
12.1	POSTUP VYROBY VZORKU S VYŠKOU 5MM.....	59
12.2	VYHODNOCENÍ.....	62
12.3	POSTUP VYROBY VZORKU S VYŠKOU 2 MM	63
12.4	VYHODNOCENÍ.....	64
13	VÝROBA VZORKŮ RUČN� LAMINACÍ.....	66
13.1	POSTUP VYROBY PRVNÍHO NÁVRHU RUČN� LAMINACE	66
13.2	POSTUP VYROBY DRUHÉHO NÁVRHU RUČN� LAMINACE.....	67
13.3	VYHODNOCENÍ OBOU NÁVRHŮ RUČN� LAMINACE	67
13.4	VYROBA REFERENČNÍHO VZORKU	69
14	ŘEZAN� VZORKŮ	70
15	POPIS STATISTICKYCH VELIČIN.....	71
16	ZKOUŠKA MECHANICKYCH VLASTNOSTÍ	72
16.1	STANOVEN� OHYBOVYCH VLASTNOSTÍ	73
16.1.1	�nosnost vzorku č. 1	74
16.1.2	únosnost vzorku č. 2	75
16.1.3	únosnost vzorku č. 3	75
16.1.4	únosnost vzorku č. 4	76
16.1.5	únosnost vzorku č. 5	76
16.1.6	únosnost vzorku č. 6	77
17	VYSLLEDKY EXPERIMENTU	78
	ZÁVĚR	82
	SEZNAM POUŽIT� LITERATURY	84
	SEZNAM POUŽITYCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	90
	SEZNAM TABULEK	93
	SEZNAM PŘILOH	94

ÚVOD

Při postupném rozvoji technologií, nároků a požadavků doby, bylo nezbytné, aby se přicházelo s novými nápady a vylepšeními. Lze tak říci, že každá nová látka a materiál, který člověk dovedl využívat, představoval novou kvalitu v jeho činnosti a životě. Lidstvo tak prošlo dobou kamennou, dobou bronzovou, dobou železnou a směřuje na nový stupeň spojený s tím, že budou vytvořeny nové, syntetické materiály, které v přírodě nenajdeme. Tyto materiály jsou složeny z řady komponentů a mají široký úhel využití. Musí se vyznačovat nejen odolností a pevností, ale také některými důležitými fyzikálními vlastnostmi, dále je nutné též vyzdvihnout estetické vlastnosti povrchu materiálu a jeho náročností na energii při výrobě. Materiál by měl mít předem určené vlastnosti podle použití a výroba by měla co nejčastěji používat domácí suroviny. S tím souvisí, že tyto materiály budou postupem času vypracovány podle charakteru výroby a možnostech přírodních zdrojů v hospodářství. V poslední době je nutno zohlednit ekologické dopady na životní prostředí. Většinu odpadů z průmyslu lze zařadit mezi nebezpečné odpady. Můžou to být odpady, které ohrožují přírodní prostředí, nebo například takové, které vznikají ve výrobě. Například z nesprávně rozvržených dílů, zmetků, odřezků a jiných částí odpadů. Ty pak vznikají v takovém množství, že je nelze zanedbávat. Některé polymerní materiály lze regenerovat, nebo recyklovat, vznikají tak druhotné suroviny, které dále využít například na výrobu palet, částí plotů, nebo kanalizačních trubek.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 3D TISK

Termín 3D tisk pochází z anglického názvu Threedimensional = trojrozměrný, jde tedy o proces materializace 3D předloh do hmotných 3D objektů. Také zahrnuje celou řadu procesů a technologií, které umožňují celou řadu možností pro výrobu dílů a výrobků z různých typů materiálů. Aplikace 3D tisku se objevují stále častěji a tato technologie se čím dál více objevuje v průmyslovém a spotřebitelském odvětví. Metoda 3D tisku zahrnuje celou řadu nových technologií pro výrobu přesných dílů přímo z CAD modelu a to v poměrně krátkém čase, v řádu hodin a dní. U procesu není nutný velký zásah člověka, to znamená, že je vysoce automatizovaný. Tato technologie umožňuje zkrátit čas a náklady, které jsou potřebné na zhotovení nového návrhu. Dále také snižuje náklady a čas na výrobní proces [23].

Všechny 3D technologie mají společný způsob, kterým je výroba vykonávána. V procesu samostatného tisku je přidávána jednotlivě vrstva na vrstvu, tím je tato metoda rozdílná od tradičních metod výroby. Hlavní rozdíl 3D tisku je v samotném výrobním procesu, který je založen na principu přidávání, neboli vrstvení materiálu. Je to zásadní odlišnost od jakýchkoliv běžně používaných typů výroby.

Svět výroby se změnil, automatizované procesy, jako je odlévání, obrábění, tváření a lisování jsou složité procesy, které vyžadují stroje, počítače a případně i robotizaci. Tradiční technologie jako je například obrábění, je založené na odebrání materiálu (třísky) z většího bloku (polotovaru). Dosažení samotného konečného produktu, anebo vytvoření nástroje, může mít za následek až 90% plýtvání materiálem z původního polotovaru. U 3D tisku se technologie se dá přirovnat k automatizovanému stavění stavby lego bloků. Stále se navrhují a vyvíjejí nové technologie 3D tisku a objevují se nové zpracovatelné materiály, které je možné touto technologií tisknout.



Obr. 1 První 3D tiskárna z roku 1984 [23]

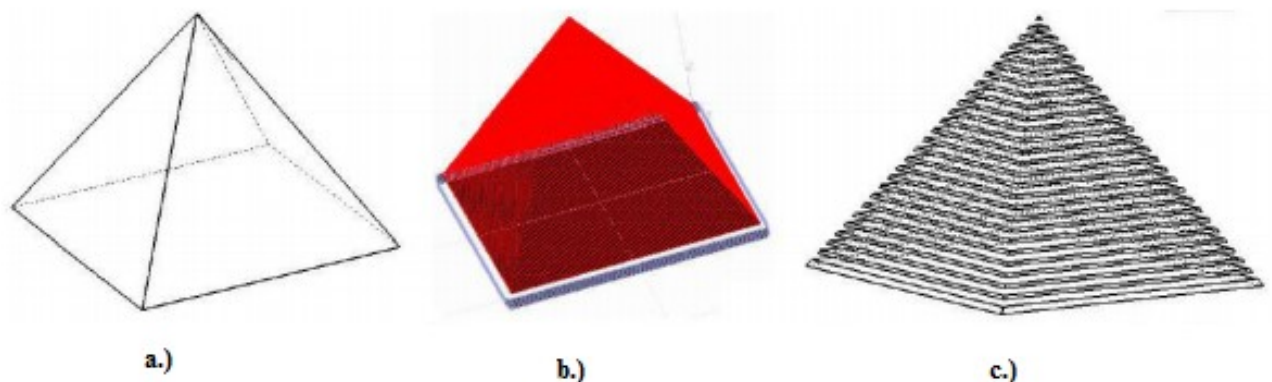
Počátek 3D tisku se datuje na počátku 80-tých let. První patent byl vydán na Stereolithographyový přístroj – SLA. Tento patent patří muži jménem Charles Hull, který vynalezl SLA přístroj. V té době pracovalo na vývoji strojů více lidí. Ve stejném čase Carl Deard, který pracoval na univerzitě v Texasu, podal patent v USA pro Selective Laser Sintering (SLS).

V devadesátých letech vzrostl počet konkurenčních společností na trhu, díky čemuž vznikla řada nových technologií, čímž se 3D tisk začal zaměřovat hlavně na průmyslové aplikace. Postupně se technologie dostávají k široké veřejnosti a vznikají nové technologie jako je Rapid Prototyping, což znamená "Rychlá výroba". Termín 3D tisk tedy pochází z 90. let. Při rozšíření výrobních aplikací se vyvinula nová terminologie a přijaly se nové termíny procesů, jako jsou RP a 3D tiskárny. Additive Manufacturing – (AM) je z anglického termínu Aditivní výroba.

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE A ROZDĚLENÍ

Aditivní technologie je název procesu, při kterém vznikne postupným nanesením tenkých vrstev materiálu konečný výrobek. Software si vypočítá z tvaru vyrobené součásti jednotlivé vrstvy a při zahájení procesu výroby si vytvoří schéma tvorby součásti [1].

Tuto technologii využívá Rapid Prototyping, který byl navržen a vznikl pro rychlou vyrobiteľnost prototypů různých součástí. V současnosti se tato technologie využívá k vytvoření modelů, ze kterých se lépe určuje celkový vzhled a tvar finálního dílu. Tím lze doladit a odstranit nedostatky výrobku již před zahájením výroby. Tím se ušetří náklady na výrobu a identifikují možné budoucí problémy s výrobkem. Postupně se z těchto technologií vyvinul 3D tisk, jeho základem je 3D model, který může být vymodelován v programu, nebo se hotová součást naskenuje (metoda 3D skenování objektů) [1, 2, 3].



Obr. 2 a.)Tvar hotové součásti, b.)Tvar softwarových vrstev, c.)Schéma tvorby[1]

Pro aditivní technologii lze použít mnoho druhů materiálů. Například fotopolymery, nylon, vosk, papír, plast, keramiku a různé slitiny kovů. Při použití různých druhů materiálů je nutné zvolit specifické zařízení, na kterém bude nutné nastavit procesní parametry k tisku, vzhledem k použitému materiálu [3].

2.1 Používané metody 3D tisku

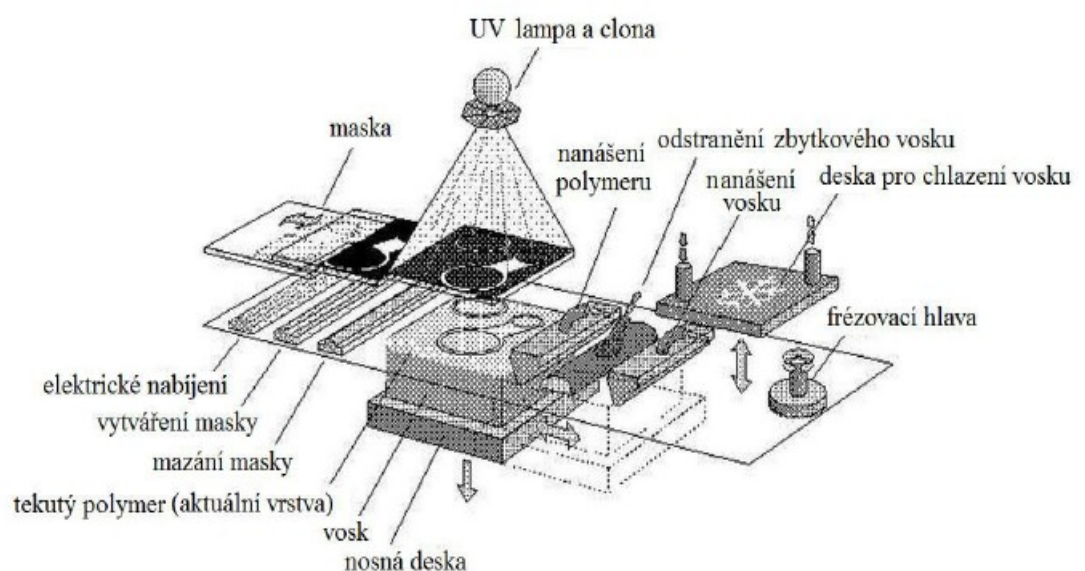
Existují různé typy 3D tisku, které se rozdělují podle způsobu použití, velikosti pracovního prostoru, přesností a způsobem nanášení materiálu. Metodu je třeba volit dle požadovaných parametrů, tedy vzhledem k vytisknutému výrobku. Každý výrobek je limitován použitou technologií a použitým materiálem [3].

Metody s použitím tuhého materiálu použijí k tvorbě modelu pevný materiál, například papír, nebo plast. Ke spojení se používá rozežrání materiálu, nebo lepidel. Dále jsou metody s použitím fotopolymerů. Využívají nádobu s pryskyřicí, která je v kapalném stavu, kdy pod hladinou pryskyřice dochází k vytvrzení vrstvy. Po dokončení je materiál posunut o určitou vzdálenost a tím se vytvrdí další vrstva. Jakmile je dokončen model, zbytková pryskyřice se odvede a přechází se k další operaci. Při metodě na bázi práškových materiálů se používají například kovové prášky. Metoda spočívá v natavení prášku a následnému ztuhnutí a spojení [4].

2.2 Metody na bázi kapalných materiálů

2.2.1 Solid Ground Cutting – SGC

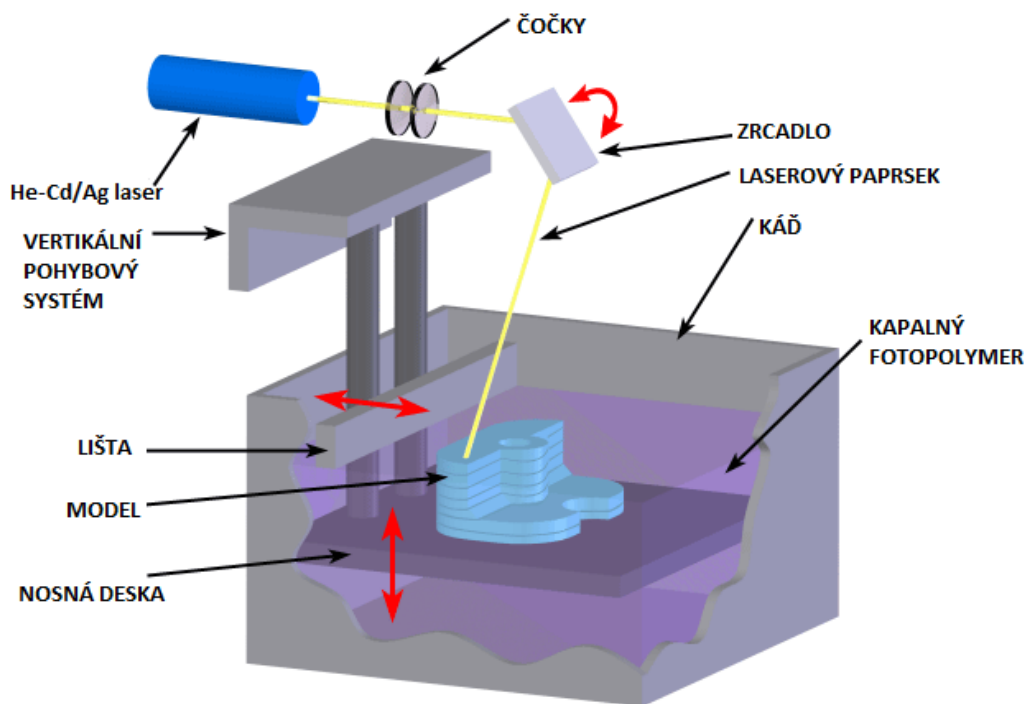
SGC metody se využívá nejčastěji při ověření designu, smontovatelnosti a funkce. Vrstva se vytváří pomocí masky (nejčastěji skleněná deska) z fotocitlivého polymeru. Takto vytvořená vrstva má již konečný tvar a po dokončení je ihned vytvrzena ultrafialovým světlem. Polymer, který neztuhl, se odsaje a na jeho místo je nanesen vosk. Takto vzniklá vrstva vosku je frézováním upravena na požadovanou tloušťku a nanese se další vrstva polymeru. Po dokončení celého procesu tisku se vosk chemicky odstraní kyselinou citrónovou a zůstane jen hotový polymerní model [3, 11].



Obr. 3 Princip SGC technologie [11]

2.2.2 Stereolitografie – SLA

Model se vytvoří při postupném vytvrzení fotopolymery. Jde o pryskyřici citlivou na světlo a vytvrzení proběhne pomocí laseru. Tloušťky vrstev se pohybují od 0,05 až 0,15mm. O stejnou vzdálenost se poté posune i nosná deska a znovu proběhne tisk další vrstvy budoucího modelu [1].



Obr. 4 Princip SLA technologie [1]

Technologie stereolitografie je velmi přesná metoda, kterou je možné vytvořit výrobky s otvory s průměrem do 1 milimetru, nebo i další miniaturní prvky. Díky různým kombinacím použitelných materiálů využití například při výrobě forem pro lití a vstřikování. SLA technologií lze vytvářet i velké modely [1, 4, 10].

2.2.3 PolyJet – PJ

Metodou PolyJet se vyrábí hladké, přesné součástky, nástroje a prototypy. Způsob tisku spočívá v rozlišení mikroskopické vrstvy s přesností na 0,016 mm. Tím pádem můžou být vyrobeny velmi tenkostěnné součásti výrobku a složité tvary, v široké škále použitelných typů materiálu [20].

PolyJet technologie má podobnou funkci jako inkoustový tisk, ovšem oproti nanášení inkoustu je nanášen kapalný fotopolymer na stavební desku zařízení. Příprava tisku je umožněna díky softwaru, který spočítá kde a jak umístit nosný materiál a fotopolymer a to

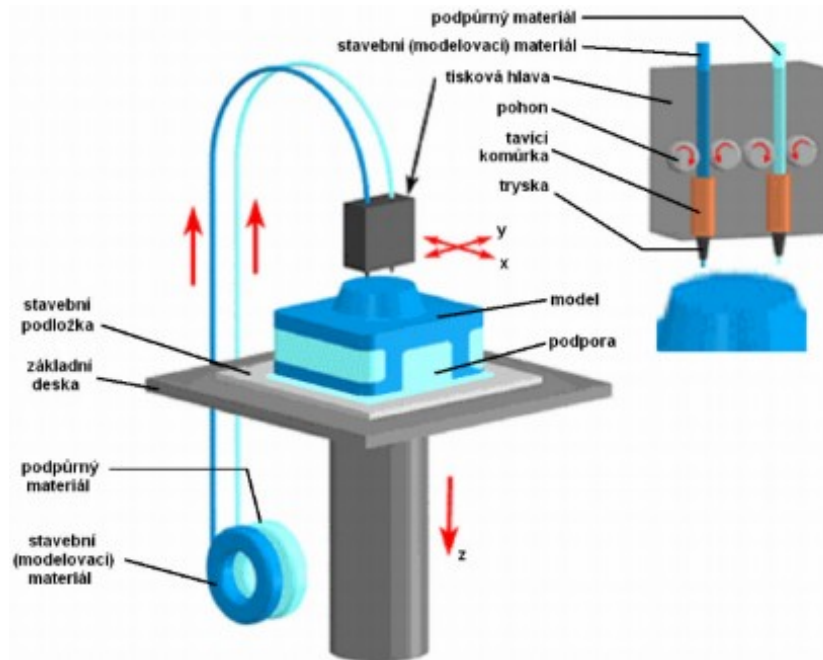
díky 3D CAD souborům. Tisk probíhá pomocí trysek, které nastříknou drobné kapičky fotopolymeru. Ty jsou co nejdříve vytvrzeny UV lampou. Vrstvy jsou postupně vrstveny na základní desku stroje. Tak vznikne jeden 3D model, nebo více modelů na stavební desce. Složité tvary a převisy jsou tisknuty pomocí podpor, které jsou po dokončení tisku odstraněny. Podpory se dají odstranit pod tekoucí vodou, nebo podle materiálu v roztoku či lázni [20].

2.3 Metody na bázi pevných materiálů

2.3.1 Fused Deposition Modeling - FDM

Materiál navinutý na cívce je ve tvaru struny, struna se odvíjí a pomocí kladek je přiváděna do tavné hlavy (trysky). Uvnitř tavné hlavy je materiál roztaven nad teplotu tání a to přesně o 1° vyšší než je bod tání materiálu. Takto roztavený materiál je pomocí trysek nanášen v podobě tenkých vláken na vytvářený model. Při dotyku nanášeného vlákna a povrchu naneseného materiálu se vlákna vzájemně spojí a vytvoří vrstvu, která rychle ztuhne z důvodu přenosu tepla a snížení teploty pod teplotu tání materiálu. Plocha, na které je tisknutý vzorek se po nanesení vrstvy materiálu sníží na požadovanou hodnotu a to o tloušťku budoucí tisknuté vrstvy. Tak je zajišťována konstantní, funkční vzdálenost mezi tavnou hlavou a tisknutou plochou [5].

Podpora materiálu se využívá, pokud by se při další tisknuté vrstvě nacházelo ve vzduchu a díky tomu by nebylo možné tvar tisknout. Podpory se po dokončení tisku odstraňují. Při použití pouze jednoho druhu materiálu, se podpory musí mechanicky vylamovat z modelu. Pokud jsou použity dva materiály při tisku, tak se podpůrný materiál rozpouští ve speciální lázni pomocí chemického odstranění a zůstane pouze stavební materiál modelu [4,5,6].



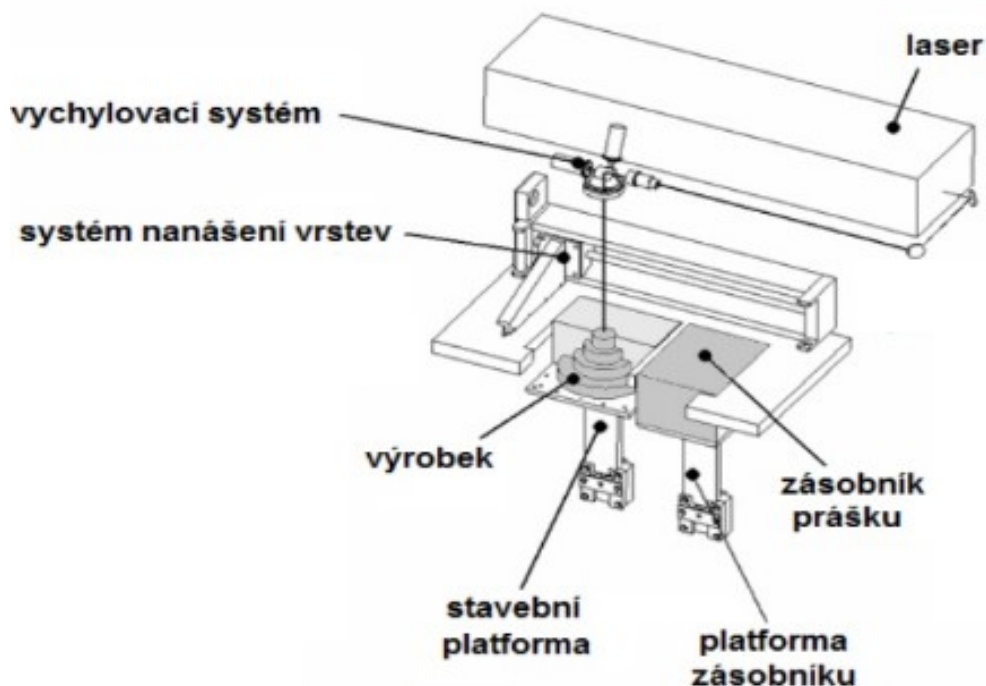
Obr. 5 Princip FMD technologie [7]

Technologii FMD využívá většina tak zvaných 3D tiskáren, přístrojů, které pracují na FMD principu jsou používány v běžném kancelářském prostředí. Používají se k prototypování součástek, kde se hodnotí hlavně design a funkčnost. Používané materiály jsou například vosk, PC, ABS a jiné netoxické materiály [4].

2.3.2 Direct Metal Laser Sintering - DMLS

Technologie DMLS využívá technologie postupného spékání jemných vrstev kovového prášku o minimální velikosti 20 μm pomocí laserového paprsku. Je důležité udržet dílec v nehybné poloze během procesu výroby. Kovový prášek se taví pouze v konturách řezu. Při tisku se využívá podpurné struktury, která se ukotvuje na základní ocelové desce. Podpurný systém je vytvářen během celé výroby dílce. Po dokončení tisku, je důležité odstranit podpurnou strukturu, poté lze dílec leštit, brousit, tryskat nebo dále obrábět [8,9].

Kovový prášek, který senespotřeboval může být opakovaně využit, bývá pouze opakovaně proséván s účelem odstranění nečistot. Znovu využití prášku je až 98 %. Touto technologií lze zpracovávat následující materiály: Korozivzdorná ocel, titan, kobalt Chrom a martenzická ocel. Výhody technologie DMLS rostou s tvarovou složitostí výrobku. Čím je výsledný výrobek složitější, tím je DMLS ekonomicky více efektivní [8,9].

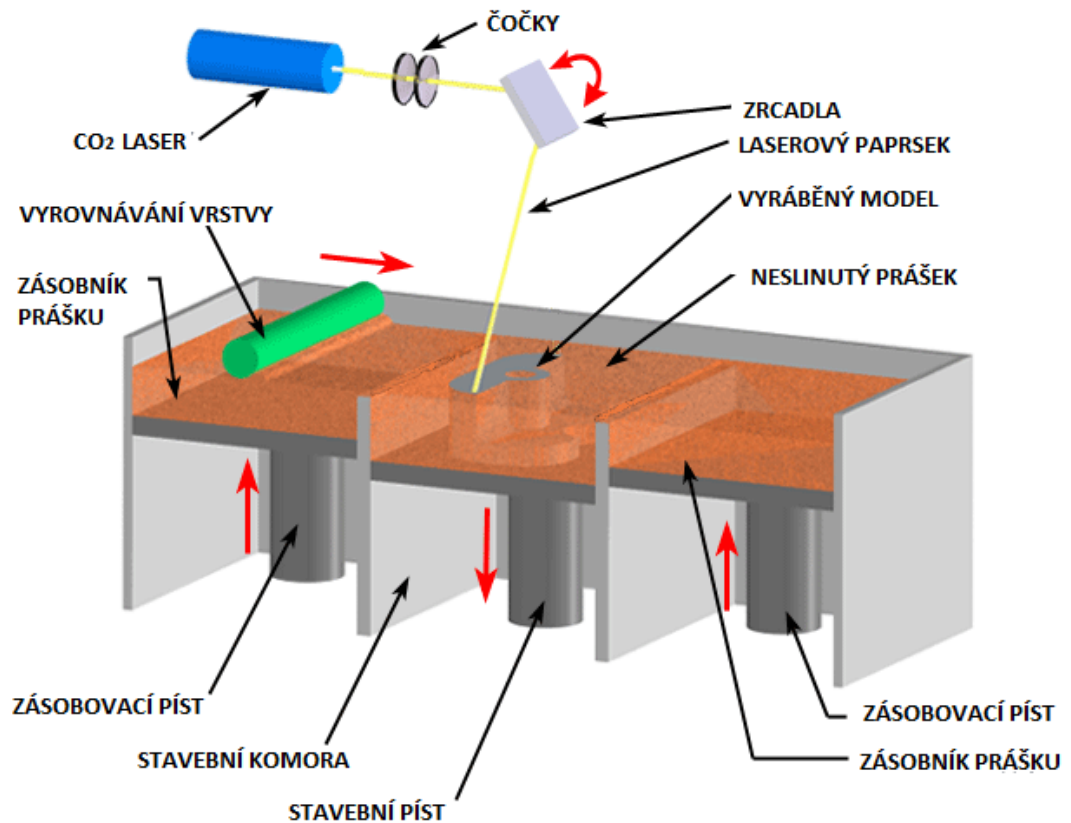


Obr. 6 Princip DMLS technologie [9]

2.3.3 Selective Laser Sintering – SLS

Technologie SLS spočívá ve spékání materiálu ve formě prášku v interní atmosféře (argon, dusík) laserem. Po dokončení jedné vrstvy je nosná deska posunuta o tloušťku vrstvy a je nanesen další prášek. Materiál, který nebyl při procesu spečen, slouží jako podpora pro další nanášení vrstev [2, 11].

Použití druhu prášku je různorodé, může to být jakýkoliv materiál, který se při vystavení určité teplotě roztaví nebo změkne. Jsou to například termoplastické materiály, jako polyamid, polykarbonát, polystyrén a polyamid plněný skelnými vlákny. Dále bývají využívány nízko tavitelné slitiny niklových bronzů. Je nutné brát na zřetel nastavení procesních podmínek před zpracováním. Každý materiál vyžaduje jiné podmínky pro vytvrzení. Podle použití materiálu dělíme metodu na laser Sintering – Metal, Laser Sintering – Plastic, Laser Sintering – Foundry Sand, Laser Sintering – Ceramic [2, 10, 11].



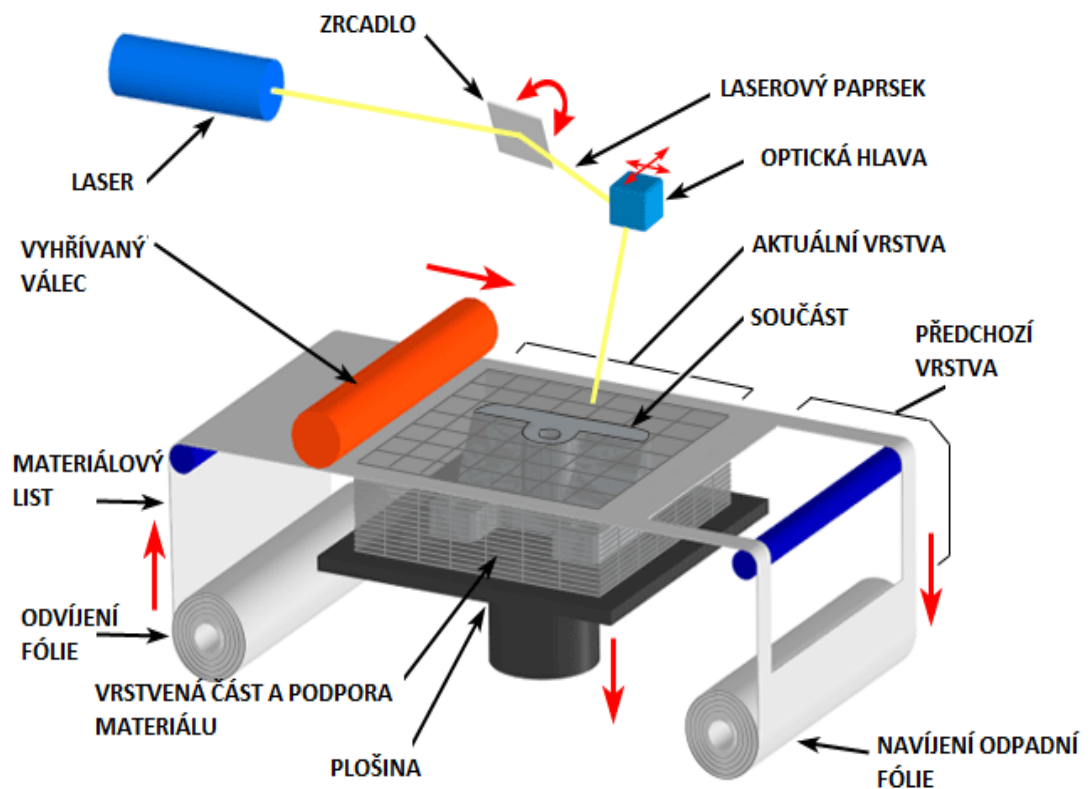
Obr. 7 Princip SLS technologie [2]

2.3.4 Laminated Object Manufacturing – LOM

Metoda využívá pro tvorbu jednotlivých vrstev fólii, která je jednostranně opatřena přílnavým polyethylenovým nátěrem. Fólie jsou keramické, papírové nebo plastové [4].

Princip spočívá v rozvinutí fólie na ploše větší, než je pracovní prostor. Poté je přitlačena vyhřívaným válcem přes pracovní plochu a tím je přilepena nová vrstva. Laserem je vyříznutý určitý požadovaný tvar a přebytečný materiál je rozříznut na malé čtverce. Poté dojde k posunu pracovní desky o tloušťku další fólie směrem od laseru a celý proces je opakován až do dokončení výrobku [5,11].

Díky rozřezání přebytečné fólie na malé čtverce je po dokončení procesu jednodušší odstranění přebytečného materiálu. Po dokončení má součást vlastnosti podobné dřevu. Aby bylo dosaženo hladkého povrchu, je nutné vyrobenou součást ručně opracovat a dokončit [4, 5, 11].

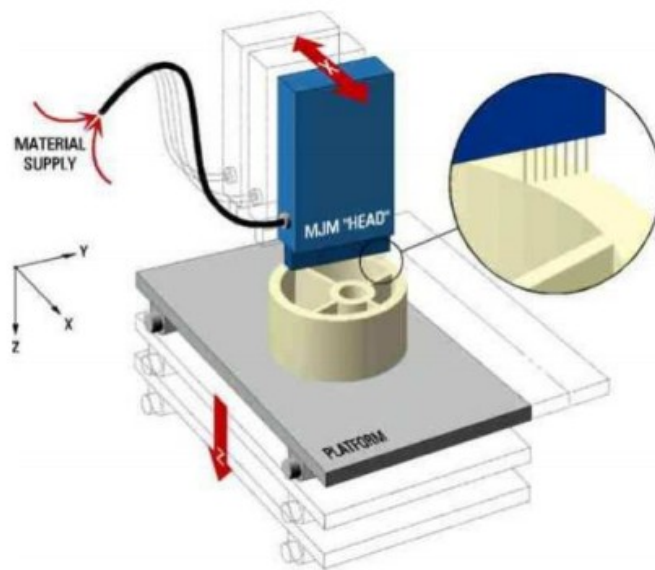


Obr. 8 Princip LOM technologie [5]

Pomocí technologie LOM lze vytvářet velké modely. Nevýhodou je velké množství nezpracovaného materiálu a tudíž odpadu [11]

2.3.5 Multi Jet Modeling – MJM

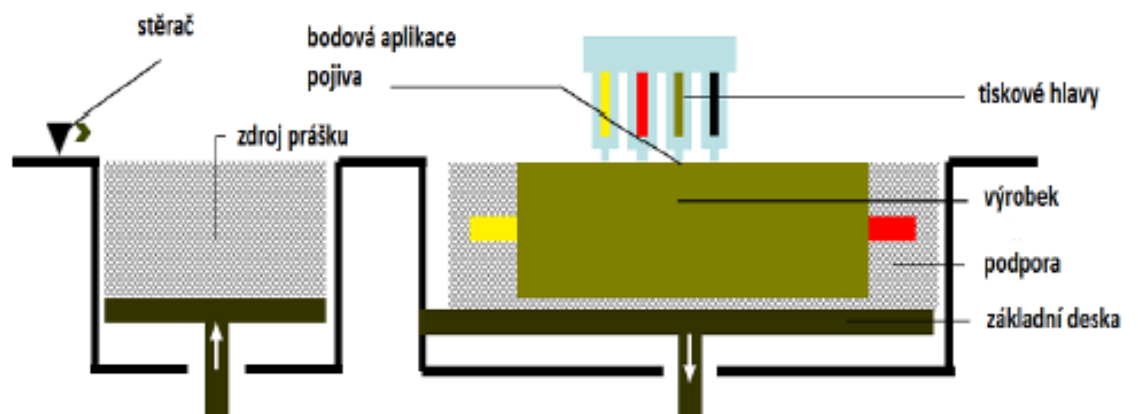
Technologie MJM je nanesení po sobě jdoucích termopolymerních vrstev. Princip spočívá v použití speciální tiskové hlavy, která má 352 trysek, které jsou uspořádány těsně vedle sebe. Množství materiálu, který se má nanést do vrstvy, je řízen jednotlivě pro každou trysku zvlášť pomocí softwaru. Model je stavěn na nosnou základní desku. Tisková hlava tvoří model tak, že se pohybuje nad základní deskou v ose X a Y. Po dokončení jedné vrstvy se základní nosná deska sníží o předdefinovanou tloušťku jednotlivé vrstvy směrem od tiskové hlavy v ose Z. Po nanesení termoplastického materiálu dojde k rychlému ztuhnutí s předchozí vrstvou. Dále se začne nanášet další vrstva na model. Tak se celý proces opakuje až po dokončení modelu. Díky velkému počtu trysek je zaručena velká rychlost nastříknutí vrstvy a rovnoměrné nanášení termoplastického materiálu do pracovního prostoru zařízení [21].



Obr. 9 Schéma metody MJM [21]

2.3.6 3D Printing – 3DP

Funkce metody 3DP je obdobná slinování práškových materiálů SLS. Jedná se o postup, ve kterém jde o vrstvení inkoustového tisku jemnými fermežovanými, kovovými, kompozitními, nebo keramickými prášky, které jsou spojeny speciálními plnivými. Jakmile je dokončen výrobní proces, zbytkový prášek se odsaje speciálním zařízením a je možné ho využívat opakovaně. Zařízení vybavené metodou 3DP patří v průmyslu mezi nejrychlejší zařízení, které dosahují velmi kvalitní povrch výsledného výrobku – rozlišení až 600 x 540 dpi. K vylepšení mechanických vlastností se na povrchu modelu nanáší speciální infiltrační látky [21, 22].



Obr. 10 Schéma metody 3DP [22]

2.4 Jednotlivé výrobní metody a jejich srovnání

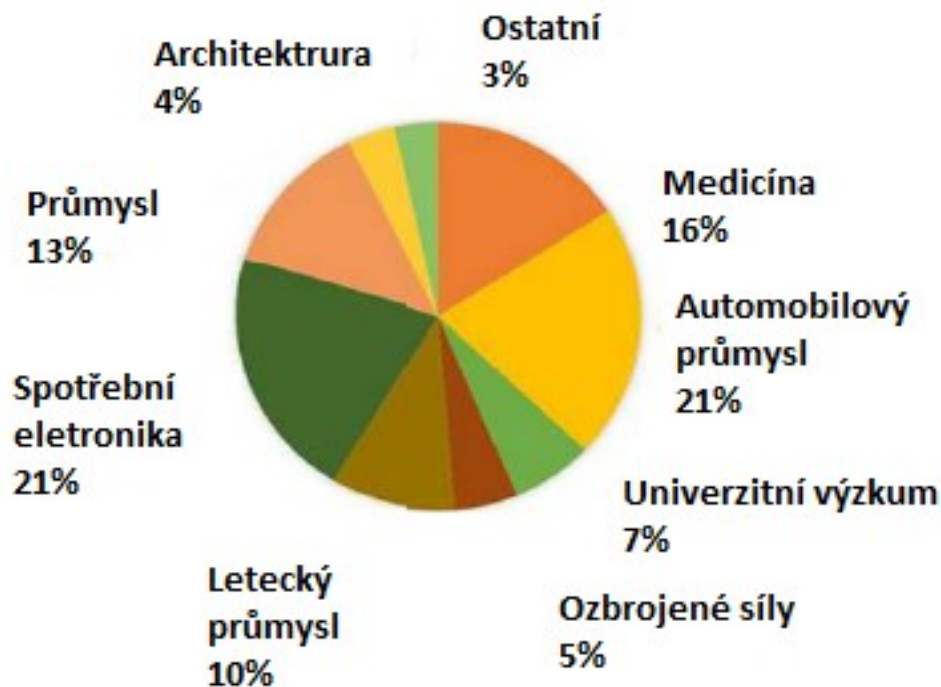
Uvedené výrobní technologie, které byly popsány, mají někdy jen určitou oblast využití a specifík. Dále se dají všechny technologie rozdělit dle jejich výhod a nevýhod [5].

Tab. 1 Srovnání jednotlivých výrobních metod z hlediska výhod a nevýhod [5,20,21]

Výrobní metoda na bázi kapalných materiálů		
Zkratka technologie	Výhody	Nevýhody
SGC	poškozené vrstvy se dají odfrézovat	úzká možnost výběru materiálu
PJ	možnost použití široké školy materiálů, velmi dobrá přesnost	materiálové vlastnosti jsou horší
SLA	mají velkou přesnost na detailech modelů, je zde možnost výroby tenkostěnných výrobků	dlouhý čas výrobního procesu, toxické vlastnosti fotopolymeru, modely mají slabou tepelnou odolnost, dokončovací vytvrzování modelu
Výrobní metoda na bázi tuhých materiálů		
Zkratka technologie	Výhody	Nevýhody
LOM	snadné obrobení modelu	menší přesnost modelu, možnost vzniku nežádoucích výparů
MJM	možnost tvorby velmi tenkých stěn výrobku	dokončovací operace, výrobek nemá stejné mechanické vlastnosti v různých směrech
DMLS	při tvorbě je možnost využití široké škály materiálů, možnost využití nespotřebovaného prášku (recyklace), výkonný laser	nutnost dokončovacích operací, možnost rozptýlení kovových prášků do ovzduší a do stroje, zařízení je náročné na prostor a energetiku
3DP	velmi vysoká kvalita rozlišení povrchů výsledných výrobků	Drsnost povrchů v porovnání k velikosti částic prášků
SLS	možnost volby různých materiálů, nezpracovaný prášek slouží jako stavěcí podpora, výkonný laser	energeticky náročné zařízení, prostorově náročné zařízení, možnost rozptýlení kovového prášku do ovzduší, dokončovací operace
FDM	žádné škodlivé emise, možnost volby různých materiálů	mechanické vlastnosti nejsou stejné v různých směrech namáhání

2.5 Možnosti využití aditivních technologií

V dnešní době je ve velkém rozmachu využití aditivních technologií, tudíž se technologie testuje a začíná využívat v celé řadě oborů, jako jsou strojírenství, potravinářský průmysl, vojenství, architektura a řadě dalších [11].



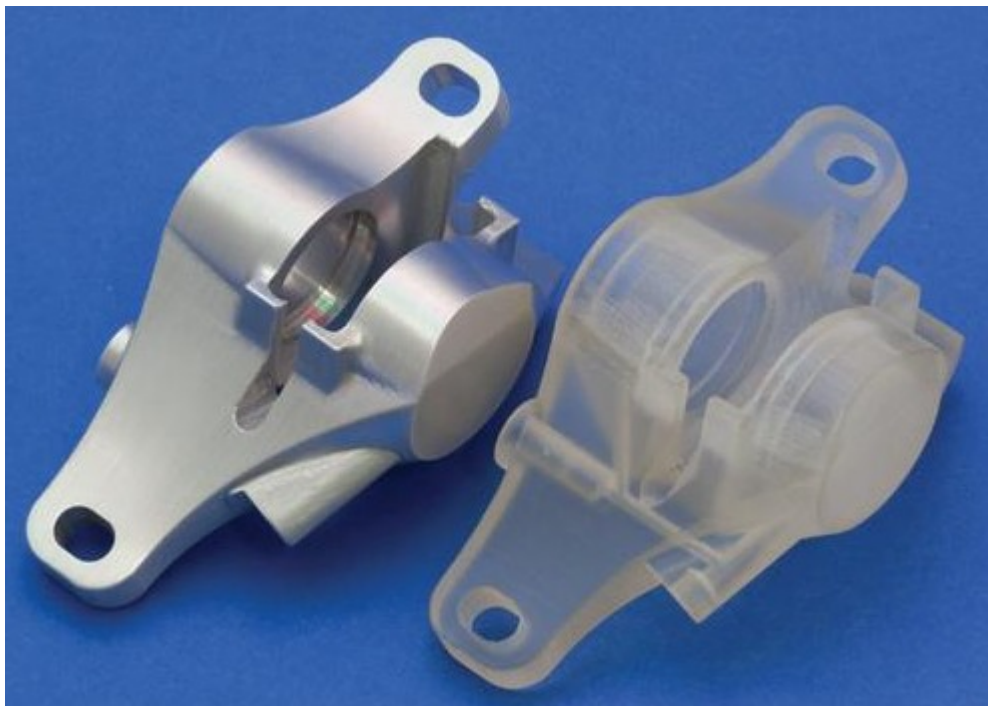
Obr. 11 Průmyslové rozdělení AM z roku 2013 [13]

Hlavní nynější využití 3D tisku je ve výrobě. Díky zdokonalování technologie a poklesu cen se čím dál více 3D tisky začínají objevovat nejen ve výrobě, ale otevírá se jim nová etapa jejich využití a dalšího vývoje. Představuje silný a zajímavý nástroj nejen na optimalizaci produkce a vývoje profesionálních řešení. V závislosti od využití technologie je možné uspokojit velmi různorodé potřeby a požadavky v jednotlivých odvětvích a tím uspokojit konkrétní požadavky zákazníků. Rychle se stává ekonomicky výhodnou alternativou k tradičnímu způsobu výroby a čím dál větším počtu oblastí a aplikací. Tato technologie může způsobit revoluční změny v různých odvětvích od spotřebního výrobku, přes kovové obrábění, medicínu až po letecký průmysl [12].

2.5.1 Využití AM ve strojírenství

AM technologie se v současné době využívá zejména pro účely rapid prototyping - RP. Vytváří se prototypy, díky kterým je možné vyhledat a odstranit chyby ve výrobních

dokumentech, ověřit vyrobiteľnost součásti, dají se nalézt chyby v koncepci, ověří se i vhodnost modelu pro sériovou výrobu a v neposlední řadě lze posoudit vzhled součásti. RP technologie jsou především využívány ve velkých firmách, které vyrábí například pro automobilový průmysl. Využívá se u vývoje nových součástí. Za poměrně krátkou dobu (v řádech několika hodin), lze z CAD modelu vytvořit reálný vyrobený díl. Nevýhodou je však vysoká cena prototypů [11].



Obr. 12 Vlevo příklad hotového dílu, vpravo výsledek rapid prototypingu [24]

2.5.2 Architektura

V architektuře se využívá aditivní technologie pro celý proces. Od modelů až po technické drobnosti a detaily v celém procesu stavby. Využívá se výborné vizualizace pomocí samostatných dílů. Vytváří se celé stavby, části staveb nebo i samotný výrobek zhotovený aditivní technologií může být konečným dílem celého procesu. Existují tiskárny, které vyrábí plastové drobnosti, nebo i takové, které dokážou zpracovávat modely velké například šest metrů. Velkoformátové tiskárny využívají pro tisk speciální anorganické pojivo a písek. Spojením dvou materiálů vznikne materiál, který je obdobný jako mramor a tím lze vytvořit sochy, bazény, domy a spoustu jiných druhů věcí. Tradiční domy se dají stavět za pomoci tisku, kde jako materiál k tisku je směs materiálů, které jsou podobné betonu. Materiál je nanášen na předchozí vrstvu a tím se vystavují stěny budov. Do 3D

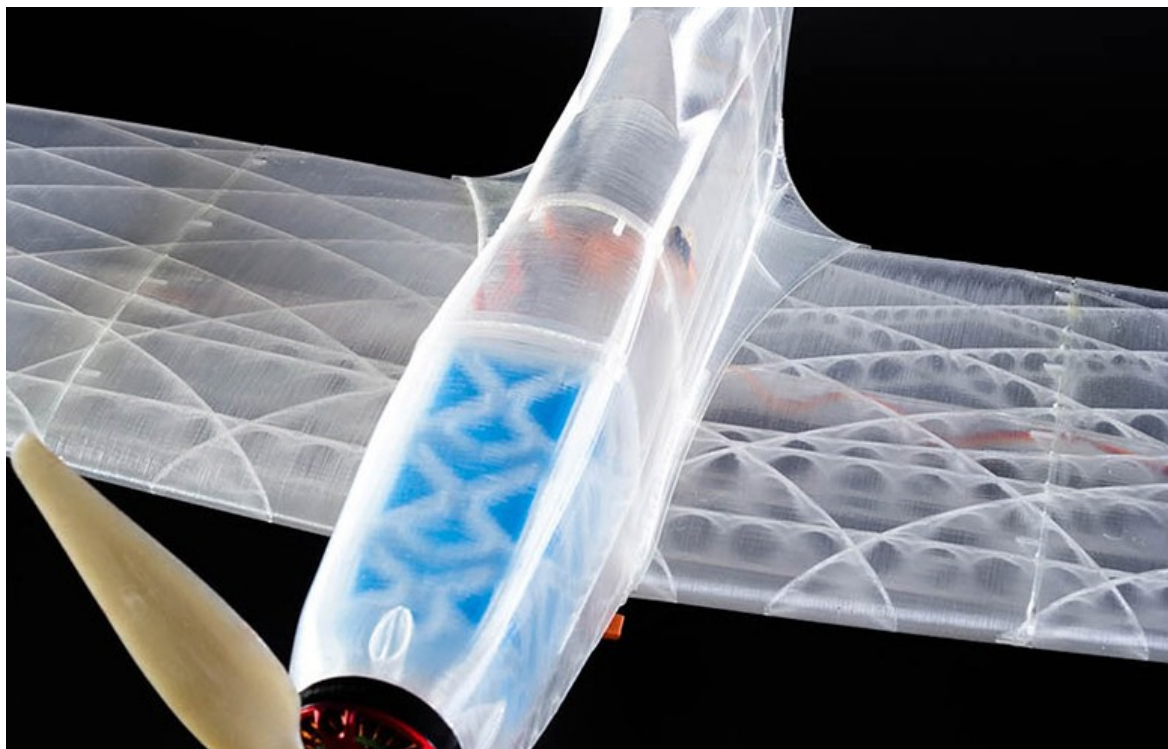
tisku budov se vkládají nemalé investice na vývoj a v budoucnu by mohlo být velké procento domů stavěno právě 3D technologií [25].



Obr. 13 Příklad využití 3D tisku v architektuře na modelu [25]

2.5.3 Letecký průmysl

Tisk modelů letadel je v dnešní době běžná záležitost. Společnost Airbus pracuje na konceptu nové výroby součástí svých dopravních letadel. Výrobapomocí 3D tisku bude zhotovovat některé díly. Předběžný odhad dokončení výzkumu je kolem roku 2050. Airbus chce pomocí aditivních technologií dosáhnout levnější výroby a to až o 65% snížit hmotnost součástí v porovnání s tradičními technologiemi. Firma se také specializuje na vývoj tisknutelného materiálu pro aditivní technologie a jeho testování. V současnosti se testují biopolymery a jiné materiály, které jsou zpevněny uhlíkovými nanovláknami [26].



Obr. 14 Ukázka funkčního vytištěného 3D modelu letadla [27]

3 ZÁKLADNÍ METRIÁLY PRO TECHNOLOGII FDM

Materiály pro tisk metodou FDM je zpravidla termoplastický polymer, který je v některých případech kombinován s částicemi jiného materiálu. Nejrozšířenějšími materiály jsou ABS (akrylonitril butadien styren) a PLA (kyselina polymléčná - polyactic acid). Nabídka vhodných materiálů je velmi široká, následující výčet uvádí jen ty nejpoužívanější. Materiál je používán ve formě tenké struny (drátu) navinutém na cívce. Nejčastěji používané průměry jsou 1,75 mm a 3,00 mm. Méně často je používán materiál ve formě pelet nebo již vytvořených ozubených tyčinek, které se za sebe automaticky zapojují v podavači. U materiálu používaného při metodě FDM ve formě struny se nejčastěji používá pojmenování filament, drát nebo vlákno [41].

Na trhu je mnoho výrobců a dodavatelů těchto připravených materiálů ke zpracování metodou FDM jako je například prodejce Material pro 3D. Při prodeji jsou u materiálu stanoveny důležité parametry, které je nutno při koupi zohlednit. Jdou to například hmotnost balení, barva, šířka struny, případně délka struny, vhodná teplota tisku zvoleného materiálu a vhodná teplota podložky při tisku, maximální rychlost tisku, rozměry špulky. Ke každému materiálu je uveden materiálový lis, kde jsou uvedeny mechanické vlastnosti, jako je teplota měknutí, napětí v tahu a napětí v ohybu materiálu.

3.1 ABS (akrylonitril butadien styren)

Je odolný amorfní termoplastický kopolymer, který vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý, málo nasákavý, zdravotně nezávadný. Je odolný vůči kyselinám, louhům, uhlovodíkům, olejům, tukům. Zpracovávat ho lze až do teploty 280°C, poté dochází k chemickému rozkladu. Nevýhodou je vysoká hodnota smrštění, která se pohybuje od 0,3 do 0,7 %. Materiál se dá i lehce mechanicky opracovávat. Typická teplota na trysce tiskového stroje se pohybuje od 210 °C do 260°C. Pro správné přichycení první vrstvy při tisku bývá často používána vyhřívaná stavební podložka a její teplota se pohybuje od 90°C do 110°C. Materiál ABS se dodává v mnoha variantách a následující přehled udává jen některé, ale naznačuje možnosti použití [42, 43].

3.1.1 Variace materiálu ABS

Materiál ABS Plus, jehož pevnost v tahu až o 40 % vyšší než standardní ABS. Materiál ABSipro se používá při tisku průhledných objektů. Uplatňuje se obzvláště v automobilovém a leteckém průmyslu a při výrobě lékařských přístrojů. Materiál ABS M30 jehož

pevnost v tahu o 25 – 70 % vyšší než standardní ABS, která umožňuje tisk plně funkčních dílů. V případě výroby prototypů dílů jsou testy těchto výtisků mnohem více realistické v porovnání s vlastnostmi sériově vyráběných dílů za použití technologie vstřikování. Materiál ABS-ESD7, který je disipativními vlastnostmi (je schopen nahromadit náboj pomalu rozptylovat po celém povrchu materiálu), který je určen pro aplikace, kde by mohl statický náboj poškodit další součásti či vést k explozi [42, 44].

3.2 PLA (kyselina polyléčná - polyactic acid)

Je semikrystalický termoplastický polymer, vyráběn z obnovitelných zdrojů jako například kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. Jeho výhodou je schopnost se pomocí účinků povětrnosti a mikrobiálních procesů rozštěpit na oligomery a následně až na samotné monomery. Je tedy zcela ekologický. Další výhodou je ve velmi malé hodnotě smrštění z důvodu minimální rozpínivosti při ohřevu. Tato vlastnost umožňuje tisk rozměrově větších objektů bez následných deformací vzniklých chladnutím a rovněž rozměrová přesnost je vyšší. Další výhodou, jež z této vlastnosti plyne, je možnost absence vyhřívané podložky. V praxi se ovšem podložka vyhřívá na teplotu do 60 °C a to především u objektů, které nemají příliš rozměrnou základnu. Teplota na trysce se pohybuje v rozmezí od 180 °C do 220°C. Teplota skelného přechodu T_g tohoto materiálu se pohybuje od 60 °C do 65 °C což má za následek, že objekty nejsou příliš teplotně odolné a jejich využití je především vhodné pro výrobu modelů než funkčních dílů. Materiál rovněž vykazuje vyšší hodnotu koeficientu tření v roztaveném stavu a vyžaduje tedy pro přísun materiálu motor s dostatečným krouticím momentem. [45, 46, 47].

3.3 PA (polyamid, nylon)

Je materiál vhodný pro 3D tisk součástí pro pokročilé aplikace. Lze vytvářet pokročilé prototypy a vlastní nástroje, které se vyznačují značnou houževnatostí a vysokou odolností při cyklickém namáhání. Další výhodou je chemická odolnost. Materiál vyžaduje vyšší teplotu na trysce jako v případě polykarbonátu, teplota vyhřívané podložky se pohybuje od 100 °C do 110 °C. Nevýhodou tohoto materiálu je sklon k nedostatečnému spojení vrstev objektu a může docházet k rozpadu výtisku na jednotlivé vrstvy [42, 50].

3.4 PETG (polyethylen tereftalát - glykol)

Je to dokonale transparentní amorfní kopolyester, který vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý, odolný proti nízkým i vysokým teplotám, minimálně nasákový a zdravotně nezávadný. Je odolný vůči zředěným roztokům kyselin a zásad. Teplota na trysce se pohybuje od 210 °C do 240 °C a teplota skelného přechodu T_g je přibližně 80 °C. Tyto vlastnosti řadí materiál PETG svými tiskovými vlastnostmi mezi ABS a PLA. Teplota vyhřívané podložky je doporučována kolem 60 °C, ale není nutná. Bývá uváděná silná přilnavost k podložce a obtížné snímání hotového objektu [51, 52].

3.5 PC (polykarbonát)

Je materiál, jehož výhodou je vysoká pevnost, nárazu odolnost a tepelná odolnost. Má tendenci ke kroucení při chladnutí než v případě ABS a vyšší teplotě tání, která vyžaduje teplotu na trysce přibližně 270 °C, při vyšších rychlostech tisku až 300 °C. Hodnota teploty skelného přechodu T_g je zhruba 150 °C. Teplota vyhřívané podložky se pohybuje od 120 °C do 130 °C. Jedná se o materiál velmi hygroskopický, který je tedy zapotřebí skladovat v suchém prostředí (ideálně ve vzduchotěsném obalu). Vlhkost způsobuje tvoření bublin při vytlačování materiálu a následně horší kvalitu tisku. K dispozici je i materiál vytvořený kombinací polykarbonátu a ABS (PC-ABS), který výhodně kombinuje vlastnosti obou materiálů [42, 48, 49].

3.6 TPE (termoplastický elastomer)

Termoplastické elastomery jsou směsi vyrobené z tvrdých termoplastických polymerů s měkkým kaučukovým materiálem. Typický TPE je měkký a pružný. Výsledný objekt je pevný a pružný zároveň. V současné době existuje značné množství různých druhů termoplastických elastomerů. Nejčastěji používanými pro tisk jsou TPE-E (kopolyesterová směs) a TPE-U (termoplastický polyuretan). Nejčastěji se teplota nastavená na trysce pohybuje mezi 200 °C – 240 °C. Doporučená teplota podložky je v rozmezí 80 °C – 100 °C [53].

3.7 Podpůrné materiály při tisku

V případě tisku modelu, který vyžaduje podpůrné konstrukce, které zabrání pokládání vlákna do prázdného prostoru, existují dva možné přístupy. První přístup využívá pro podporu stejný materiál jako pro samotný objekt. Druhý přístup využívá jiný materiál (za předpokladu 3D tiskárny jež obsahuje dvě tiskové hlavy) a nejčastěji jsou používány dva následující materiály:

HIPS (High Impact Polystyren) – je houževnatý polymer složený z polystyrenu a kaučuku. Tento materiál je kvůli obsahu kaučuku velmi náchylný na stárnutí a nedoporučuje se tento materiál používat na venkovní aplikace. Teplota na trysce je kolem 240 °C a teplota podložky je doporučena 100 °C. Tento materiál se používá nejčastěji v kombinaci s ABS, kdy jsou následně podpory vytvořené z materiálu HIPS rozpuštěny v limonenu. V případě, že požadavky kladené na výsledný objekt jsou bližší materiálu HIPS, lze tisknout podpory z ABS a ty následně rozpustit v acetonu. Není to však příliš častá aplikace. Jako materiál pro tisk objektu může být použit i PLA, ale zde může být nevýhodou vysoká teplota podložky nutná pro HIPS, jež je vyšší než teplota měknutí PLA a záleží tedy především na charakteru tištěného objektu [51, 54].

PVA (polyvinyl alkohol) – materiál, který bývá použit výhradně pro tisk podpor. Jeho výhodou je ve velmi snadné rozpustnosti ve vodě. Tato vlastnost je současně jeho nevýhodou a vyžaduje skladování v suchém prostředí. Teplota na trysce se pohybuje v rozmezí 160 °C – 200 °C a teplota podložky 0 °C – 50 °C. Je tedy vhodný pro kombinaci jak s ABS tak s PLA a případně i jinými materiály [51, 54].

Tab. 2 Vlastnosti základních materiálů pro FDM tisk [42, 51, 53, 56]

	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Hustota [kg/m ³]	Teplota tání [°C]	Teplota skelného přechodu T _g [°C]
ABS	27 - 65	1,5 - 110	1010 - 1210	270 - 300	85 - 125
PLA	10 - 60	1,5 - 380	1210 - 1430	150 - 160	45 - 65
PA	55 - 75	100	1200 - 1220	267	150
PC	40 - 50	200 - 300	1130	225	45
HIPS	20 - 50	25 - 60	1050	230	100
PVA	67 - 100	0 - 300	1190 - 1310	163	62

4 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

V současné technologii se kompozitní materiály velmi často využívají díky pozitivním prvkům materiálů jako jsou například navrhování lehké konstrukce, která má vysoké hodnoty mechanických vlastností. Jsou to zejména parametry pružnosti, měrné pevnosti a odolnosti proti únavě. Únavová odolnost je podobná jako u slitin hliníku nebo titanu.

Kompozitní materiály jsou vytvořeny kombinací dvou i více fyzikálně a chemicky odlišných složek do jednoho celku. Pokud se spojí tyto složky, vznikne nový materiál se zajímavými vlastnostmi. Pokud by jsme zkoušeli samostatnou složku, tak by nikdy nedosáhla těchto vlastností. Pevnější a tvrdší nespojitou složku kompozitu nazýváme výztuž a spojitou složku, většinou poddajnější, která má funkci pojiva výztuže, nazýváme matrice [35].

S kompozity se můžeme setkat u běžných věcí jako je například část lodě, tenisová raketa, rám cyklistického kola. Dále se kompozitní materiály využívají u zařízení vysílaných do kosmického prostoru, leteckých konstrukcí a mnoho dalších nekonvenčních využití.

Kompozitní materiály musí splňovat následující podmínky:

- Výztuž musí být v kompozitu zastoupena více než 5%,
- Kompozitní materiál musí být připraven smícháním složek.
- fyzikální, chemické i mechanické vlastnosti výztuže a matrice se musí lišit; výztuž je obvykle tužší a také významně pevnější v tahu než matrice.

Za nevýhodu u kompozitních materiálů lze považovat vysokou citlivost na technologickou kázeň při výrobě. Musí být dodržen přesný poměr u výztuže i matice. Orientace kladených vláken, pak následný postup při vytvrzování. Vlastnosti následného materiálu ovlivňuje vlhkost, teplota a výkyvy okolního prostředí při výrobě.

Mezi výhody materiálu z kompozitu patří:

- Dobrá rázová pevnost.
- Odolnost proti korozi.
- Pozvolný postup poruch.
- Nižší nároky na údržbu.

- Vysoká odolnost proti vibracím
- Nízká hmotnost (4x lehčí než ocel).
- Nízká teplotní dilatace.
- Zanedbatelné ztráty elektromagnetického záření (kryty radarových antén) [36].

Další výhodou kompozitů před kovovými konstrukcemi je ve výrobním procesu. Kompozity umožňují úspory a to díky jednoduché výrobě složitých tvarových dílů. Kladou se vrstvy a ty plynule mění tloušťku. Tím se výroba zjednodušuje. Tato vlastnost je též z jedním z hlavních výhod pro použití kompozitu namísto kovu.

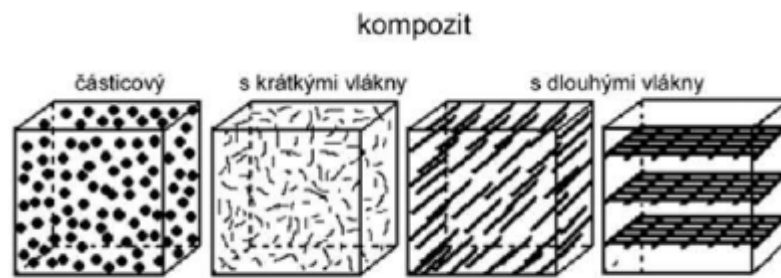
Členění kompozitů lze zohledňovat podle různých aspektů. Podle druhu matrice se rozlišují kompozity s polymerní, keramickou, nebo kovovou maticí. Podle druhu zpevňující fáze jsou kompozity s uhlíkovou, skleněnou, přírodní, kovovou, keramickou a polymerní fází. Podle fáze zpevňující tvar jsou kompozity vláknové nebo částicové zpevňující fáze. Při překročení hranice množství výztuže v kompozitu může docházet ke ztrátě mechanických vlastností [17, 37, 38, 39].

4.1 Výztuže

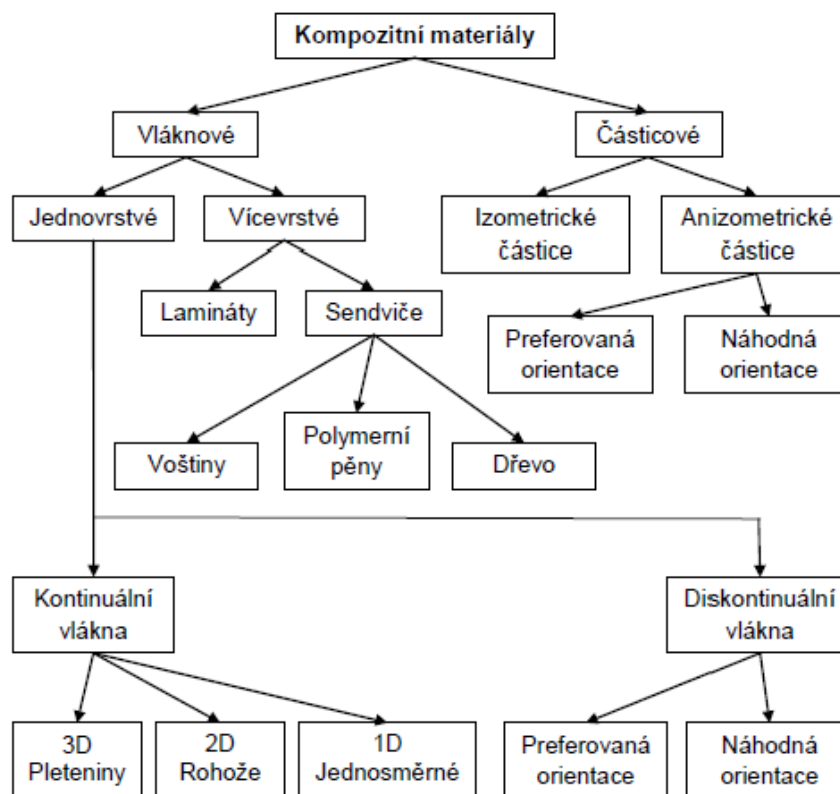
Výztuž je taková složka kompozitu, kvůli které byl kompozit vytvořen. Má některou vlastnost, kvůli které využijeme výsledný kompozit a využijeme ho, jelikož v elementární podobě výztuže to není možné.

Některé kompozity mohou obsahovat vyztužující fáze s různou velikostí. Nejmenší rozměry mají nanokompozity, u kterých se průměr nebo délka vlákna pohybuje v řádech 100 nm. Mikrokompozity, které mají největší příčný rozměr výztuže (v rozmezí 100- 102 μm). V průmyslu mají mikrokompozity největší význam. U makrokompozitů jsou největší rozměry vyztužující fáze. Velikost příčného rozměru je okolo 100mm. Jsou používány zejména ve stavebnictví (například železobeton).

Výztuže se dají dělit podle tvaru a velikosti a také podle použitého materiálu. Při rozdělení podle tvaru a velikosti se využívá štíhlostního poměru, který definujeme jako podíl největšího a nejmenšího rozměru výztuže [38].



Obr. 15 Dělení kompozitů podle uspořádání a tvaru výztuže [38]



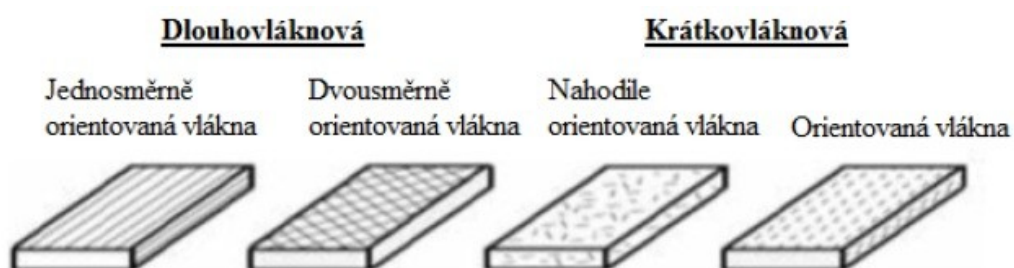
Obr. 16 Rozdělení dle geometrie výztuže [38]

Využitím ve tvaru kulové částice je u kompozitu dosaženo nejnižšího vyztužení. Vyztužení dále roste přes destičkové částice výztuží. Nejvyšší hodnoty jsou u vláknových výztuží. Z toho vyplývá, že se zvyšující se výztuží dochází ke zpevnění anizotropních částic.

4.1.1 Vlákenné výztuže

Vlákna výztuže mají na starosti ohybovou a tvarovou pevnost kompozitu. Tyto vlastnosti ovlivňují materiály vláken. Jejich orientace a množství v materiálu. Orientací vláken jde nastavit tuhost a pevnost výsledného kusu. Dále také odolnost proti teplotě, únavě a vlhkosti. Jeden rozměr výztuže je vždy větší než dva zbývající. Pevnost a tuhost materiálu se mění podle směru uložení vláken. Nejvyšší pevnost je ve směru vláken a mimo orientaci je pevnost podstatně horší.

Vlákenné výztuže mohou být krátké, dlouhé, nebo nepřerušované po celé délce výrobku. Uspořádání je možno využít chaoticky, v jednom směru nebo ve dvou směrech (viz obr. 17) [39].



Obr. 17 Dělené vlákenné výztuže [39]

Sdružením elementárních vláken vznikají prameny, které jsou poté zpracovány na polotovary typu:

- Tkaniny.
- Roviny.
- Kabelová a jednoduchá příze (pro výrobu technických tkanin).
- Prameny bez zákrutů.
- Sekané prameny (křehká vlákna).
- Mletá vlákna (prameny mají určitou potřebnou délku).
- Rohože (vznik vkládáním nepravidelně orientovaných 50 mm dlouhých vláken).
- Prepregy (různě široké a obsahují tkaninu, rohože nebo roviny v paralelním uspořádání).

Nejvíce používanými jsou tkaniny a roviny. Roviny jsou dodávány v cívkách s vnějším nebo vnitřním odtahem. Jinak také formou pásek o různé šířce obsahující vlákna převážně v podélné orientaci. V příčném směru jsou vlákna vázána pouze za účelem dodr-

žení konstantní šířky pásky. Tkaniny mají různou vazbu z textilu (viz. Obr. 35). Jsou zde požadavky na pevnost a tuhost kompozitu. Dále také tvarová členitost formy. Vzájemné uspořádání osnovy vytváří tři základní typy vazeb:

- Atlasová vazba (je nejméně pevnou, ale nejlépe tvarovatelnou vazbou).
- Keprová vazba (je ohebná, ale pouze při měkké povrchové úpravě vláken. Na tkanině je vytvářen diagonální vzor. I přes to má nejčastější využití. A to díky poměru ceny a tvarovatelnosti).
- Plátňová vazba (je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování) [35]



Obr. 18 Typy tkaní [35]

Druhy materiálů vláken jde v tkaninách kombinovat i s jinými druhy vláken. Například ve směru kde je menší namáhání materiálu, lze vlákna nahradit levnějšími skelnými vlákny. Výsledek je označován jako hybridní tkaniny.

Vláknové výztuže se dají dělit podle použitého materiálu na:

- Polymerní vlákna
- Skleněná vlákna
- Keramická vlákna
- Bórová vlákna
- Uhlíková vlákna
- Kovová vlákna
- Přírodní vlákna
- Čedičová vlákna

Skleněná vlákna

Předností skelných vláken je nízká cena a lepší houževnatost než uhlíkové vlákna. Jsou vyrobeny tažením z taveniny a jsou amorfní. Nejčastěji se pohybují průměry od 3,5 do 20 μm . Takových průměrů lze dostat dloužením proudu skla vytékajícího z platinových trysek. Vytažená vlákna z trysek se sbíhají do pramene, za horka jsou vlákna opatřeny tenkým ochranným povlakem, jelikož vlákna jsou hodně abrazivní a lámavá. Jako povlak se používá lubrikační vosk, nebo vazebné prostředky. Dále jsou ošetřená vlákna navíjena na buben.

Uhlíková vlákna

Mají vysoký modul pružnosti, vysokou pevnost, tepelnou odolnost a vysokou únavovou pevnost současně s nízkou měrnou hmotností. Vlákna jsou krystalická, elektricky vodivá. Nevýhodou je malá odolnost proti nárazu. Ta je způsobena křehkostí uhlíkového vlákna a elektrochemická koroze při kontaktu s méně ušlechtilými kovy. Díky vysokému modulu pevnosti, relativní nízké hmotnosti a také vysoké ceně se uhlíková vlákna používají na špičkové aplikace pro lodě, sportovní potřeby, letectví, kosmologické aplikace a automobilový průmysl. V současnosti se začínají čím dál více hybridní tkaniny vyrobené z více druhů vláken. Například uhlík - kevlar. Používají se pro zkombinování vlastností obou druhů vláken [17, 36, 37].

4.1.2 Částicové výztuže

U částicových výztuží záleží na tvaru a velikosti částice. Jsou dva typy částicových výztuží. Částice minerálního původu, ty se zpracovávají průmyslově mechanickým mletím na určitý tvar a velikost. Nebo jsou vyráběna průmyslově při chemické změně z přírodních zdrojů. Zvýšení tuhosti a zlepšení tvarové stálosti se dosahuje použitím anorganických částic. Elastomerní částice v kompozitu zlepšují jeho houževnatost. Částice sulfidu a grafitu zvyšují odolnost proti otěru a vylepšují kluzné vlastnosti.

Částicové výztuže se dále dají dělit na izometrické, které mají tvar koule nebo elipsoidu a anizometrické, které mají tvar destiček nebo jehlic. Částicové výztuže mají vlastnosti, které jsou nezávislé na směru [36, 37].

5 SEDVIČOVÉ STRUKTURY

Výroba sendvičových konstrukcí je typ procesu, který je velmi důležitý z důvodu konečných vlastností výrobku i ekonomiky celé výroby součástí. Volí se metoda zpracování každého nového dílu. Ta je vybrána z hlediska charakteristiky výrobku. Jsou zde faktory jako je, členitost, velikost výrobku, sériovost výrobku, povrchová kvalita, limitování nákladů na dílec, požadované mechanické vlastnosti na finální díl a hmotnost [29].

Sendvičové struktury se dělí podle typu zpracování na: ruční kladení a stříkání, vysokotlaké vstřikování (Resin Transfer Moulding- RTM), vytvrzování v peci při působení vakua, lisování ve vyhřívaném válci a vakuovou infuzi [29].

5.1 Vakuová infuze

Vakuovou infuzí (Vacuum Infusion Process - VIP) je technologie zpracování, při které je využíváno podtlaku na prosycení výztuže pryskyřicí. V pracovním postupu se suchá, neprosycená výztuž vloží na formu. Před prosycením matrice je uvnitř formy vytvořeno vakuum [29].

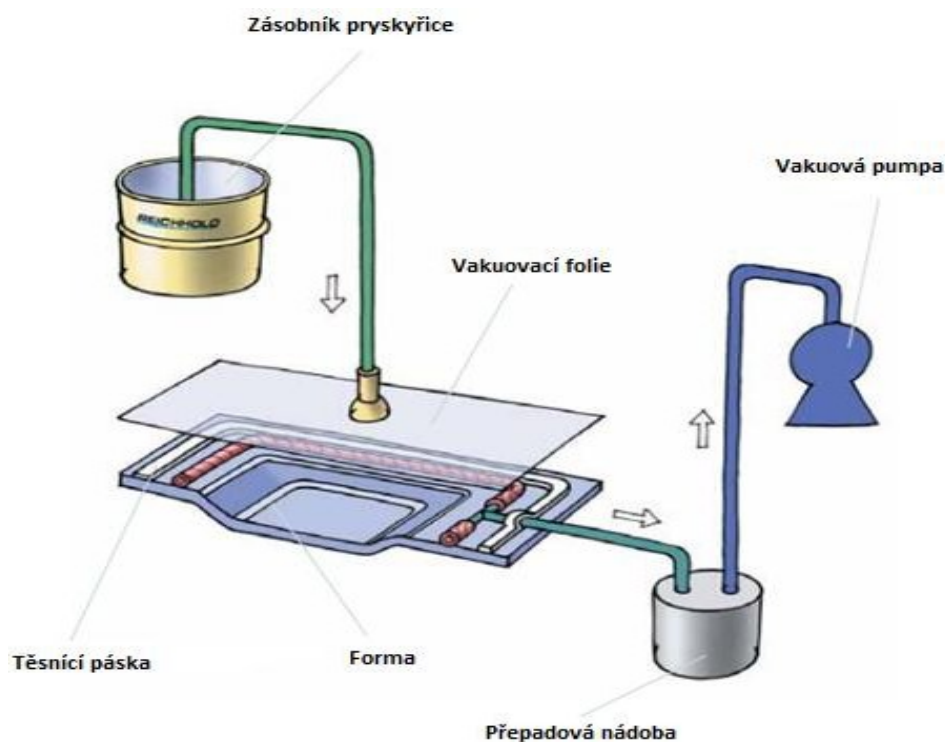
Vakuovou infuzí se běžně zpracovávají malé, nebo střední série. Pro výztuže jsou využívány různé druhy materiálů, jako jsou tkaniny na bázi skelných vláken, aramidové materiály, uhlíkové materiály, speciální druhy prošivaných tkanin, nebo složené rohože. Metoda vakuové infuze se využívá pro díly, které se následně vyplňují jádrovými materiály, aby byla vytvořena sendvičová struktura. U takových struktur se nejčastěji využívá pěnového jádra [30].

Při zpracování vakuovou infuzí se využívá pomocných materiálů, které jsou při výrobě nezbytné. K pomocným materiálům se zařazuje vakuová fólie, distribuční síťka, separační tkanina a vakuová fólie. Jakmile je proces výroby dokončen, z pomocných materiálů stává ve většině případů odpad [30].

Vakuová fólie je plastová fólie, která má funkci horního dílu formy, je pružná, mechanicky, chemicky a tepelně odolná a z horní strany přesahuje přes ostatní pomocné materiály. Kde je utěsněna pomocí těsnicí pásky. Díky tomu je možné vytvořit vakuum. Velikost se liší podle typu a velikosti výrobku. Rozměry jsou stanoveny s přesahem 30 až 40% větší než samotný výrobek [30].

Netkaná textilie, se nazývá rohož. Ta má za funkci odsání vzduchu a přes separační fólii také vstřebává přebytečnou pryskyřici. Rozvod pryskyřice zajistí distribuční síťka a také urychlí tok do suchých míst výztuže. Aby byl zajištěn stabilnější tok pryskyřice, je možné použít i více vrstev distribuční síťky. Separační tkaninu tvoří syntetická vlákna, která jsou kladena první v pořadí a to přímo na výztuže výrobku. Po odformování je separační tkanina odtrhnuta a na výrobku je viditelný drsný povrch. Ten je někdy nutné povrchově upravit. To se provádí další povrchovou úpravou, lepením, nebo laminováním [30].

Výhody vakuové infuze jsou, minimální obsah dutin, velkorozměrné výrobky, nízká hmotnost, vysoký obsah výztuží, výrobky mají dobré mechanické vlastnosti a je eliminován únik styrenu do ovzduší. Nevýhody vakuové infuze spočívají ve vysokých nárocích na zkušenosti pracovníka a na množství pomocných materiálů, které zvyšují náklady konečného produktu [30].



Obr. 19 Schéma procesu vakuové infuze [28]

Nejčastější využití procesem vakuové infuze jsou trupy a paluby lodí, různé komponenty letadel, sendvičové konstrukce, dílce na kapotu vagónů, lokomotiv, lopatky turbín u větrných elektráren a další spíše malosériové velkoobjemové výrobky [30].

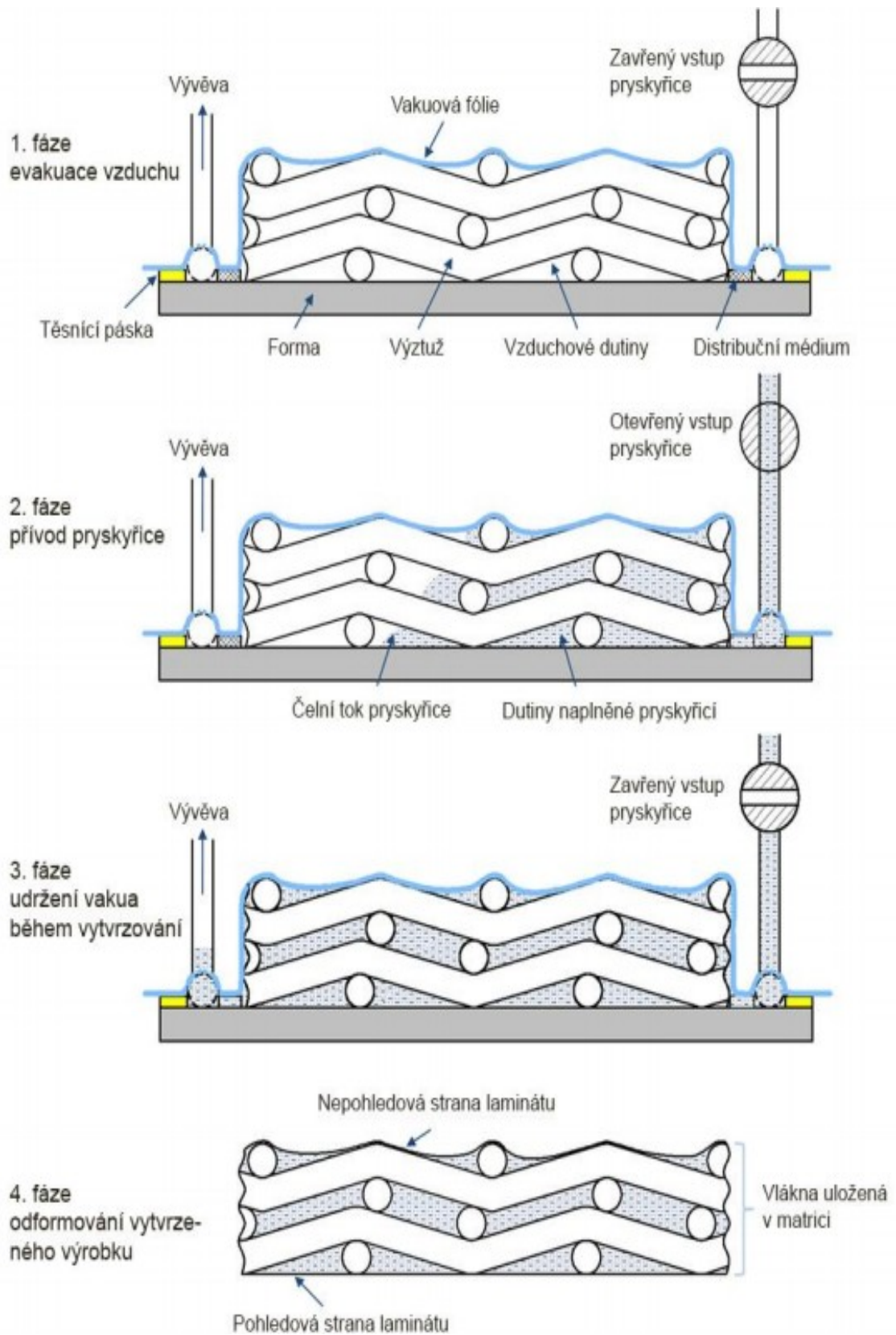


Obr. 20 Vakuová infuze- výroba trupu lodě [31]

5.1.1 Princip vakuové infuze

Suchá výztuž je postupně kladena do dutiny formy. Na výztuž jsou přidány pomocné vrstvy, jako jsou separační fólie, distribuční médium a vakuová fólie. Některé části jsou přidány ve více vrstvách dle potřeby technologického postupu. Z formy je odsátý vzduch a tím je vytvořen podtlak. Díky vakuové fólii jsou všechny vrstvy materiálů ve formě slisované a následuje transport matrice, která je nasáta pomocí vakuové pumpy. Díky podtlaku je postupné prosycení výztuže maticí rovnoměrné. Jakmile je povrch celý prosycen, dochází k vytvrzování matrice. Vytvrzování probíhá při běžných atmosférických podmínkách. Jakmile je matrice vytvrzena, dojde k odformování výsledného výrobku. U vakuové infuze je přebytečná matrice odsávána z formy do přepadové nádoby, tím je zajištěn tenkostěnný, pravidelný výrobek, který je lehčí a má lepší mechanické vlastnosti. Díky vakuové infuzi je zabráněno emisi matrice výrobku [32, 33].

Mezi další neznámější modifikace vakuové infuze patří VFI- Vacuum Foil Infusion, VPI- Vacuum Process Infusion, RI- Resin Infusion, DBI- Double Bag Infusion, CVI - Controlled Vacuum Infusion, VBM- Vacuum Bag Moulding a SCRIMP- Seeman Composite Resin Infusion Moulding Process [32, 33].



Obr. 21 Podrobný popis vakuové infuze [33]

6 VYZTUŽOVÁNÍ POLYMERNÍCH STĚN ŽEBROVÁNÍM

Snaha omezit hmotnost výrobku vede nejčastěji k tomu, že výrobky z plastů jsou navrhovány jako tenkostěnné součásti. Pokud se mění tloušťka tenkostěnného prvku při daných okrajových podmínkách, závisí hodnoty ohybových napětí nepřímo na kvadrátu poměru tlouštěk:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

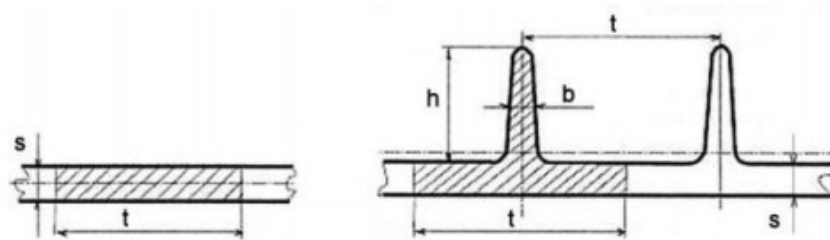
To znamená, že například při zvýšení tloušťky stěny o 50%, poklesnou ohybové vlastnosti 2,25krát. Zvyšování ohybové tuhosti a pevnosti stěny výrobku zvětšení její tloušťky je tedy málo účinné a neekonomické. Podle možností výrobní technologie se upravuje tvar výrobku tak, aby se podstatná část průřezu nacházela v relativně větší vzdálenosti od neutrální plochy plošného prvku. Poloha neutrální plochy je dána polohou těžiště průřezu [34].

6.1 Ohybová tuhost a pevnost vyztužených stěn

Ohybová tuhost tělesa typu nosník respektive prutu je dána součinitelem $E \cdot J$ 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:

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



Obr. 22 Vyztužení stěny jednosměrnými žebry [34]

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:

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

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 tzv. ekvivalentní tloušťky vyztužené stěny. Ekvivalentní tloušťka vzhledem k tuhosti vyztužené stěny je dána vztahem:

$$J = \frac{t \cdot s_t^3}{12}$$

vzhledem k úrovni ohybového napětí pak vztahem:

$$W = \frac{t \cdot s_p^3}{6}$$

kde: J, W - parametry vyztužené stěny

t - rozteč žeber [34].

7 APLIKAČNÍ POTENCIÁL 3D TISKU

Díky 3D tisku lze snížit náklady na výrobu forem a prototypů, rychlejší vývoj produktů, nižší náklady na výrobu finálních produktů a to díky eliminaci materiálového odpadu, jednodušší výrobní proces a zároveň výrobu tvarů a struktur, které bylo v minulosti neekonomické vyrábět a v současnosti se díky 3D tisku vyrobí jednoduše a za krátký čas. I když je dnes stále tahle technologie na počátku svého rozvoje, její možnosti využití stále rostou a adaptují se [12, 13].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bude výzkum možnosti vyztužení kompozitních panelů pomocí žebrovaných konstrukcí vytvořených aditivní technologií . Technologie zpracování kompozitních panelů bude vakuovou infuzí a ruční laminací. Dále bude práce zaměřena na testování mechanických vlastností těchto vyztužených i nevyztužených kompozitních konstrukcí. Mechanické vlastnosti se budou zjišťovat pomocí tříbodové ohybové zkoušky.

Hlavní cíle diplomové práce:

- Návrh typu žeber.
- Návrh typu zámků.
- Výroba žeber pomocí aditivní technologie.
- Laminace vyrobených vzorků.
- Příprava zkušebních těles.
- Testování mechanických vlastností.
- Vyhodnocení a diskuze výsledků.

9 3D TISKÁRNA STRATASYS DIMENSION SST 768

Tiskárna Dimension SST 768 (Obr. 23) pracuje pomocí metody FDM (Fused Deposition Medeling), což je metoda tavení při postupném nanášení materiálu po tenkých vrstvách 0,254 mm, nebo 0,33 mm. K tisku je využíván netoxický ABS plastový materiál, který je dnes běžně používaným materiálem a pomocný materiál je Support. [57].



Obr. 23 Tiskárna Dimension SST 768 [58]

Tab. 3 Technické informace k 3D tiskárně STRATASYS DIMENSION SST

Rozměry tiskárny (d x š x v): (bez podstavce)	686 mm x 914 mm 1041 mm
Hmotnost tiskárny:	136 kg
Pracovní rozsah (X x Y x Z)	203mm x 203mm x 350 mm
Výrobní rozsah (X x Y x Z)	200mm x 200mm x 250 mm
Tloušťka vrstvy:	- síla vrstvy 0,254 mm - síla vrstvy 0,33 mm
Rozlišení:	Osa x - 0,1 mm Osa y - 0,1 mm Osa z - 0,5 mm
Použitý materiál:	ABS
Formát pro zpracování dat:	STL

Tiskárna Dimension SST 768 je díky svým rozměrům nenáročná na pracovní prostor a díky umístěným kolečkům je snadno přemístitelná. Přístup k výměně materiálu pro 3D tisk je velmi snadný, materiál je dodáván v kazetách, díky kterým je materiál chráněn před vnějšími vlivy (Obr. 24). Každá kazeta má čip instalovaný výrobcem, díky kterému lze získávat informace o zbývajícím materiálu.



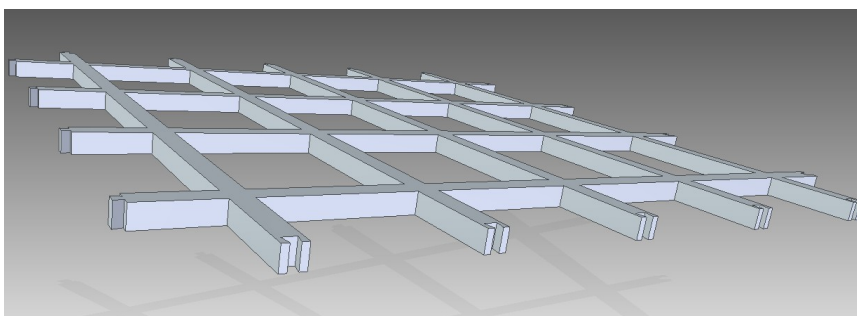
Obr. 24 Ukázka uložení kazet uvnitř tiskárny

10 VÝROBA VZORKŮ ŽEBER POMOCÍ 3D TISKU

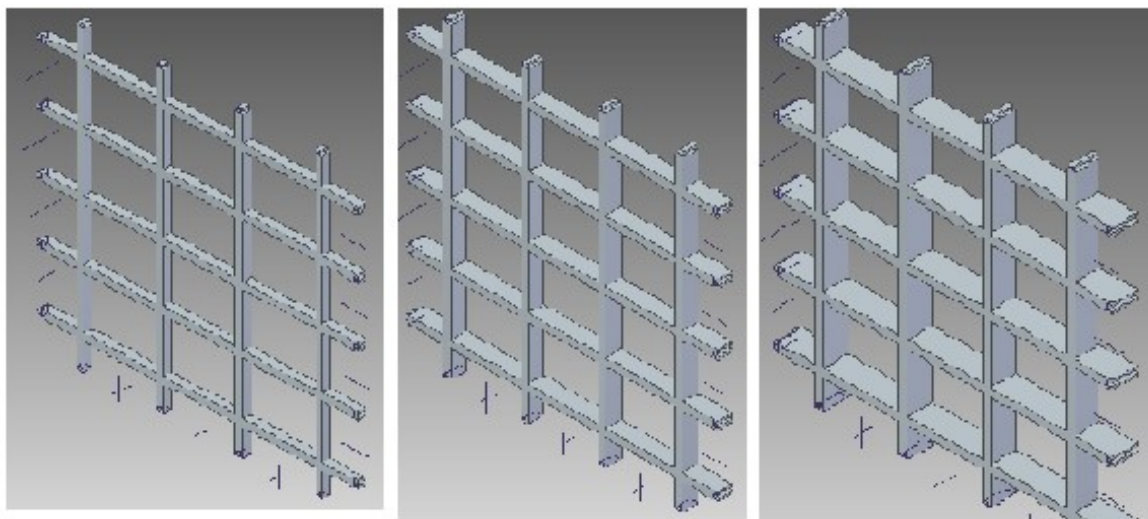
Pro výrobu byly navrženy různé typy žebrování. Zvolený model byl zadán 200 mm x 200 mm s měnící se výškou a tvarem žebra. Prvotní návrh počítal s třemi typy výšky žeber 5 mm, 10 mm a 15 mm. (Obr. 26) A také s třemi typy tvarů žeber.

K návrhu byl použit software Solid Edge STS od firmy SIEMENS. V softwaru byly vytvořeny modely prvního typu návrhu s konstantní tloušťkou žebra 5 mm u všech případů, pouze s měnící se výškou.

Prvním typem modelu žeber jsou žebra s konstantní šířkou v celé délce.

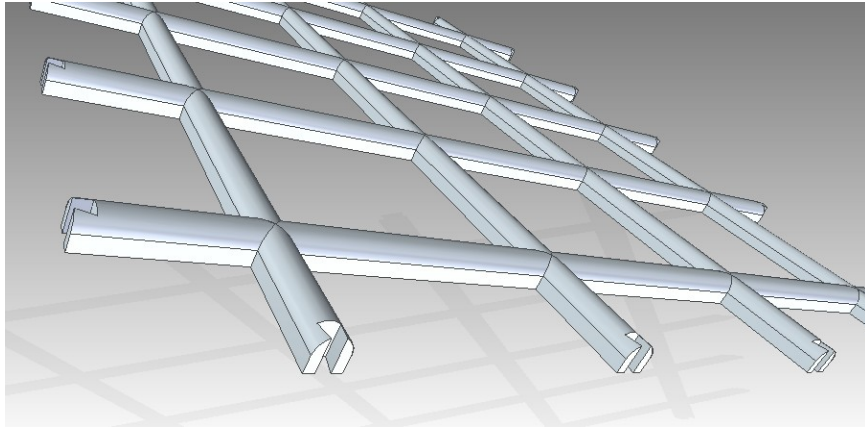


Obr. 25 První typ modelu žeber



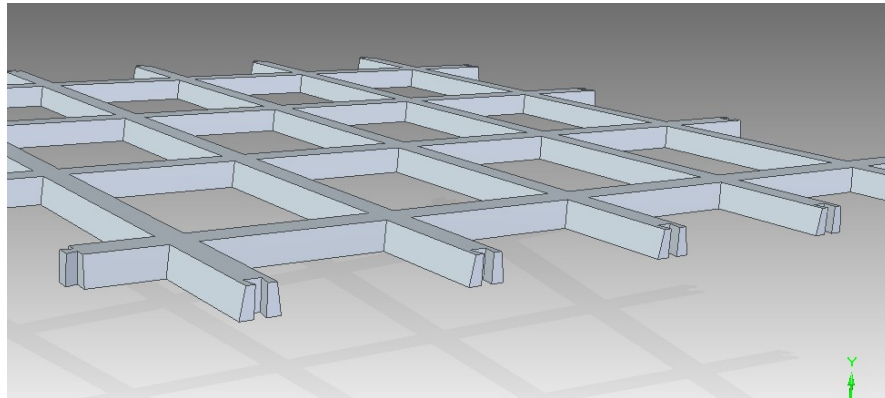
Obr. 26 Ukázka modelů s měnící se výškou žebra 5 mm, 10 mm a 15 mm

Druhým typem návrhu (Obr. 27) byla žebra se zaoblením horní části s taktéž měnící se výškou s totožnými rozměry jako u prvního typu.



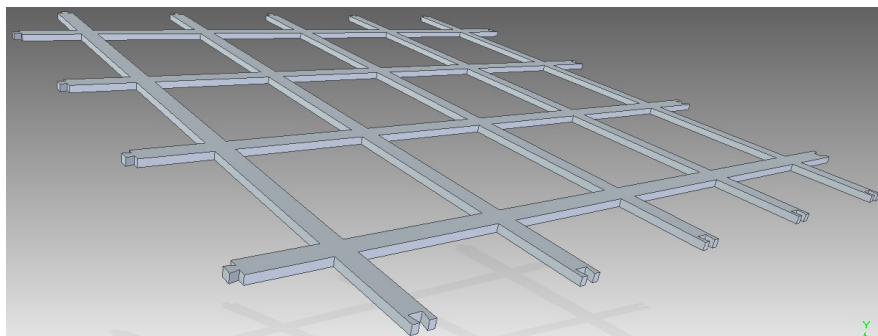
Obr. 27 Druhý typ modelu žeber

Třetí typ byl vymodelován se zkosenými hranami a rovněž ve třech výškách vzorku 5 mm, 10 mm, a 15 mm.



Obr. 28 Třetí typ modelu žeber

Modely byly uloženy ve formátu STL z důvodu kompatibility s 3D tiskárnou. Po pozdějším problémovém zpracování, respektive výrobě pomocí vakuové infuze byly přidány navíc vzorky prvního typu (Obr. 29) se změnou výšky pouze na 2 mm.



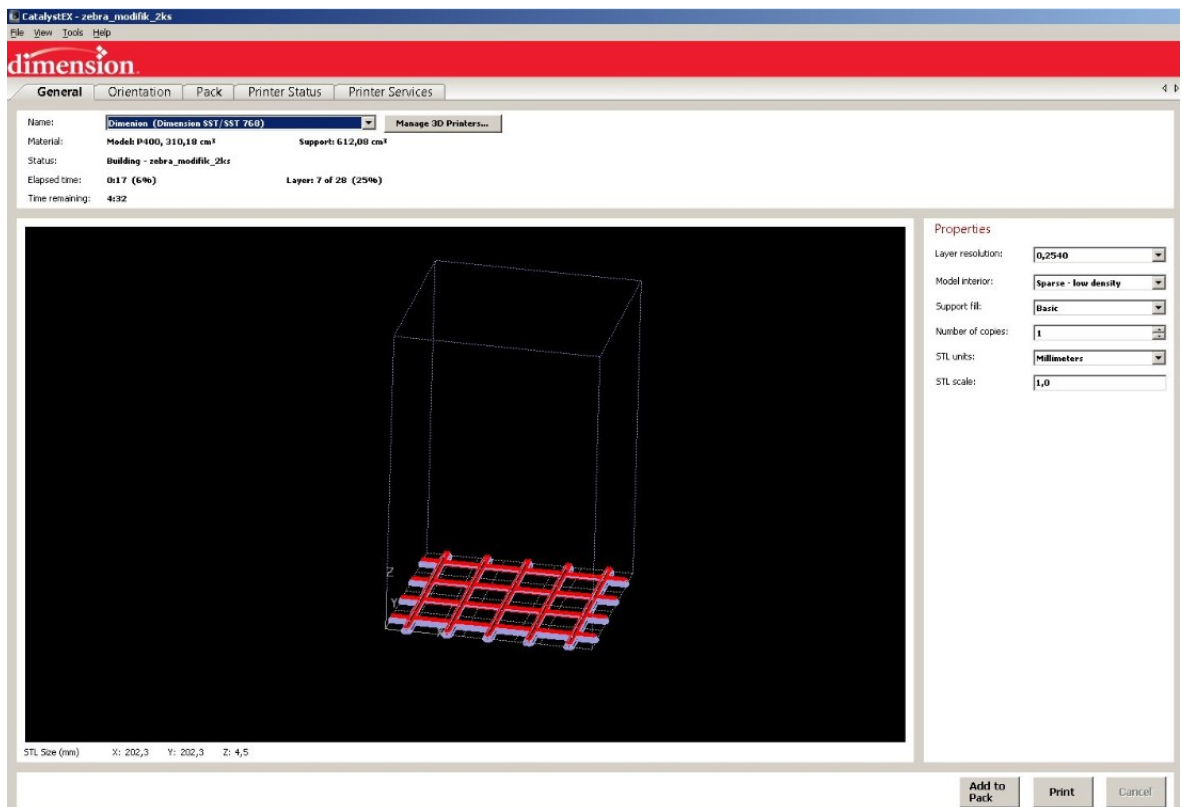
Obr. 29 Ukázka změny výšky modelu na 2mm

V modelech byly vytvořeny zámky, díky kterým lze vytištěné součásti spojovat jednu k druhé a tvořit tak souvislé vyztužení.



Obr. 30 Detail zámků

Po převedení do formátu STL je model zaslán do tiskárny, kde byl otevřen v originálním softwaru tiskárny (Obr. 31).

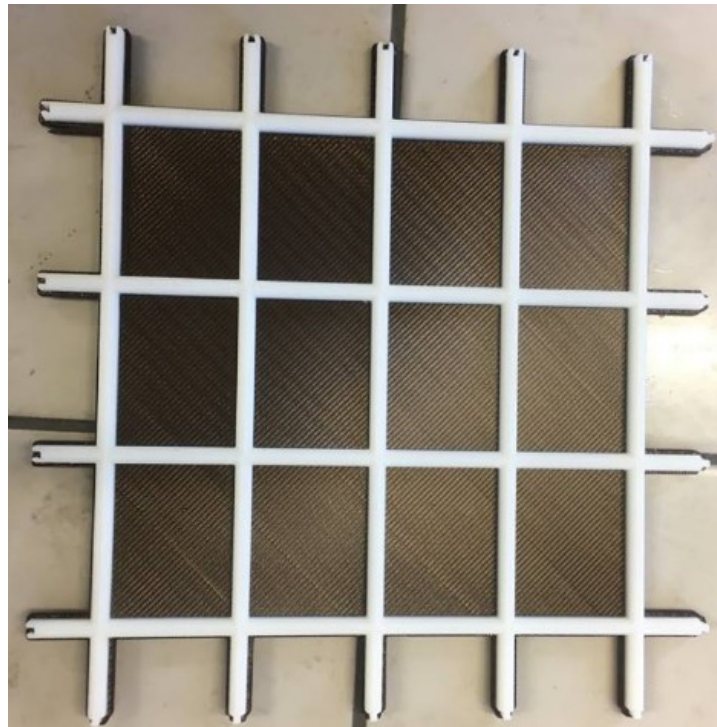


Obr. 31 Ukázka softwaru Dimension

Doba tisku prvního typu s výškou 5mm trvala 3,5 hodiny a doba tisku modelu s výškou 15 mm tiskárna vytiskla za 7,5 hodiny při tisku vrstev 0,254 mm silné a to včetně

podpor. Cena materiálu je poměrně vysoká a vychází cca 10 Kč/g materiálu. Jedna kazeta potom stojí cca 10 000 Kč. Z důvodu velké ceny materiálu byla vytisknuta pouze žebra prvního typu a pouze s výškami do 2 mm, 5 mm, 10 mm a 15 mm.

Na výrobu vzorku s výškou 5 mm bylo použito 33g materiálu ABS a 27g podpůrného materiálu. Průměrná materiálová cena takového vzorku tedy činila 330 Kč bez podpory. Podpory se u tohoto tisku využívá po celé spodní ploše výrobku. Podpora je rozpustná v louhové vodě. Vytisknuté výrobky mohou být očištěny ponořením do louhové vody, nebo v tomto případě mechanickým odstraněním podpory odtržením.



Obr. 32 Ukázka vytištěného žebra včetně podpory

11 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VAKUOVÉ INFUZE POD PRUŽNOU FOLIÍ

11.1 Pomocné materiály a zařízení

Při výrobě pomocí vakuové infuze je třeba několik pomocných komponentů. Díky těmto pomocným komponentům se při technologii dosahuje dobrých vlastností, tedy optimálního poměru množství pryskyřice a výztužných vláken. Z pomocných materiálů se po odformování stává odpad. Počet potřebných pomocných dílů nám určuje typ a tvar výrobku.

11.1.1 Forma

Jako forma se používá skleněná tabule (v případě rovinných panelů), nebo například laminátová kompozitní forma (v případě tvarově složitějších dílců). Může mít rovinný, nebo různě tvarovaný povrch dle požadovaného tvaru výrobku..

11.1.2 Separační vosk M 700/C - WAX

Separační vosk (Obr. 33) se nanáší na mechanicky očištěnou formu a po zaschnutí vosku je forma vyleštěna hadříkem. Poté je proces opakován. Forma je separována k pozdějšímu snadnému odformování výrobku.



Obr. 33 Separační vosk

11.1.3 Vakuová vývěva

Je zařízení, které odčerpává vzduch z uzavřené formy a vytváří vakuum (Obr. 35). Díky vakuu se při infuzi nasává pryskyřice ze zásobníku do celé formy a dochází k prosycování jednotlivých tkanin výrobku. K vakuové infuzi je třeba podtlaku 0,8 až 1 bar.



Obr. 34 Vakuová vývěva- Value [60]

11.1.4 Rezervoár

Slouží k zachycení přebytečné pryskyřice, která je z formy odsávána pomocí podtlaku. Rezervoár (Obr. 36) je umístěn mezi vývěvu a formu. Nádoba má 1 vakuový vstup a 3 vstupy pryskyřice, díky tomu je možné provádět více infuzí současně. Rezervoár je vybaven manometrem.



Obr. 35 Rezervoár -Airtech [60]

11.1.5 Hadice pro dopravu pryskyřice

Hadicí je při vakuové infuzi odveden vzduch a také slouží k dopravě pryskyřice a odvodu přebytečné pryskyřice (Obr. 37). Hadice je vyrobena z PE a je chemicky a tepelně odolná. Průměr hadice se volí dle typu a velikosti výrobku. U vakuové infuze se používají dva typy hadic:

- a) Slouží odvodu vzduchu a dopravě pryskyřice.

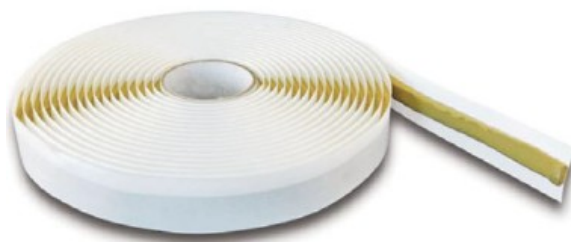
b) Slouží k odvodu přebytečné pryskyřice a pro rozvod pryskyřice do špatně přístupných míst. Hadice má tvar spirály.



Obr. 36 Dva typy rozvodných hadic [60]

11.1.6 Těsnicí páska

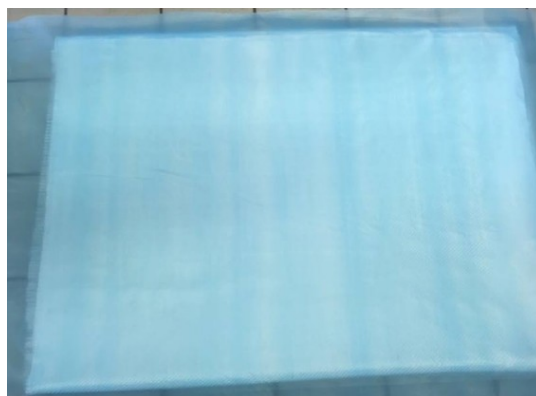
Vytváří vzduchotěsný spoj mezi vakuovací fólií a formou. Páska (Obr. 38) je oboustranná. Jedna strana je nalepena na formu a druhá k vakuové fólii. Podle teploty se používají různé druhy těsnicí pásky.



Obr. 37 Těsnicí páska [60]

11.1.7 Odtrhová fólie

Jedná se o fólii, která je dodávána firmou Havel composites. Fólie (Obr. 39) se přikládá přímo na výztužné materiály. Na odtrhovou fólii se přiloží odtrhová tkanina. Obě vrstvy napomáhají správnému odformování výrobku. Po odtržení vznikne drsný povrch.



Obr. 38 Ukázka použití odtrhové fólie

11.1.8 Odrhová tkanina

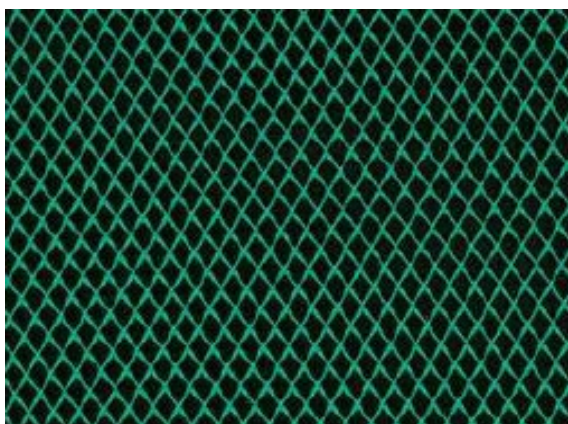
Je to tkanina ze syntetických vláken, která se pokládá jako druhá vrstva po odtrhové fólii. Odrhová tkanina (Obr. 40) se při odformování strhává z výrobku a vzniká drsný povrch potřebný pro další technologické operace - lepení, povrchové úpravy. Vyrábí se z polyesteru nebo zřídka z nylonu. Obecně slouží k oddělení všech pomocných materiálů, které jsou položeny na ní [59].



Obr. 39 Odrhová tkanina [60]

11.1.9 Rozvodná síť - distribuční médium

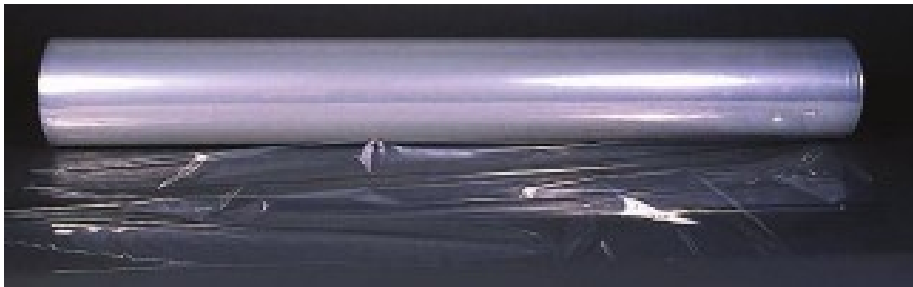
Distribuční médium (Obr. 41) se používá při technologii vakuové infuze pro lepší a rychlejší tok pryskyřice do všech částí výrobku. Stejně jako většina pomocných materiálů distribuční médium nelze po prosycení pryskyřice znovu použít. Může být použita i v několika vrstvách pro ještě lepší tok pryskyřice. Existuje mnoho druhů, které se vybírají podle použité technologie, použité pryskyřice a max. teploty použití [59].



Obr. 40 Rozvodná síť Green Flow [60]

11.1.10 Vakuovací folie

Pružná plastová folie, (Obr. 42) která se vyrábí z PA, PE a PTFE. Umožňuje vytvoření vakua v horní části otevřené formy. Při vakuové infuzi překrývá všechny pomocné a výrobní materiály. Rozměry se volí o 30 - 40% větší než je výrobek. Folie je chemicky, teplotně a mechanicky odolná. Materiál folie je volen dle teploty a složitosti výrobku [59].



Obr. 41 Vakuovací folie [60]

11.2 Materiály tvořící kompozit

11.2.1 Použitá pryskyřice

Biresin CR80 je dvousložková epoxidová pryskyřice, která má transparentní až žloutlou barvu. Je určena pro vstřikovací a vakuové procesy (Obr. 43). Doba zpracovatelnosti je 50 minut. K této pryskyřici se používá tužidlo Biresin CH80-2 (v případě vakuové infuze), nebo Biresin CH80-1 (v případě ruční laminace). [Příloha I]



Obr. 42 Pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidlo CH80-2

Tab. 4 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidla Biresin CH80-2. [Příloha I]

Vlastnosti	Jednotky	Biresin CR80	Biresin CH80-2
Směšovací poměr v hm. dílech	-	100	30
Hustota (při 25C°)	g/ml	1,13	1
Viskozita (při 25C°)	mPa . s	100	50

Tab. 5 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidla Biresin CH80-1. [Příloha I]

Vlastnosti	Jednotky	Biresin CR80	Biresin CH80-1
Směšovací poměr v hm. dílech	-	100	30
Hustota (při 25C°)	g/ml	1,11	1
Viskozita (při 25C°)	mPa . s	100	27

11.2.2 Skelná tkanina AEROGLASS 280 g/m² - kepr

Tkanina s keprovou vazbou (Obr. 34) je dobře tvarovatelná a je vhodná pro složitější tvary. Vykazuje vysokou pevnost. Použita byla tkanina o plošné hmotnosti 280 g/m² ± 15g od firmy Havel composites.



Obr. 43 Použitá tkanina

Tab. 6 Technické parametry použité tkaniny

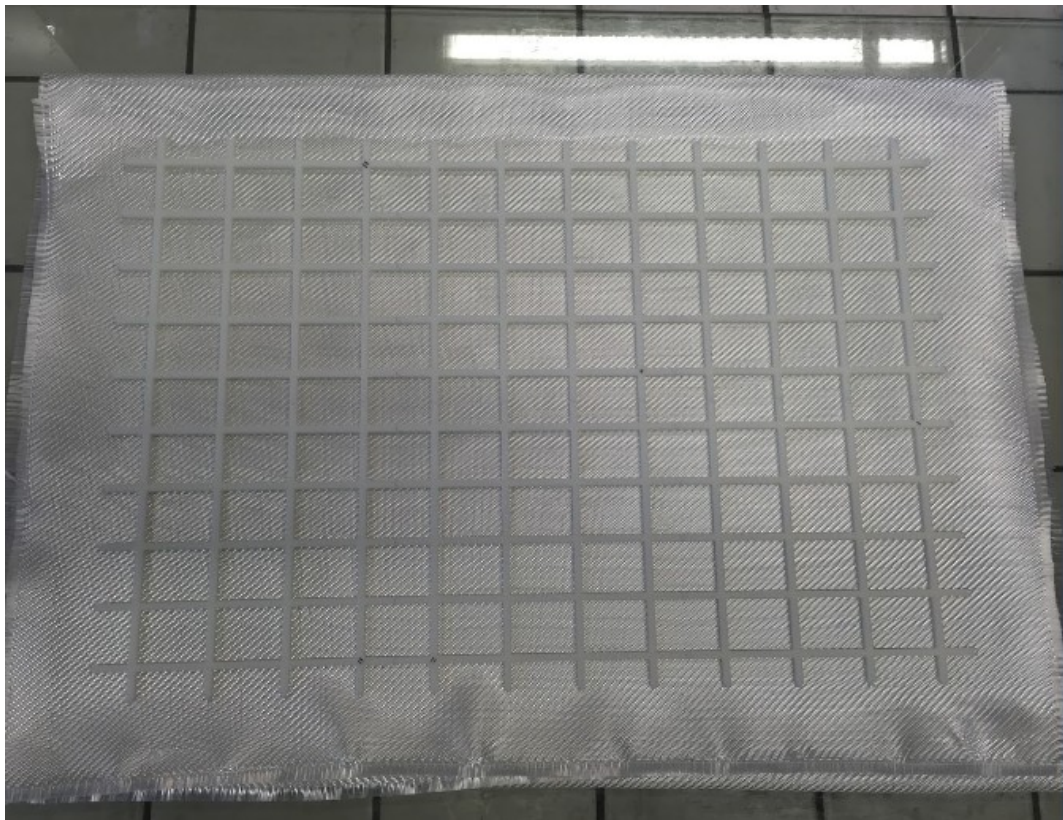
Hmotnost na jednotku plochy	280 +/- 15 g/m ²
Okraje	Odříznuté
Vazba	Plátňová
Použitá příprava	Epoxidová, kompatibilní
Pevnost v tahu N / 50 * 200 mm	≥ 2200
Šířka tkaniny	100 cm, +/- 1cm
Doporučené skladovací podmínky	25 ° C, 61 %

12 VÝROBA VZORKŮ VAKUOVOU INFUZÍ

Pro výrobu vzorků byly zvoleny technologie vakuové infuze pod pružnou fólií a ruční laminace. Po vyztužení laminací jsou vzorky nařezány a testovány ohybovou zkouškou.

12.1 Postup výroby vzorku s výškou 5mm

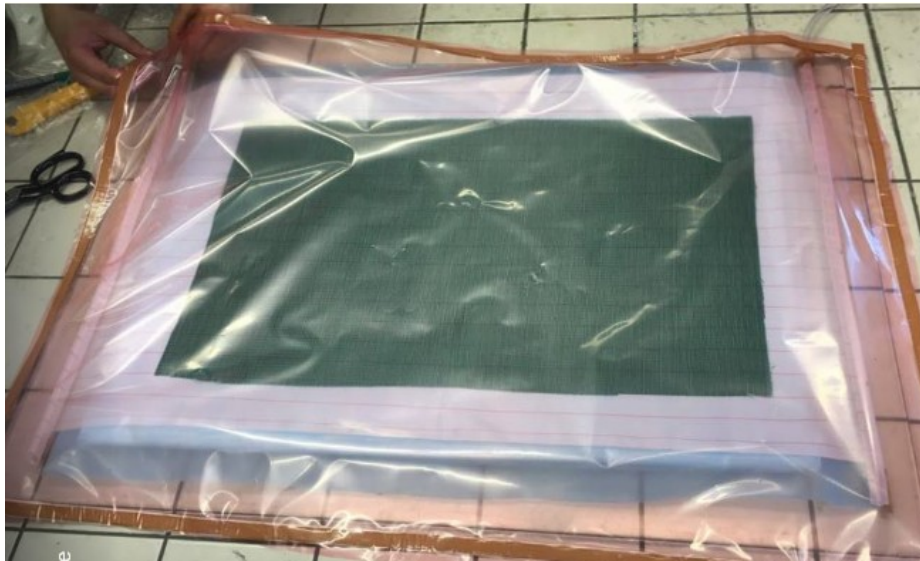
Na skleněnou formu byl nanesen separátor a forma byla vyleštěna, dále byly položeny čtyři vrstvy tkaniny. Vrstvy byly kladeny tak, aby byla vlákna orientována ve stejném směru. Na výztuž bylo umístěno šest samostatných částí bloků žeber prvního typu s výškou 5 mm a byly spojeny do jednoho kusu pomocí zámků (Obr. 44).



Obr. 44 Forma, 4 vrstvy výztuže a zebra

Na samotná žebra byly položeny další dvě vrstvy tkaniny, poté odtrhová folie, odtrhová tkanina, která byla připravena s většími rozměry než keprová tkanina. Rozvodná tkanina byla použita ke snadnějšímu prosycení celého výrobku pryskyřicí. Na levou a pravou stranu byla umístěna rozvodná hadice, která byla zleva napojena přes rezervoár na vývěvu a zprava byla hadice vyvedena do nádoby s pryskyřicí. Po obvodu formy byla nalepena těsnicí páska, na kterou byla z horní části přilepena vakuovací folie, která překrývala celý

system (Obr. 45). Důležitou roli hraje rozměr vakuovací folie, ten je zvolen asi o 30 % větší než jsou ostatní pomocné materiály.



Obr. 45 Pohled na lepení těsnicí pásky k formě

Při utěšňování byla zapnuta vývěva, kdy se z formy odsál vzduch a netěsnosti byly zalepeny těsnicí páskou (Obr. 46). Důkladně utěšněná folie se kontrolovala pomocí manometru, který je připevněn na rezervoáru. Hodnota podtlaku byla naměřena 1 bar.



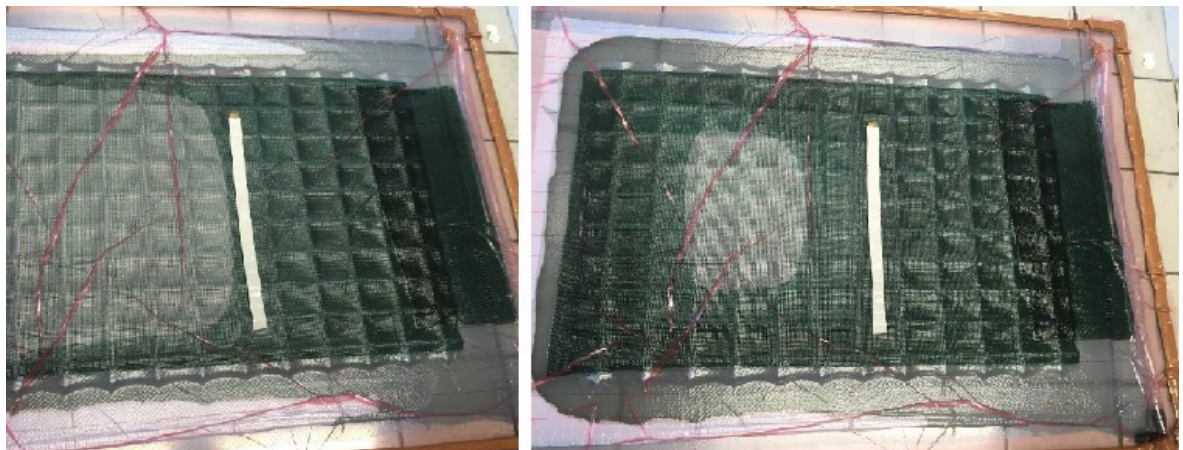
Obr. 46 Pohled na kompletní zavakuovanou formu

Dalším krokem byla příprava pryskyřice s tvrdidlem, důkladné promíchání těchto složek a ponoření přívodní hadice do připravené pryskyřice (Obr. 47). Následně se zapnu-

tím vývěvy vytvořil podtlak, díky kterému došlo k nasávání pryskyřice ze zásobníku do formy.



Obr. 47 Detail nasávání pryskyřice do formy



Obr. 48 Průběh vakuové infuze

Čas potřebný k prosycení byl 23 minut. Prosycený výrobek byl vytvrzen při teplotě 23°C po dobu 24 hodin. Po uplynutí vytvrzovací doby byl odformován.

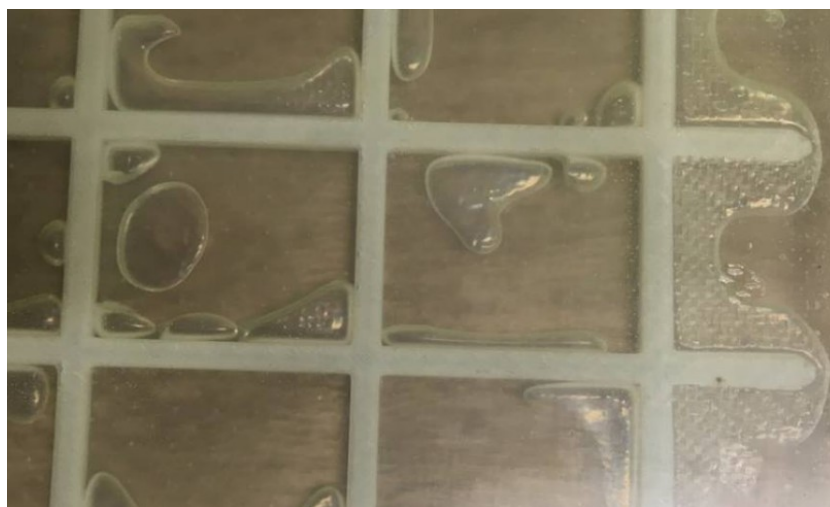
12.2 Vyhodnocení

Při výrobě došlo ke komplikacím v podobě uzavřeného vzduchu ve výrobku. Vzduch byl ručně vytlačován z formy, což pomohlo pouze částečně, nicméně po odformování zůstaly ve velké části výrobku vzduchové kapsy (Obr. 49). To bylo způsobeno velkou výškou žeber a ostrými hranami. Dále také zřejmě díky malé pružnosti tkaniny a pomocných vrstev použitých při vakuové infuzi. Díky problému byly dodatečně vymodelovány a vytisknuty žebra s výškou 2mm aby bylo možné technologii vakuové infuze použít znovu.



Obr. 49 Výsledek po odformování

Po odformování bylo zjištěno, že téměř v každém poli panelu je obsažen uzavřený vzduch (Obr. 50).

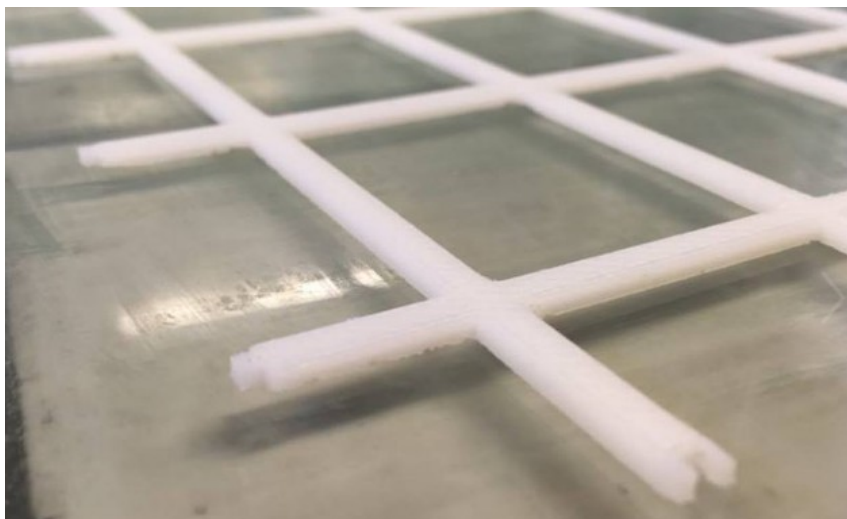


Obr. 50 Detailní pohled vzduchových kapes ve výrobku

Díky nezdařenému pokusu vakuové infuze bylo rozhodnuto, že k dalšímu zpracování stejné, nebo větší výšky žeber bude použita technologie ruční laminace. Dodatečně byly vyrobeny vzorky žeber s výškou 2 mm, (Obr. 51) které již bylo možné zpracovat vakuovou infuzí.

12.3 Postup výroby vzorku s výškou 2 mm

Postup výroby má stejný průběh jako u prvního případu vakuové infuze. Jediný rozdíl je ve vytvoření drážek pro možnou evakuaci vzduchu z prostoru mezi žebry. Díky drážkám je možné aby byl podtlakem vzduch vytěsněn z prostoru panelu. Drážky byly vytvořeny nařezáním žeber ve směru toku pryskyřice.



Obr. 51 Detail použitých žeber

Čas potřebný k prosycení byl cca 14 minut. Prosycený výrobek byl vytvrzen při teplotě 23°C po dobu 24 hodin. Po uplynutí vytvrzovací doby byl odformován.



Obr. 52 Pryskeřící prosycená forma

12.4 Vyhodnocení

Při výrobě nenastala žádná komplikace. Po spuštění vakuové infuze byla tkanina prosycena, (Obr. 52) poté se utěsnil přívod další pryskyřice, aby nedošlo k nechtěnému nasátí vzduchu. Výrobek byl dokonale prosycen a při podtlaku byl vytvrzen.



Obr. 53 Výsledek po odformování

V blízkosti žebra byly v některých polích malé bublinky vzduchu, (Obr. 54) avšak v porovnání s předchozí vakuovou infuzí jsou zanedbatelné.



Obr. 54 Prosycení vzorku s výškou 2 mm vlevo a vzorku s výškou 5 mm vpravo

13 VÝROBA VZORKŮ RUČNÍ LAMINACÍ

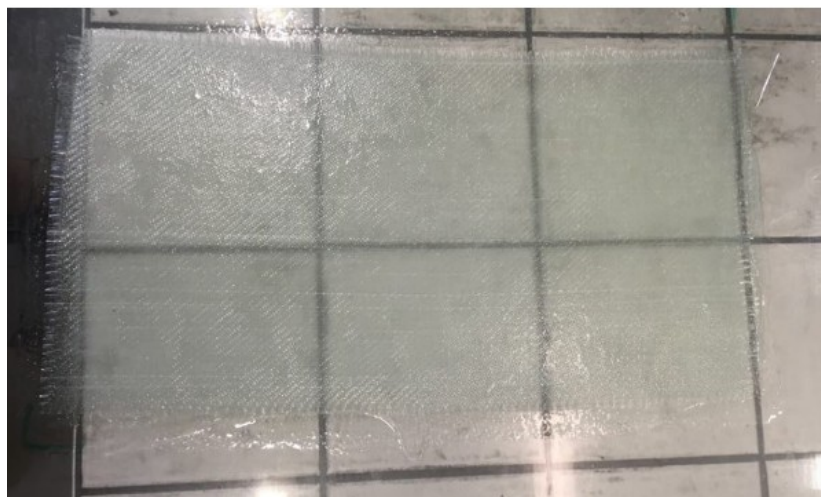
Při zpracování ruční laminací byly vytvořeny dva návrhy, kdy první návrh byl složen se čtyř vrstev tkaniny pod žebry a jednou vrstvou na žebrech. A druhý návrh byl složen pouze ze čtyř vrstev tkaniny, na které byly pouze přitlačeny žebra. Výška žeber byla v obou případech 10 mm.

13.1 Postup výroby prvního návrhu ruční laminace

Na naseparovanou skleněnou formu byla položena jedna vrstva tkaniny. Válečkem byla na tkaninu nanesa pryskyřice. Po nanesení se kovovým válečkem přejíždělo přes tkaninu, to způsobilo dokonalé prosycení tkaniny pryskyřicí. Stejný proces se opakoval celkem třikrát (Obr. 56).



Obr. 55 Kovový váleček k prosycení pryskyřice tkaninou



Obr. 56 Čtyři vrstvy prosycené tkaniny na formě

Na čtyři vrstvy prosycené tkaniny byla položena a přitlačena vytisknutá žebra prvního typu s výškou 10 mm, na které se položila poslední vrstva tkaniny. Válečkem byla nanesa pryskyřice. Bylo nutné horní vrstvu tkaniny přitisknout tak, aby kopírovala co nejvíce celý tvar žebra (Obr. 57). K tomu byly použity svěrky, které zafixovaly počáteční prosycenou tkaninu k žebřům.

Po uplynutí deseti minut byly svěrky odstraněny. Přes výrobek byla položena odtrhová tkanina, rozvodná tkanina a vakuová folie, která byla kolem výrobku přilepena těsnicí páskou. Byla zapnuta vývěva a z celého systému byl odsáván vzduch (Obr. 57).



Obr. 57 Pohled na kompletní zavakuovanou formu

Prosycený výrobek byl vytvrzen při teplotě 23°C po dobu 24 hodin. Po uplynutí vytvrzovací doby byl odformován.

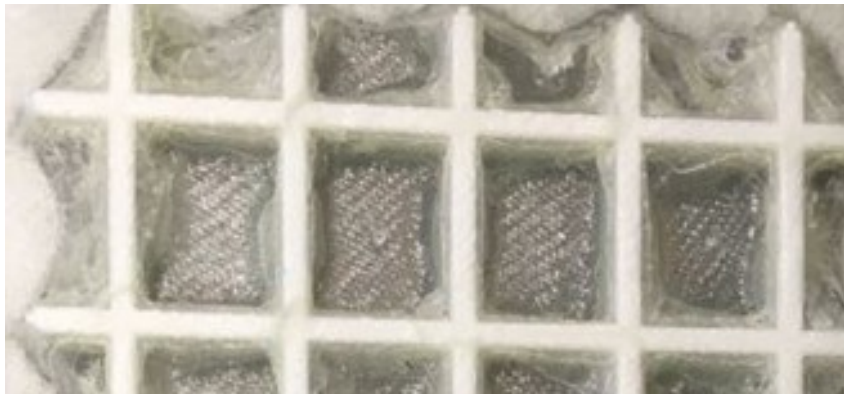
13.2 Postup výroby druhého návrhu ruční laminace

Postup výroby při druhém návrhu je obdobný jako první. Vrstvy tkaniny se postupně vkládaly a prosycovaly. Poté byl na čtyři vrstvy prosycené tkaniny položen vzorek žebér s výškou 10 mm. Ten byl důkladně vtlačen na tkaninu tak, aby se pryskyřice dostala po celém povrchu kontaktní plochy. Následně přes výrobek byla položena odtrhová tkanina, rozvodná tkanina a vakuovací folie, která byla kolem výrobku přilepena těsnicí páskou. Byla zapnuta vývěva a z celého systému byl odsáván vzduch. Prosycený výrobek byl vytvrzen při teplotě 23°C po dobu 24 hodin. Po uplynutí vytvrzovací doby byl odformován.

13.3 Vyhodnocení obou návrhů ruční laminace

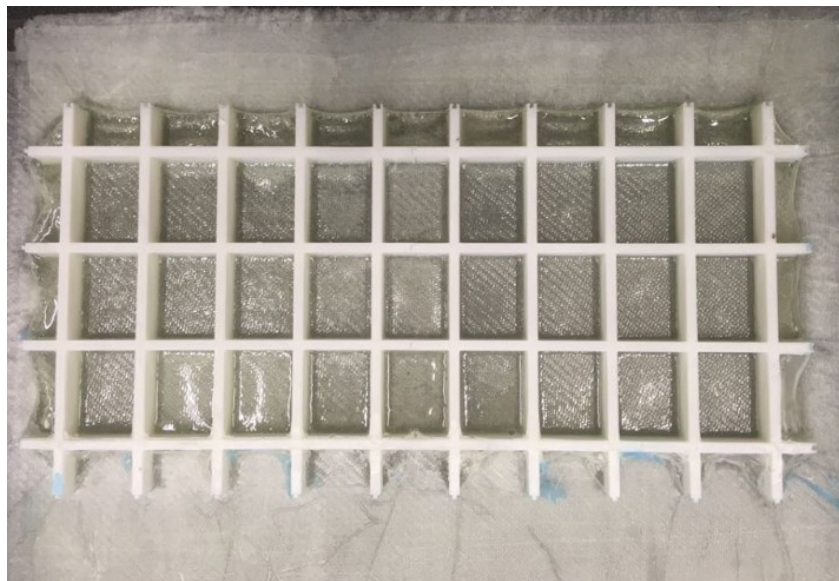
Při prvním návrhu byla jedna vrstva tkaniny přiložena na žebra. Díky použitým svorkám se povedlo částečně zalaminovat celý povrch žebra (Obr. 58). Vypracovaný způsob je kvůli nutnému použití svorek časově náročný a laminace není dokonalá. To je způ-

sobeno velkou výškou žebra, malou pružností tkaniny a vakuovací folie. Některé části vyrobeného vzorku nevyhovují k použití a dalšímu testování a musí být vyřazeny.



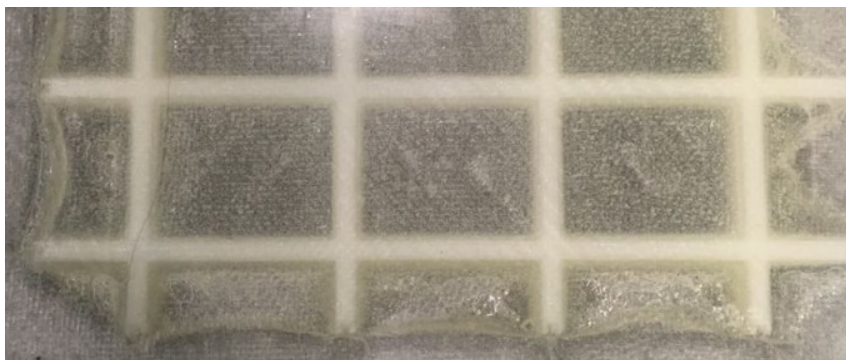
Obr. 58 První návrh ruční laminace po odformování

Druhý návrh bez horní vrstvy tkaniny nebyl náročný na výrobu. Bylo pouze nutné zajistit přitlačení žebra ke tkanině, (Obr. 59) aby pryskyřice prosytla celý povrch styčné plochy mezi tkaninou a vytvořila přechodový rádius ke stěně žebra.



Obr. 59 Druhý návrh ruční laminace po odformování

Po odformování bylo zjištěno že je celá spodní plocha žebek pevně zalaminována ke tkanině. Tako vyrobený vzorek je nejméně náročným způsobem výroby (Obr. 59).



Obr. 60 Detail prosycení druhého návrhu

13.4 Výroba referenčního vzorku

Vzorek byl zpracován ruční laminací (obr. 61). Jde o vzorek, který byl zpracován stejným způsobem, pouze zde nebyly použity žádné žebra. Po odformování zůstane jen deska tvořená šesti výztužnými tkaninami. Připravená deska byla dále nařezána na zkušební tělesa o rozměrech shodných s rozměry těles se žebry a poslouží jako referenční výběrový soubor těles.



Obr. 61 Prosycený referenční vzorek

14 ŘEZÁNÍ VZORKŮ

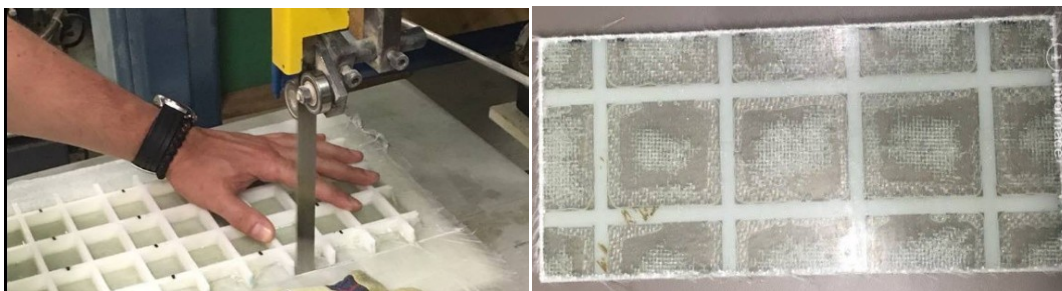
Vyrobené panely byly nařezány na požadované rozměry potřebné k mechanické zkoušce v tříbodovém ohybu. Na povrch panelů byly narýsovány rozměry jednotlivých zkušebních těles. A následné řezání proběhlo na pásové pile (Obr. 62). Rozměry vzorku po nařezání jsou 200 x 80 mm.



Obr. 62 Pásová pila na řezání vzorků

Tab. 7 Technické parametry pásové pily.

Průměr kol	600 mm
Otáčky	750/min.
Výkon motoru	1,75 kW
Hmotnost	200 kg



Obr. 63 Řezání panelů na testovací vzorky

15 POPIS STATISTICKÝCH VELIČIN

Popsané statistické veličiny byly použity k vyhodnocení a popisu experimentálně naměřených dat:

- ◆ \bar{x} - **aritmetický průměr** - vznikne součtem hodnot statistického souboru dělených jejich počtem [61].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- ◆ s^2 - **rozptyl** - je součet kvadratických odchylek od průměru, dělených rozsahem statistického souboru [61].

$$s_x^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

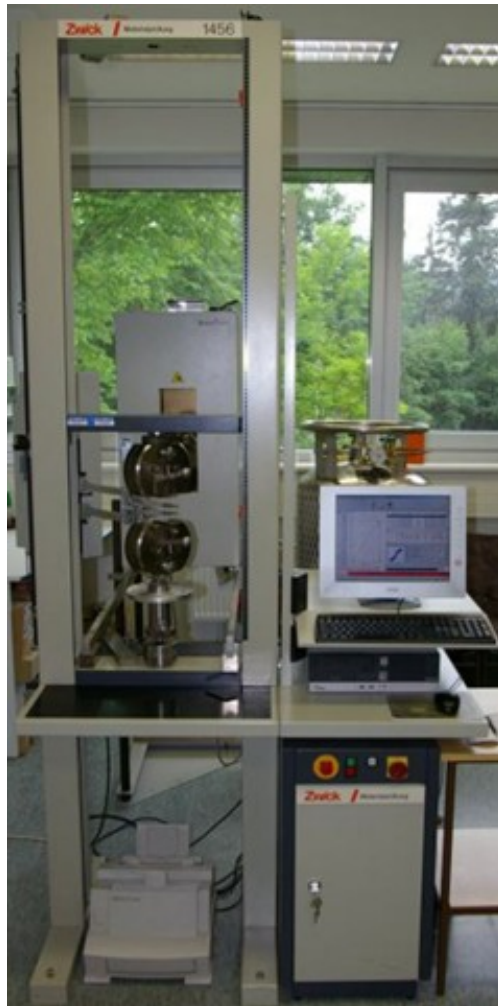
- ◆ s - **směrodatná odchylka** - druhá odmocnina z rozptylu [61].

$$s_x = \sqrt{s_x^2}$$

- ◆ **MIN** - minimální hodnota naměřená ve výběrovém souboru
- ◆ **MAX** - maximální hodnota naměřená ve výběrovém souboru
- ◆ **MED** - Medián - je prostřední hodnota v uspořádaném statistickém souboru a to prostřední v pořadí hodnot uspořádaných podle velikosti, při sudém počtu hodnot je medián průměr dvou prostředních hodnot [61].

16 ZKOUŠKA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Univerzální stroj ZWICK 1456 (obr. 64) je používán k měření mechanických vlastností. Je využíván pro zkoušky tahem, ohybem a tlakem. Je určen k testování různých kompozitních materiálů a polymerů. Stroj je též vybaven temperační komorou, ve které lze provádět zkoušky při snížené nebo zvýšené teplotě než je teplota okolí.



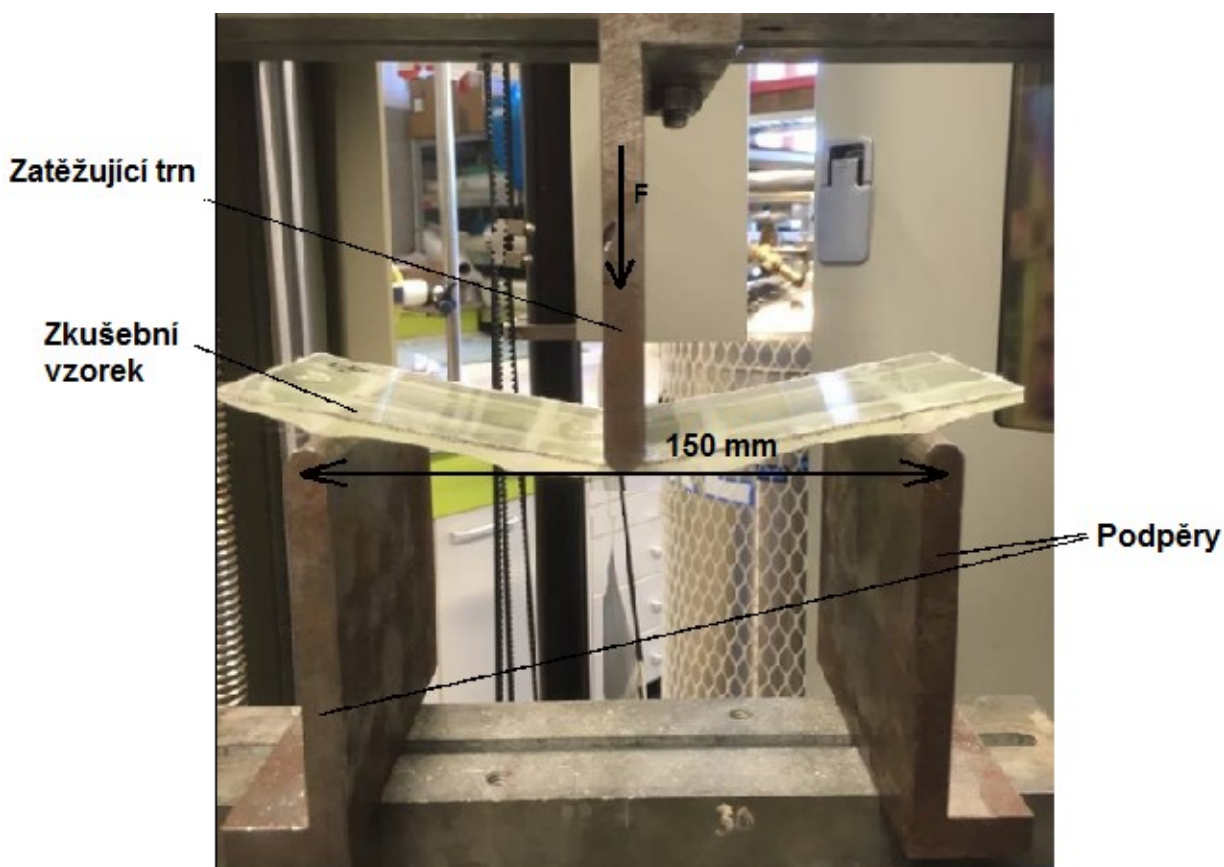
Obr. 64 Univerzální stroj ZWICK 1456 [58]

Tab. 8 Technické údaje stroje.

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

16.1 Stanovení ohybových vlastností

Ohybové vlastnosti jsou stanoveny na stroji ZWICK pomocí tříbodové ohybové zkoušky. Síla F působící uprostřed kolmo k vzorku, kde docházelo k prohnutí a následnému porušení struktury a prasknutí (Obr. 65). Teplota okolí byla 23°C. Zkušební tělesa měla velikost 200 x 80 mm a tloušťka se měnila v závislosti na výšce použitého žebra a počtu použité tkaniny. Vzdálenost podpěr, na kterých byl testovaný vzorek uložen, byla 150 mm. Rychlost příčnicku byla zvolena 5 mm/min.



Obr. 65 Schéma tříbodové ohybové zkoušky

Pro každý druh vytvořené konstrukce bylo testováno 8 vzorků ($n = 8$). Během zkoušky tříbodovým ohybem se zaznamenávaly poruchy testovaného panelu. Byla zjišťována únosnost testovaného vzorku panelu.

Tab. 9 Seřazení testovaných vzorků

Typy testovaných vzorků				
Vzorek č.	Výška žebra [mm]	Druh laminace	Počet vrstev tkani-ny pod žebrovím + počet vrstev nad žebrovím	Průměrná hmotnost vzorku [g]
1	-	Ruční laminace	6	23
2	2	Vakuová infuze	4+2	55,5
3	5	Vakuová infuze	4+2	99
4	10	Ruční laminace	4+1	79
5	10	Ruční laminace	4+0	66
6	15	Ruční laminace	4+0	77

16.1.1 Únosnost vzorku č. 1

U vzorku č. 1 se očekával značný průhyb zkušebního tělesa vzhledem k jeho rozměrům, zejména tloušťce a vzdálenosti podpěr. Absence v podobě žeber způsobila velkou pružnost a nízkou únosnost (Obr. 66). Tento vzorek byl testován referenčním. Docházelo tedy ke značnému průhybu během zatěžování a jeho průměrná únosnost byla 283 N (viz Tab. 10).



Obr. 66 Testování referenčního vzorku

16.1.2 Únosnost vzorku č. 2

Z naměřených dat vyplývá, že průměrná hodnota únosnosti panelu s výztužnými žebry o výšce 2 mm dosáhla velikosti 437 N. Díky výztužení je maximální naměřená hodnota až 469 N (viz Tab. 10) a pružnost panelu je nižší v porovnání s referenčním vzorkem bez výztuhy (Obr. 67). Při zatěžování nejdříve docházelo ke vzniku prasklin na povrchu, následně se objevily známky delaminace a deformace tisknutého žebra. Celková únosnost se zlepšila o 54,4 %.



Obr. 67 Testování vzorku č. 2

16.1.3 Únosnost vzorku č. 3

Hodnoty únosnosti byly u třetího vzorku i přes zdánlivě nekvalitní laminaci až o 514,5 % vyšší než u referenčního vzorku. Maximální únosnost u tohoto vzorku byla naměřena až 1980 N (viz Tab. 10). Výška žebra u tohoto vzorku byla 5 mm a díky vakuové infuzi byla žebra i přes tiskové odlehčení prosycena pryskyřicí. To mělo za následek velkou tuhost vzorku (Obr. 68).



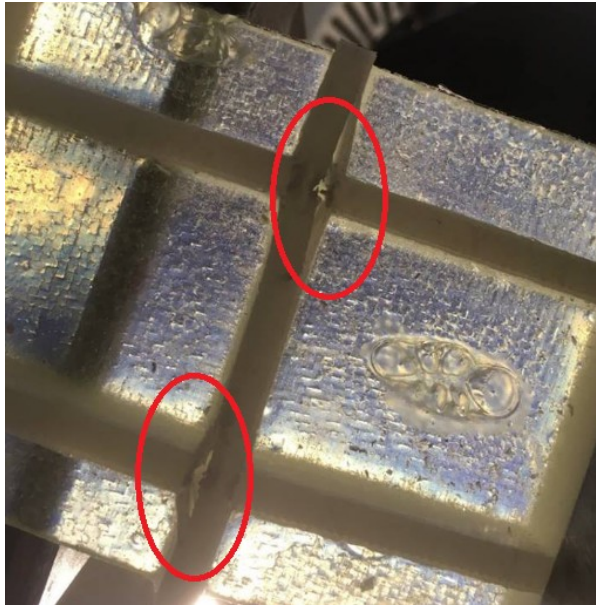
Obr. 68 Vzorek č. 3 po zkoušce tříbodovým ohybem

16.1.4 Únosnost vzorku č. 4

Hodnoty u vzorku vypovídají o zvýšení únosnosti. Díky použité výšce žebra 10 mm je absence jedné horní vrstvy tkaniny irelevantní a únosnost tohoto vzorku je stále větší se srovnáním s referenčním vzorkem. Výška žebra znemožnila dokonalou laminaci, což způsobilo prasknutí odlehčené struktury použité při tisku. Pokud by bylo možné provést kvalitnější laminaci, vedlo by to jistě k vyšší únosnosti celého panelu.

16.1.5 Únosnost vzorku č. 5

U návrhu byla použita pouze čtyřvrstvá tkanina a na kterou bylo přitisknuto žebro s výškou 10 mm. U zkoušky byla očekávána delaminace žebra, avšak tento předpoklad se neprojevil. Při zkoušce k delaminaci nedocházelo. Spoj byl mezi žebry a tkaninou pevný. Únosnost vzorku byla nejnižší ze všech testovaných, včetně referenčního vzorku. A to z důvodu praskání tisknuté struktury žeber (Obr. 69).



Obr. 69 Poškozená struktura žebra

16.1.6 Únosnost vzorku č. 6

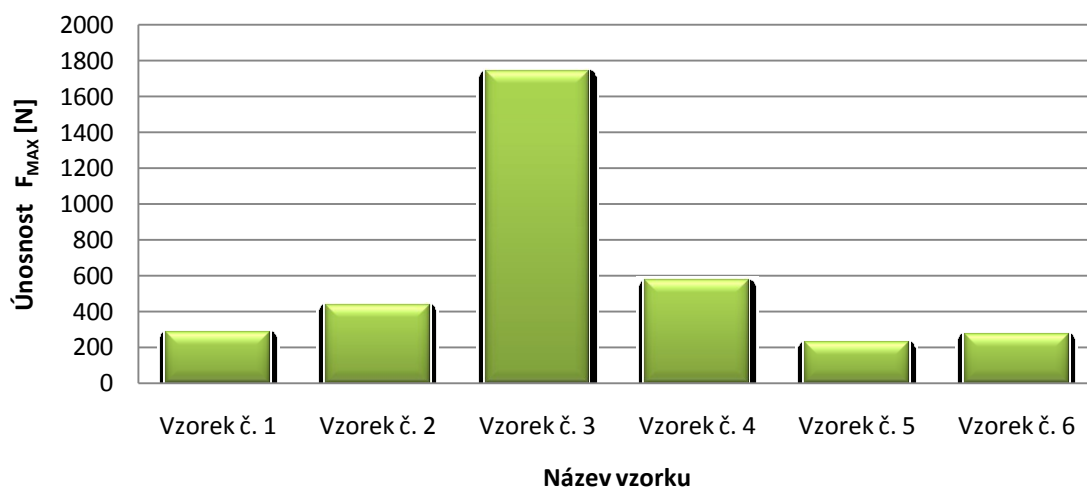
Při testování vzorku č. 6 vznikal obdobný problém praskání struktury žeber jako u vzorku č. 5. Ve spoji mezi žebrem a tkaninou nebyla žádná porucha, spoj byl díky pryskyřici pevný, z toho vyplývá že únosnost byla nízká z důvodu prasknutí tisknuté struktury žeber. Při zatížení se objevilo praskání nejčastěji ve spojích žeber.

17 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Z naměřených dat vyplývá, že hodnota únosnosti stoupá s použitím výztuhy ve formě žeber, které musí splňovat podmínku zalaminování alespoň jednou vrstvou tkaniny přiloženou přes celou plochu žeber (Obr. 70). Dále vyplývá, že čím vyšší žebro bylo v panelu použito, tím je únosnost vyšší. A to i přes nedokonalost při výrobě vzorku vakuovou infuzí.

Úzkou souvislost únosnosti u vzorků s minimálně jednou vrstvou tkaniny přes žebra má i hmotnost. Pryskyřice v těchto panelech je nejtěžší částí použitého materiálu. Čím těžší vzorek, tím má vyšší únosnost.

Grafická interpelace únosnosti panelů v ohybu



Obr. 70 Grafická interpelace únosnosti panelů v ohybu

U panelů č. 4 s výškou žebra 10 mm a u panelu č. 6 s výškou žebra 15 mm byla hmotnost téměř stejná (viz Tab 10). Vzorek č. 4 měl o jednu vrstvu tkaniny více než č. 6. To způsobilo částečné prosycení žeber a tím i zvýšení hmotnosti. Jedna vrstva výztuže přiložená přes žebra zapříčinila, že žebra nemohly v místě odlehčení tiskem praskat. Zajistila soudržnost vzorku a tím pádem měl vzorek č. 4 mnohem vyšší únosnost než č. 6.

Tab. 10 Únosnost testovaných vzorků

Únosnost v ohybu F_{MAX} [N]						
Vzorek č.	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	Zlepšení [%]
1	283	19	314	263	314	-
2	437	19	469	408	437	54,4
3	1739	158	1980	1360	1760	514,5
4	572	73	623	520	613	102,1
5	228	10	235	221	228	-
6	272	42	318	212	271	-



Obr. 71 Prasknutí žebër u vzorku č. 6

U panelů č. 5 a 6 byla únosnost dokonce nižší u referenčního vzorku. To způsobila konstrukce těchto vzorků, kdy se na vrstvy tkaniny pouze přitisklo žebro. Dala se čekat delaminace panelu, nicméně dříve než se objevily známky delaminace tak žebra začaly praskat v místě, kde se při výrobě tisknulo odlehčení (Obr. 71). Jako vhodné se tedy jeví

tisknout žebro bez odlehčení, čímž by bylo zamezena delaminace žebra. Na druhou stranu toto odlehčení zrychluje samotný tisk a přináší úsporu materiálu.

Ukázkový výpočet poměrné ohybové tuhosti u panelu s výškou žebra 5 mm.

($s = 1,5 \text{ mm}$, $b = 5 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$, $t = 50 \text{ mm}$)

Výpočet plochy původního průřezu desky

$$S_1 = s \cdot t = 1,5 \cdot 50 = 75 \text{ mm}^2$$

Výpočet plochy průřezu žebra

$$S_2 = b \cdot h = 5 \cdot 5 = 25 \text{ mm}^2$$

Celková plocha průřezu

$$S = S_1 + S_2 = 75 + 25 = 100 \text{ mm}^2$$

Poloha těžiště plochy S_1

$$y_1 = \frac{s}{2} = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

Poloha těžiště plochy S_2

$$y_2 = s + \frac{h}{2} = 1,5 + \frac{5}{2} = 4 \text{ mm}$$

Výpočet těžiště celkové plochy průřezu

$$y_t = \frac{S_1 \cdot y_1 + S_2 \cdot y_2}{S} = \frac{75 \cdot 0,75 + 25 \cdot 4}{100} = 1,5625 \text{ mm}$$

Posuny těžišť jednotlivých ploch od vypočtené osy celkového těžiště

$$p_1 = |y_t - y_1| = |1,5625 - 0,75| = 0,8125 \text{ mm}$$

$$p_2 = |y_t - y_2| = |1,5625 - 4| = 2,4375 \text{ mm}$$

Kvadratický moment původní plochy nevyztužené desky:

$$J_0 = \frac{t \cdot s^3}{12} = \frac{50 \cdot 1,5^3}{12} = 14,0625 \text{ mm}^4$$

Kvadratický moment plochy S_1

$$J_1 = \frac{t \cdot s^3}{12} + S_1 \cdot p_1^2 = \frac{50 \cdot 1,5^3}{12} + 75 \cdot 0,8125^2 = 63,57 \text{ mm}^4$$

Kvadratický moment plochy S_2

$$J_2 = \frac{b \cdot h^3}{12} + S_2 \cdot p_2^2 = \frac{5 \cdot 5^3}{12} + 25 \cdot 2,4375^2 = 200 \text{ mm}^4$$

Celkový kvadratický moment plochy S

$$J = J_1 + J_2 = 63,57 + 200 = 263,57 \text{ mm}^4$$

Koeficient tuhosti:

$$k_t = \frac{J}{J_0} = \frac{263,57}{14,0625} = 18,8$$

U panelu s výškou 5 mm byla vypočteno $k_t = 18,8 \Rightarrow$ ohybová tuhost panelu se zvýšila o 18,8 krát ve srovnání s rovnou deskou.

Tab. 11 Výsledky ohybové tuhosti

Výška žebra 2 mm	$k_t = 3,2$
Výška žebra 5 mm	$k_t = 18,8$
Výška žebra 10 mm	$k_t = 101,2$
Výška žebra 15 mm	$k_t = 282,5$

Z tabulky č. 11 lze srovnat kolikrát se zvýší ohybová tuhost panelu, jestliže použijeme různé druhy výšky žeber. U panelu s výškou žebra 15 mm se hodnota ohybové tuhosti zvětšila 282,5 krát ve srovnání s deskou bez žebrovaného vyztužení. Z toho vyplývá, že čím vyšší žebro dokážeme zalaminovat, tím má vyšší ohybovou tuhost.

V případě kompozitních panelů vyztužených žebry je potřeba brát v potaz fakt, že ohybová tuhost je ovlivněna řadou faktorů, zejména kvalitou výroby, použitými materiály a celkově jejich soudržnosti.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl výzkum možnosti vyztužení kompozitních panelů polymerními žebry vytisknutými na 3D tiskárně, kladenými mezi skelné výztuže, nebo přilaminovanými na povrch kompozitních panelů. Práce je zaměřena jak na výrobu kompozitů pomocí vakuové infuze pod pružnou folií, tak na ruční laminaci panelů.

Díky 3D tisku je možné tisknout žebra přímo do požadovaného tvaru výrobku. Ten je možné použít přímo na místo určení bez další fáze úpravy, jako je například obrábění. Díky použitému materiálu ABS a volby tisku s odlehčením jsou žebra o 30 % lehčí než žebra s celou výplní, to zajistí úsporu času a materiálu.

Úkolem bylo ověřit možnosti aplikace vytisknutých výztužných žebor s ohledem na jejich průřez, rozložení a výšku. Dále také ověřit samotnou zaformovatelnost a vhodnost pro jednotlivé technologie výroby, používané u kompozitních materiálů.

Praktická část popisuje samotný postup výroby žebor pomocí 3D tisku. Z původních tří návrhů tvaru žebor se přistoupilo pouze na jeden tvar se čtyřmi typy výšek. A to z důvodu časové a hlavně cenové náročnosti projektu. Druhá část praktické části se zabývá zpracování experimentální výroby panelů pomocí vakuové infuze a ruční laminace. Z hlediska výroby je i přes prvotní složitější laminaci díky velké výšce žebromožné experiment považovat za zdařilý. Podařilo se totiž vytvořit pomocí vakuové technologie žebrovaný kompozitní panel.

Připravené panely byly nařezány na zkušební tělesa, kde se dále určovala únosnost takto vyrobeného panelu třibodovou ohybovou zkouškou. Z výsledků zkoušky bylo zpozorováno, že vzorky č. 2, 3 a 4 měly díky použité výztuži zalaminované vně panelu mnohem vyšší únosnost ve srovnání s referenčním vzorkem bez výztuže. Například panel č. 3 s výškou žebra 5 mm měl únosnost vyšší o 514,5 % ve srovnání s referenčním vzorkem a měl průměrnou únosnost 1739 N. Vzorek č. 2 měl průměrnou únosnost 437 N a to je ve srovnání s referenčním vzorkem o 54,4% vyšší. Vzorek č. 4 měl únosnost 572 N, to je ve srovnání o 102,1 % vyšší. Ostatní vzorky č. 5 a 6 nebyly vhodné. Absence tkaniny přes žebra způsobila praskání žebor při ohybové zkoušce, na druhou stranu se ukázalo, že soudržnost žebor přilaminovaných na povrch kompozitního panelu je velmi vysoká.

Z celkových výsledků lze usoudit, že žebra efektivně zlepšují únosnost panelu. Avšak je třeba brát v potaz, že se zvyšující se výškou žebor roste hmotnost panelu a také

náročnost samotné technologie výroby pomocí vakuové infuze. K prosycení celého panelu je nutné zvládat technologii vakuové infuze, neboť je velmi náročná. V technické praxi by bylo bezpochyby dosaženo příznivějších vlastností, jelikož by došlo k výrobě zcela bez chyb a absence neprosycených míst. K prosycení žeber s vyšší výškou by mohla být provedena další studie.

Závěrem lze říct, že cíl diplomové práce byl dosažen. V experimentální části se zdařilo vytisknout žebra na 3D tiskárně, pomocí vakuové infuze pod pružnou folií vytvořit panel s žebrovou výztuhou a určit návrh a typ konstrukce vhodný k výrobě těchto druhů vyztužených panelů. Využití panelů je u nosných konstrukcí, prototypů různých automobilových konstrukcí, vyztužení rámců, letecký průmysl a podobné aplikace, kde je třeba například lokálně vyztuzit kompozitní dílce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HOMOLA, J. Vydavatelství Nová Média, s. r. o., 2014. 3D- tisk.cz [online]. [cit. 2017-10-24]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/>
- [2] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 9. díl: Rapid Prototyping. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, 2008(11). [online]. [cit. 2017.10.24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [3] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. PRUSA RESEARCH S. R. O. *Základy 3D tisku 2014* [online].[cit. 2017.10.24]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/>
- [4] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [5] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 10. díl: Rapid Prototyping. *MM Průmyslové spektrum*. 2008,2008(11).[online]. [cit. 2017.10.24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [6] SEDLÁK, Josef. *Technologie výroby prototypů s podporou reverzního inženýrství a CAD/CAM: Prototyping technology with reverse engineering and CAD/CAM support*. BRNO: vut fsi, 2008. Dizertační práce. VUT, FSI. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [7] Specifikace a druhy jednotlivých technologií tisku [online]. [cit. 2017.10.24]. Dostupné z: www.talmar.masteride.cz/Modul_EP_pf/EP-vyuka10.html
- [8] Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. *Technický týdeník* [online]. Business Media CZ, 2006, roč. 2008. [cit. 2017.10.24]. Dostupné z: <http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/jak-vyrobite-plne-funkcni-kovove-dily-primo-z-3d-cad-da>
- [9] DMLS. INNOMIA A.S. *DMLS* [Online]. 2007 [cit. 2017.10.24]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz/>
- [10] Aditivní technologie. [online]. [cit. 2017.11.07]. Dostupné z: www.custompartner.com/wu/additive-fabrication.

- [11] NAVRÁTIL, Robert. Rapid Prototyping [online]. 2000 [cit. 2017.11.07]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>.
- [12] BARNATT, CH.: 3D Printing: *The Next Industrial Revolution*, United Kingdom: Crea Space Independent Publishing Platform, 2013. ISBN: 9781484181768.
- [13] WINKLESS, Laurie. *Reinforced 3D printing for biomedical applications: Overview And Opportunities*. Materials Today [online]. 2015. [cit. 2017.11.09]. DOI: 10.1002/9781119041337.ch8. Dostupné z: <https://www.meddeviceonline.com/doc/d-printing-in-biomedical-applications-overview-and-opportunities-0001>
- [14] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. A rozš. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [15] Zkouška tahem [online]. [cit. 2017.11.07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/9029/content_obr_1_Zkusebni_zarizeni.jpg
- [16] ČSN EN ISO 521-1. *Plasty- Stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [17] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.* opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [18] Statické zkoušky krátkodobé [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012 [cit: 2017.11.16]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [19] Mechanické vlastnosti polymerů [online]. [cit: 2017.11.16]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [20] Stratasy. *PolyJet Technology* [online]. 2017. [cit: 2017.11.16]. Dostupné z: <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de/html/sgc/eindex.html>
- [21] *Speciální technologie výroby – Aditivní technologie Rapid Prototyping* [online]. [cit: 2017.11.23]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV-04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [22] Medfab. 3D- Printing (3DP) [online]. 2017. [cit: 2017.11.23]. Dostupné z: <http://mfab.de/3d-druck-verfahren/3d-printing-3dp/>
- [23] 3D Systems. Rapid Prototyping [online]. 2015 [cit: 2017.11.23]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/>
- [24] Rychlé prototypování. *Výroba aditiva. 3D tisk* [online]. [cit: 2017.11.27]. Dostupné z: <http://www.macrostieconsulting.com/>

- [25] 3D studio FaVu VUT Brno [online]. [cit:2017.11.27]. Dostupné z: 3dstudio.ffa.vutbr.cz/g-arch_6.php
- [26] Systémy EOS. *Průmysl a trhy - letecký a kosmický průmysl*. [online]. [cit: 2017.11.27]. Dostupné z: www.eos.info/aerospace
- [27] 3D Lab Print - Airplanes [online]. [cit.2017.11.27]. Dostupné z: 3dlabprint.com/shop/spitf-mk-xvi-s3d-cura-ready/
- [28] Vývoj technologie lisování kompozitu pro automobilový průmysl [online]. [2017.11.28]. Dostupné z: docplayer.cz/43503140-Vyvoj-technologie-lisovani-kompozitu-pro-automobilovy-prumysl-bc-tomas-zalek.html
- [29] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scien-tia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [30] PERFORMANCE COMPOSITES Inc. *Vacuum Infusion Process (VIP) Guide* [online]. [cit: 2017.11.28]. Dostupné z: <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/125-resin-vacuum-infusion.html>
- [31] Vakuové infuzní otázky. *Diskuze o materiálech. The Boat Design and Boat Build Site* [online]. [cit: 2017.11.28]. Dostupné z: www.boatdesign.net/threads/vacuum-infusion-question.12246/
- [32] RUSNÁKOVÁ Soňa. *Přednášky z předmětu zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK*; FT UTB. 2012 [cit:2017.11.28].
- [33] Vacmobiles.com. *What is resin infusion (or vacuum infusion)?* [online]. 2012 [cit: 2017.11.28]. Dostupné z: http://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html
- [34] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [35] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů [online]. [cit. 2017.12.14]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [36] KOŘÍNEK, ZDENĚK. *Kompozity: Historie*. [online]. [cit. 2017.12.14]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [37] JANOVEC, J. - CEJP, J. - STEIDL, J. : *Perspektivní materiály*, Praha, Vydavatelství ČVUT, 2001

- [38] KRATOCHVÍL, B.; ŠVORČÍK, V.; VOJTĚCH, D.. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- [39] CHUNG, DEBOAH D. L. *Compositematerials: functionalmaterialsformodern technologies*. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X
- [40] KRUTH, J.-P., LEU, M. C., NAGAKAWA, T., Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, CIRP Annals, 1998, roč. 47, č. 2, s. 525-540..
- [41] FABBSTER [online]. [cit.2017.12.16]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>
- [42] Find your FDM thermoplastic. [online]. [cit.2017.12.18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>
- [43] CANESSA. E., et al, Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development. ICTP – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. 2013. ISBN 92-95003-48-9
- [44] NOVAKOVA–MARCINCINOVA, L., KURIC, I., Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology. Manufacturing. and Industrial Engineering. 2012. roč. 11, č. 1, s. 24-27. ISSN 1338-6549
- [45] Tiskový materiál PLA. [online]. [cit. 2017.12.18]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/pla/>
- [46] The Difference Between ABS and PLA for 3D Printing. [online]. [cit. 2017.12.18]. Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-andpla-for-3d-printing/>
- [47] PLA. [online]. [cit. 2017.12.19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PLA>.
- [48] Printing with clear polycarbonate. [online]. [cit. 2017.12.19]
- [49] Polycarbonate. [online]. [cit.2017.12.19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Polycarbonate>
- [50] 3D tiskové materiály. [online]. [cit.2017.12.19] Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>
- [51] KRATOCHVÍL, T., 3D FDM tiskárna RepRap a parametry tisku. Brno 2015. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Zemčík O. PhD.
- [52] PETG. [online]. [cit. 2017.12.19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PETG>.

- [53] Certifikáty a technické listy materiálů. [online]. [cit.2017.12.19]. Dostupné z: <http://www.filament-pm.cz/>.
- [54] Materiály pro 3D tisk. [online]. [cit.2017.12.19]. Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>.
- [55] Laybrick: a new rough 3D printer filament for a sandstone effect. [online]. [cit. 2017.12.19]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20130527-laybrick-a-new-rough-3d-printer-filament-near-zero-warp.html>.
- [56] ŽMOLÍK, O., Recyklace termoplastů pro potřeby 3D tisku. Brno 2015. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Zemčík O. PhD.
- [57] PŘÍHODA, J. : [online]. 18.5.2008 [cit. 2018.04.25]. Dostupné z: <http://www.designtech.cz/c/support/santiniho-poutni-kostel-virtualne.htm>
- [58] PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ: [online]. [cit. 2018. 04. 25]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40726/zlámal_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [59] RUSNÁKOVÁ. Soňa. Vakuové prosycování: VIP_vacuum infusion process. Zlín, 2011
- [60] Airtech.lu [online]. c2011 [cit. 2018. 04. 25]. Catalogue Airtech. Dostupné z: [www.http://catalogue.airtech.lu/index.php?lang=EN](http://catalogue.airtech.lu/index.php?lang=EN)
- [61] Přírodovědecká fakulta UJEP v Ústí nad Labem [online]. [cit. 2018. 05. 07]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~inastoup/lib/exe/fetch.php?media=statistika1.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	(Akrylonitrilbutadienstyren) - amorfní termoplastický kopolymer, který je odolný vůči mechanickému poškození.
3D	(Trojrozměrný, trojdimenziální).
FDM	(Fused Deposition Modeling) - metoda tavení a postupného nanášení.
STL	Formát vygenerovaný software CAD.
CAD	(Computer Aided Design) - počítačem podporované kreslení.
Rapid prototyping	Rychlá výroba prototypů.
F	Zatěžující síla.
E	Modul pružnosti [MPa].
M	Ohybový moment [N. mm].
σ	Napětí [MPa].
W	Modul průřezu [mm ³].
m	Hmotnost [g].
L	Délka zkušebního vzorku.
H	Výška vzorku [mm].
F _{max}	Maximální síla [N].
s	Výška podkladu [mm].
b	Šířka žebra [mm].
h	Výška žebra [mm].
t	Rozteč žeber [mm].

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 První 3D tiskárna z roku 1984 [23]</i>	13
<i>Obr. 2 a.)Tvar hotové součásti, b.)Tvar softwarových vrstev, c.)Schéma tvorby[1]</i>	14
<i>Obr. 3 Princip SGC technologie [11]</i>	15
<i>Obr. 4 Princip SLA technologie [1]</i>	16
<i>Obr. 5 Princip FMD technologie [7]</i>	18
<i>Obr. 6 Princip DMLS technologie [9]</i>	19
<i>Obr. 7 Princip SLS technologie [2]</i>	20
<i>Obr. 8 Princip LOM technologie [5]</i>	21
<i>Obr. 9 Schéma metody MJM [21]</i>	22
<i>Obr. 10 Schéma metody 3DP [22]</i>	22
<i>Obr. 11 Průmyslové rozdělení AM z roku 2013 [13]</i>	24
<i>Obr. 12 Vlevo příklad hotového dílu, vpravo výsledek rapid prototypingu [24]</i>	25
<i>Obr. 13 Příklad využití 3D tisku v architektuře na modelu [25]</i>	26
<i>Obr. 14 Ukázka funkčního vytištěného 3D modelu letadla [27]</i>	27
<i>Obr. 15 Dělení kompozitů podle uspořádání a tvaru výztuže [38]</i>	34
<i>Obr. 16 Rozdělení dle geometrie výztuže [38]</i>	34
<i>Obr. 17 Dělené vláknové výztuže [39]</i>	35
<i>Obr. 18 Typy tkaní [35]</i>	36
<i>Obr. 19 Schéma procesu vakuové infuze [28]</i>	39
<i>Obr. 20 Vakuová infuze- výroba trupu lodě [31]</i>	40
<i>Obr. 21 Podrobný popis vakuové infuze [33]</i>	41
<i>Obr. 22 Vyztužení stěny jednosměrnými žebry [34]</i>	42
<i>Obr. 23 Tiskárna Dimension SST 768 [58]</i>	47
<i>Obr. 24 Ukázka uložení kazet uvnitř tiskárny</i>	48
<i>Obr. 25 První typ modelu žeber</i>	49
<i>Obr. 26 Ukázka modelů s měnící se výškou žebra 5mm, 10 mm a 15 mm</i>	49
<i>Obr. 27 Druhý typ modelu žeber</i>	50
<i>Obr. 28 Třetí typ modelu žeber</i>	50
<i>Obr. 29 Ukázka změny výšky modelu na 2mm</i>	50
<i>Obr. 30 Detail zámků</i>	51
<i>Obr. 31 Ukázka softwaru Dimension</i>	51
<i>Obr. 32 Ukázka vytištěného žebra včetně podpory</i>	52

<i>Obr. 33</i> Separáčnı́ vosk	53
<i>Obr. 35</i> Vakuov vývěva- Value [60]	54
<i>Obr. 36</i> Rezervoár -Airtech [60]	54
<i>Obr. 37</i> Dva typy rozvodnch hadic [60]	55
<i>Obr. 38</i> Tsnicı́ páska [60]	55
<i>Obr. 39</i> Ukázka pouzıtı́ odtrhov fólie	55
<i>Obr. 40</i> Odtrhov tkanina [60]	56
<i>Obr. 41</i> Rozvodn sıt' Green Flow [60]	56
<i>Obr. 42</i> Vakuovacı́ folie [60]	57
<i>Obr. 43</i> Pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidlo CH80-2	57
<i>Obr. 34</i> Pouzıt tkanina	58
<i>Obr. 44</i> Forma, 4 vrstvy výztuže a zebra	59
<i>Obr. 45</i> Pohled na lepenı́ tsnicı́ pásky k formě	60
<i>Obr. 46</i> Pohled na kompletnı́ zavakuovanou formu	60
<i>Obr. 47</i> Detail nasávání pryskyřice do formy	61
<i>Obr. 48</i> Průběh vakuov infuze	61
<i>Obr. 49</i> Výsledek po odformovnı́	62
<i>Obr. 50</i> Detailnı́ pohled vzduchových kapes ve výrobu	62
<i>Obr. 51</i> Detail pouzıtch žeber	63
<i>Obr. 52</i> Pryskyřicı́ prosycen forma	64
<i>Obr. 53</i> Výsledek po odformovnı́	64
<i>Obr. 54</i> Prosycenı́ vzorku s výškou 2 mm vlevo a vzorku s výškou 5 mm vpravo	65
<i>Obr. 55</i> Kovov váleček k prosycenı́ pryskyřice tkaninou	66
<i>Obr. 56</i> tyřı́ vrstvy prosycen tkaniny na formě	66
<i>Obr. 57</i> Pohled na kompletnı́ zavakuovanou formu	67
<i>Obr. 58</i> Prvnı́ návrh runı́ laminace po odformovnı́	68
<i>Obr. 59</i> Druh návrh runı́ laminace po odformovnı́	68
<i>Obr. 60</i> Detail prosycenı́ druhého návrhu	69
<i>Obr. 61</i> Prosycen referennı́ vzorek	69
<i>Obr. 62</i> Pasov pila na řeznı́ vzorků	70
<i>Obr. 63</i> Řeznı́ panelů na testovacı́ vzorky	70
<i>Obr. 64</i> Univerzlnı́ stroj ZWICK 1456 [58]	72
<i>Obr. 65</i> Schéma třı́bodov ohybov zkoušky	73

<i>Obr. 66 Testování referenčního vzorku</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 67 Testování vzorku č. 2</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 68 Vzorek č. 3 po zkoušce třibodovým ohybem</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 69 Poškozená struktura žebra</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 70 Grafická interpelace únosnosti panelů v ohybu</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 71 Prasknutí žeber u vzorku č. 6</i>	<i>79</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Srovnání jednotlivých výrobních metod z hlediska výhod a nevýhod [5,20,21]</i>	23
<i>Tab. 2 Vlastnosti základních materiálů pro FDM tisk [42, 51, 53, 56]</i>	31
<i>Tab. 3 Technické informace k 3D tiskárně STRATASYS DIMENSION SST</i>	48
<i>Tab. 4 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidla Biresin CH80-2. [Příloha I]</i>	58
<i>Tab. 5 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidla Biresin CH80-1. [Příloha I]</i>	58
<i>Tab. 6 Technické parametry použité tkaniny</i>	58
<i>Tab. 7 Technické parametry pásové pily.</i>	70
<i>Tab. 8 Technické údaje stroje.</i>	72
<i>Tab. 9 Seřazení testovaných vzorků</i>	74
<i>Tab. 10 Únosnost testovaných vzorků</i>	79
<i>Tab. 11 Výsledky ohybové tuhosti</i>	81

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI Pyskyřice Biresin CR80

PŘÍLOHA P I: PRYSKYŘICE BIRE SIN CR80

Product Data Sheet
Version 07 / 2010

Biresin® CR80 Composite resin system

Areas of Application

- For infusion and injection processing
- Specially for applications when curing temperatures of $\geq 75^\circ\text{C}$ can not be implemented
- The hardeners **Biresin® CH80-1** und **CH80-2** can be applied for the manufacture of smaller parts in hand lay-up processing too

Product Benefits

- Approved by Germanischer Lloyd for the production of components
- One resin with four hardeners with different reactivity
- Uniform mixing ratio of 100 : 30
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Because of low mixed viscosity fast infiltration of dry fabrics and nonwovens
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions

Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin **Biresin® CR80**, epoxy resin, translucent, unfilled
- Hardener **Biresin® CH80-1**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-2**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-6**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-10**, amine, colourless to yellowish

Physical Data	Resin		Hardener			
	Biresin® CR80	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10	
Individual Components						
Viscosity, 25°C	mPas	900	50	45	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.13	1.00	0.99	0.95	0.95
Mixing ratio	in parts by weight	100	30			
		Mixture				
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min		45	80	190	330
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPas		400	350	230	210

Processing

- The material and processing temperatures should be $18 - 35^\circ\text{C}$.
- With the hardeners **Biresin® CH80-1** and **Biresin® CH80-2** demoulding after room temperature curing is possible.
- With the hardeners **Biresin® CH80-6** and **Biresin® CH80-10** curing at 45°C before demoulding is required dependent on components.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional informations are available in "Processing Instructions for Composite Resins".

