

Soudržnost materiálů vzniklých aditivními technologemi s komerčními typy pryskyřic

Jakub Zatloukal

Bakalářská práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Zatloukal**
Osobní číslo: **T16921**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Soudržnost materiálů vzniklých aditivními technologiemi s komerčními typy pryskyřic**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice 3D tisku a polymerních pryskyřicích u dlouhvláknových kompozitů:
2. 3D tisk – definice a rozdělení technologií
3. Komerční typy plastů pro 3D tisk
4. Dlouhvláknové kompozity – definice, výroba
5. Materiálové typy pryskyřic
6. Experimentální část:
7. 3D tisk zkušebních těles z vybraných materiálů
8. Tvorba zkušebních těles s použitím pryskyřic – laminace
9. Experimentální stanovení soudržnosti
10. Vyhodnocení naměřených dat

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: Nakladatelství SCIENTIA, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6**
2. **GEBHARDT, A., HOTTER, J.-S., Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing, Cincinnati, Ohio: Hanser, 2016, ISBN 978-1-56990-582-1**
3. **CAMPBELL, F., Structural Composite Materials, Ohio, ASM International, 2010, ISBN 978-161-5031-405**
4. **BARNATT, CH.: 3D Printing: The Next Industrial Revolution, United Kingdom: Crea Space Independent Publishing Platform, 2013. ISBN: 9781484181768**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Robert Moučka, Ph.D.**

Externí

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 19. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu 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 24.5.2019

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá aditivní výrobou, respektive soudržností těchto vytisknutých materiálů a kompozitů. Kompozitní výrobky jsou vyrobeny ruční laminací pod vakuovou folií. V teoretické části je popsán problematika kompozitních materiálů jejich vlastnosti, složení a výrobní technologie. Dále jsou popsány jednotlivé druhy aditivní technologií a materiály. Praktická část dokumentuje výrobu tělísek z vybraných materiálů aditivní technologií, jejich laminaci pomocí ruční technologie s pomocí účinku vakua a následné testování odlupem a chování spoje při tříbodovém ohybu.

Klíčová slova: kompozitní materiály, aditivní výroba, 3D tisk, soudržnost, odlup

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with additive manufacturing, with adhesion between 3D printed plastic and composites respectively. Composite parts are prepared by hand lay-up under vacuum foil. The theoretical part describes issues of composite materials, their properties, composition and production technologies. Furthermore, types of additive technologies and materials are also described. The practical part documents the production of sample bodies from selected materials by additive technology, their lamination using hand lay-up together with the effect of vacuum and subsequent testing of adhesion by peeling and joint behaviour in three-point bending.

Keywords: composite materials, additive manufacturing, 3D print, adhesion, peel test

Děkuji svému vedoucímu Ing. Robert Moučka, Ph.D. za jeho ochotu, cenné informace a čas, který mi věnoval při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Janu Strnadovi za tisk zkušebních tělísek na 3D tiskárně i Ing. Ladislavu Fojtlovi, Ph.D. za jeho trpělivost a veškerou odbornou diskuzi k danému tématu. V poslední řadě chci poděkovat rodině a přítelkyni za jejich podporu.

Motto:

„Následuj ty, kteří hledají pravdu, ale utkej od těch, kteří ji našli.“

Charles Spencer Chaplin

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 VLÁKNA	13
1.1.1 Skleněná vlákna	14
1.1.2 Aramidová vlákna	16
1.1.3 Uhlíková vlákna	17
1.1.4 Přírodní vlákna	17
1.2 MATRICE	17
1.2.1 Reaktivní pryskyřice	18
1.3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	22
1.3.1 Výroba prepregů	22
1.3.2 Ruční laminace	23
1.3.3 Metoda vakuové folie	24
1.4 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY	25
1.4.1 Lamináty	25
2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	26
2.1 ČÁSTI FDM TISKÁRNY	27
2.1.1 Rám	28
2.1.2 Tisková deska	28
2.1.3 Extrudér	29
2.1.4 Vlákno	30
2.2 TISKÁRNY SLA	31
2.2.1 Základní proces tisku	32
2.2.2 Údržba pryskyřice	32
2.2.3 Typy pryskyřice	33
2.2.4 Typy SLA tiskáren	33
2.3 KOMERČNÍ TYPY PLASTŮ PRO 3D TISK	36
3 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	39
5 POUŽITÉ MATERIÁLY	40
5.1 MATERIÁLY TVOŘÍCÍ KOMPOZIT	40
5.1.1 Skelná tkanina s keprovou vazbou	40
5.1.2 Epoxidová pryskyřice L285 (MGS)	40
5.1.3 Polyesterová pryskyřice	41
5.2 POLYMERNÍ MATERIÁLY PRO 3D TISK	41
5.2.1 Nylon FX256	41
5.2.2 ASA ExtraFill	42
5.2.3 CPE HG 100	42

6	3D TISK ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	43
7	VÝROBA KOMPOZITŮ A LAMINACE VYTISKNUTÝCH TĚLES.....	44
7.1	VÝROBNÍ NÁSTROJE A POMOCNÉ MATERIÁLY	44
7.2	POSTUP VÝROBY	45
7.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	48
8	MECHANICKÉ ZKOUŠKY SOUDRŽNOSTI	50
8.1	TEST ODLUPU	51
8.2	ZKOUŠKA SOUDRŽNOSTI V TŘÍBODOVÉM OHYBU	52
9	VÝSLEDKY A DISKUZE	54
9.1	TEST ODLUPU PRO EPOXIDOVOU PRYSKYŘICI.....	54
9.2	TEST ODLUPU PRO POLYESTEROVOU PRYSKYŘICI.....	56
9.3	TŘÍBODOVÁ ZKOUŠKA OHYBEM	58
10	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	63
	SEZNAM TABULEK	65
	SEZNAM PŘÍLOH	66

ÚVOD

V dnešní době se k aditivním technologiím (3D tisku) dostává velká míra pozornosti. Dá se předpokládat, že největší technický rozmach v oblasti 3D tisku teprve lidstvo čeká. Právě využití 3D tisku ještě nenastalo, protože téměř každý výrobek, který můžeme vytisknout na 3D tiskárně se dá vyrobit jinými způsoby, které jsou efektivnější, produktivnější a hlavně méně finančně náročné. Budoucnost aditivních technologií je nevyhnutelná, například ve zdravotnictví má tato technologie velký význam. Už nyní se tisknou kloubní náhrady či kostní implantáty na míru jedince. V jistém rozmachu je i další aplikace v podobě tisknutí lidských tkání. Postupný vývoj technologií je spojen s rozvojem nových, syntetických materiálů. Při výrobě je kladen důraz na odolnost, pevnost a estetické vlastnosti těchto materiálů. Tyto materiály se vyznačují také důležitými mechanickými vlastnostmi a měly by mít předem určeny znaky podle použití.

Tato bakalářská práce se zabývá soudržností vybraných materiálů připravených 3D tiskem spolu s komerčními pryskyřicemi. Testované vzorky jsou vzniklé aditivní výrobou a pomocí ruční laminace spojené s kompozitním panelem. Pro zajištění kvalitního spoje byla ruční laminace podpořena účinkem vakua a vzorky stlačeny pod vakuovou fólií. Vzniklé zkušební vzorky jsou testovány zkouškou odlupu a zkouškou tříbodového ohybu a je posuzována zejména soudržnost.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál je termín označující heterogenní materiál sestavený s nejméně ze dvou různých materiálových složek. Vlastnosti každé složky zvlášť jsou bezvýznamné s porovnáním výsledného kompozitního výrobku. Takovýto efekt nazýváme synergický účinek. Synergický účinek je možné si představit ve formě nelogického matematického vztahu: $1 + 1 = 3$. Pojmem synergické materiály je vhodné označení pro kompozitní výrobky. Machek (2008, s. 35) uvádí že: „Synergické působení pevných a tuhých vláken s poddajnou nebo křehkou kovovou, polymerní nebo keramickou maticí umožňuje konstruovat kompozity s vysokou pevností, tuhostí a houževnatostí, jejichž vlastnosti přesahují vše, co bylo kdy dosaženo u tradičních monolitních materiálů.“ Existence kompozitních výrobků je další technický pokrok v jakýchkoliv oborech, avšak největší uplatnění najdeme v automobilovém, leteckém či kosmickém průmyslu. Základním stavebním kamenem pro kompozity je matrice, v ní je umístěna výztuž, která zapříčiní klíčové mechanické nebo fyzikální parametry kompozitu. [8]

V současné době se na trhu objevuje široká škála kompozitních materiálů, které se liší pojivem (pryskyřicí), typem a charakterem výztuží (typ vláken, tkaniny rohože, rouna) a také způsobem výroby (laminace, tažení, navíjení, odstředivé lití, atd.). Kompozitní materiály můžeme rozlišit podle strukturních kritérií. Dle dělení podle typu matic klasifikujeme dva základní typy polymerních pryskyřic:

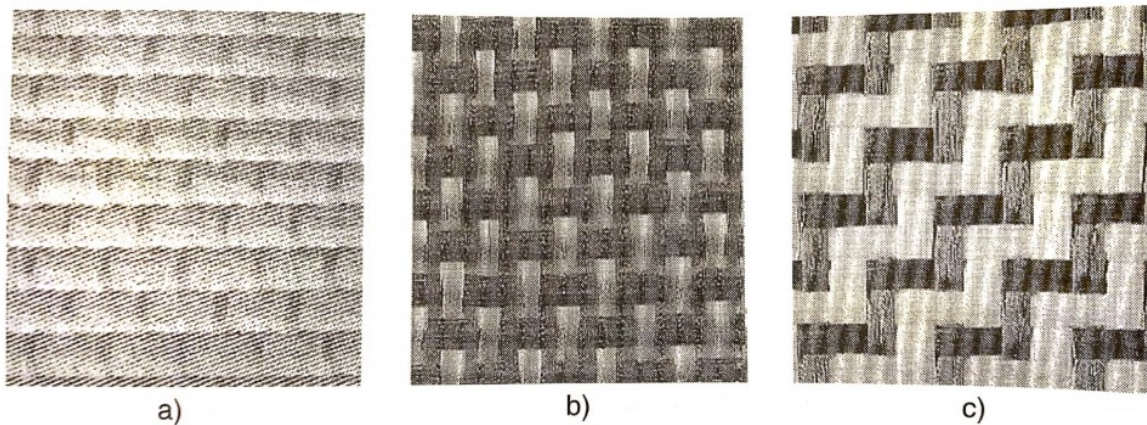
- Termoplasty – jsou to tuhé látky, které při zvýšení teploty nad hodnotu typickou pro daný polymer získávají těkavé vlastnosti, naopak při ochlazení pod teplotu skelného přechodu (T_g) se mění v tuhou látku. Příkladem mohou být polystyren (PS), polypropylen (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET) a další. [9]
- Termosety – zde můžeme zařadit epoxidy, nenasycené polyestery, melaminy či fenol formaldehydové pryskyřice. Mají vzhled viskózních tekutin a konzistenci podobnou řídkému medu. Jsou tvořeny malými molekulami, které jsou vytvrzovány chemickou reakcí. [9]

1.1 Vlákná

Vyztužující vlákno má za úkol přenášet vysokou měrnou pevnost nebo tuhost kompozitního výrobku. Ovlivňuje především mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Vyšší účinnost mají dlouhá vlákna, která můžeme najít u laminátu. Menší účinnost mají krátká (nespojité) vlákna, ty najdeme u tvářených nebo vstříkovaných materiálů. [2]

Výztuže ve formě tkaniny mohou mít různou skladbu vláken v osnově a útku. Vybrané skladby ukazuje obrázek 1. Jednosměrná tkanina obsahuje tenká vlákna v útku, která jsou určena k fixaci vláken v osnově. Tkanina vykazuje vysokou pevnost a tuhost při jednosměrném namáhání. Laminát může mít více vláken v osnově, ale podmínkou je, že musí mít stejný podíl pojiva. U osnovy směsné tkaniny jsou použity různé druhy vláken. Například kombinace uhlíkových vláken se skleněnou přízí (podmínka je, že ve směru skleněné přízi není požadována vysoká tuhost). V hybridní tkanině kombinujeme vlastnosti vybraných materiálů. Vysoká tuhost z uhlíkových vláken se může zkombinovat s aramidovým vláknem, které má výbornou rázovou houževnatost. [18]

Pro vláknové kompozity je charakteristická vysoká pevnost či vysoký modul pružnosti. Tyto vlastnosti nám ovlivňují vlákna ve formě výztuže. Princip vláknového kompozitu spočívá v tom, že matrice, která vykazuje nižší modul pružnosti, se začne při okolním zatížení pružně případně plasticky deformovat a vlákna toto zatížení přenáší vlivem adheze. Matrice se musí deformovat bez porušení. Nejlepší účinek matrice se získá v momentu, když jsou vlákna zatížena až do meze pevnosti napětím přeneseným matricí. V kompozitu každá složka zužitkuje svoje přednosti. Vlákná přenášejí zatížení, zatím co matrice je chrání proti účinkům okolního prostředí. Nepříznivé vlastnosti jedné složky jsou překryty přednostmi složky druhé. Vláknové kompozity se produkují nejčastěji s plastovou matricí, ta je buď termoplastová nebo reaktoplastová. [8]



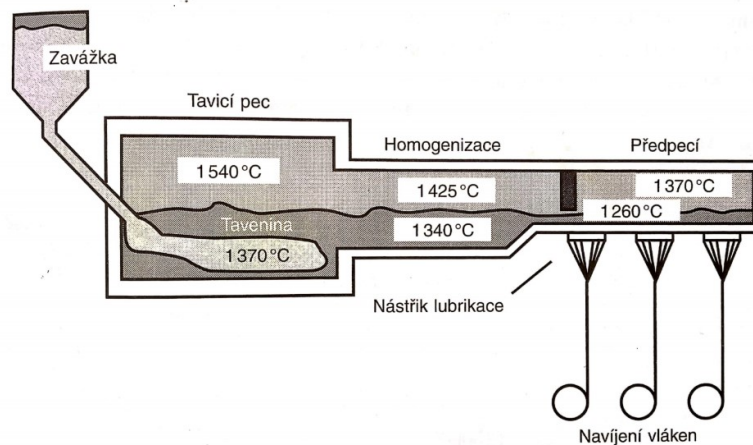
Obrázek 1. Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku [3]

(a) jednosměrná výstužná tkanina, b) směsná tkanina, c) hybridní tkanina)

1.1.1 Skleněná vlákna

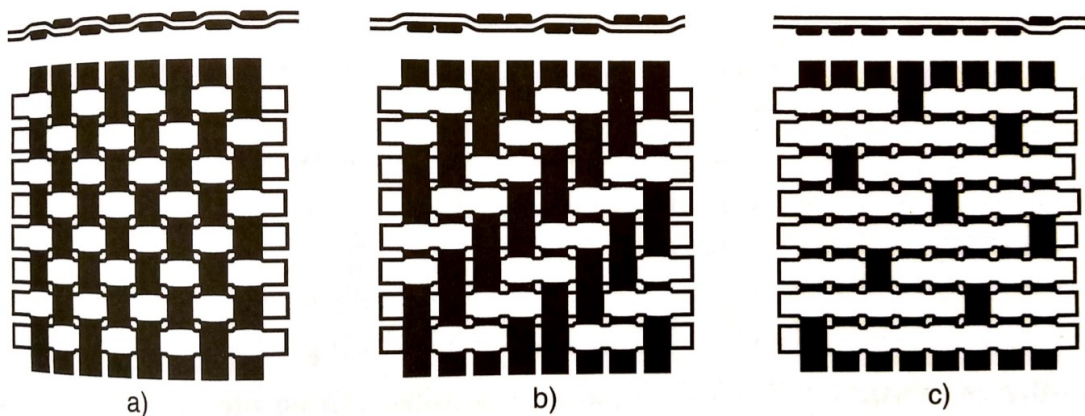
Textilní skleněná vlákna je termín určující tenká sklovitá vlákna o průměru 3,5 až 24 μm .

Tyto vlákna jsou vyráběny tak, že jsou taženy z roztavené skloviny a používají se v textilním průmyslu. E-vlákna jsou vyrobeny z bezalkalické skloviny, která slouží jako výborný izolant s vysokou prostupností pro záření. Tento druh skleněného vlákna má nejčastější zastoupení na trhu. Skleněná vlákna vznikají tažením z trysek. Ve sklářské peci za vysoké teploty (asi 1400°C) se roztaví křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kyselina boritá a kazivec. Několik dní se čirí. Poté se dostává v tekutém stavu do trysek, které jsou vyrobeny z platinové slitiny. Sklovina vytéká a tuhne do tvaru vláken. Vlákna po opuštění trysky mají průměr cca 2mm. Dále se vlákna zpracovávají na velmi rychle rotujícím zařízení na požadovaný průměr. [9] [2] Princip výroby je zobrazen na obrázku níže (obrázek 2).



Obrázek 2. Výroba skleněného vlákna tažením z trysek [2]

Skelná vlákna se u kompozitních materiálů používají nejčastěji ve formě jednosměrné výtže nebo tkanin. Obrázek 3 ukazuje klasické typy vazeb.



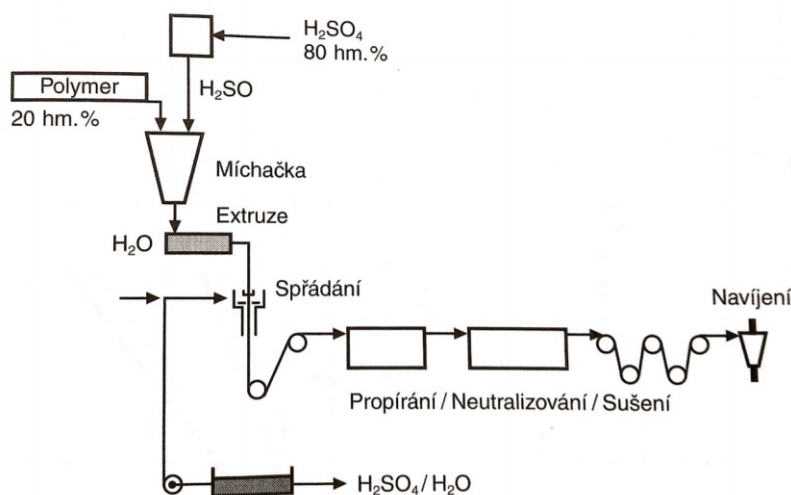
Obrázek 3. Dělení vazeb vyztužujících tkanin [3]

(a) plátňová vazba, (b) keprová vazba, (c) atlasová (saténová) vazba

Plátňová vazba je jednoduchá základní vazba. Zpracování tkaniny je jednoduché vzhledem k rozměrové stálosti. Plátňová vazba má malý ořep při řezání. Keprová vazba vykazuje vyšší pevnost a tuhost laminátu, díky menšímu zvlnění vláken. Tkanina je vhodná pro tvarové výrobky kvůli lepší ohebnosti jak u plátňové vazby. Atlasová vazba má výbornou řasitelnost, proto se hodí pro prostorově složitější prvky. Vyžaduje menší vychýlení jak vazba keprová. Atlasové tkaniny umožňují dosáhnout vysokou jakost povrchu. [9]

1.1.2 Aramidová vlákna

Jsou vlákna s vysokou pevností a tuhostí. Dají se přirovnat k lineárním organickým polymerům, jejich kovalentní vazby jsou směřovány podle osy vlákna. Molekuly aramidového vlákna jsou spojeny vazbami vodíkových můstků. Výroba polyfenylentereftalamidových vláken pomocí taveniny je neuskutečnitelná, protože teplota tavení je vyšší jak teplota tepelného rozkladu. Spřádá se z viskózního roztoku v koncentrované kyselině sírové (H_2SO_4). Vlákna se jednotlivě připojují. Pro zlepšení zpracovatelnosti se častokrát propírají a opatřují pomocným textilem (prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností). Tyto vlákna mohou být zpracovány všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Ukázka výroby aramidových vláken je vyobrazena na schématu níže (Obrázek 4) [2]



Obrázek 4. Výroba aramidových vláken [2]

Aramidová vlákna se vyrábí v několika typech, liší se modulem pružnosti v tahu a také v tažnosti. Typ, který vykazuje nízký E-modul a vyšší protažení je schopen zahrnout do sebe vyšší deformační práci jako typ s vysokým E-modulem a nižší tažností. Aramidové vlákno je organické vlákno, které není schopné odolávat vysokým teplotám. V kompozitním výrobku odolávají teplotě okolo 300°C , neroztaví se však, a proto se hodí pro protipožární obleky. Jejich teplota skelného přechodu (T_g) je rovna 300°C a teplota tepelného rozkladu (T_z) je rovna 480°C . Aramidová vlákna jsou hydrofilní, mají schopnost navazovat vodu až do 7% svého obsahu. Absorbovaná vlhkost ovlivňuje pevnost mezi vláknem a matricí. [16]

1.1.3 Uhlíková vlákna

Tyto vlákna se řadí mezi technická. Mezi jejich přednosti patří vysoká tuhost a pevnost, avšak vykazují nízkou tažnost.

Uhlíkové vlákno se vyrábí ze tří materiálů:

- Celulóza – používá se jako izolace, protože dokáže odolávat vysokým teplotám. Vyrobené vlákno má horší strukturu stavby.
- Polyakrylonitril (PAN) – vyrobené vlákna se označují jako standartní.
- Smola – vlákna vyrobené z tohoto materiálu vykazují vysokou hodnotu E-modulu a taky velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami jsou řidší, a proto mají nižší pevnost v tlaku. [2]

Uhlíková vlákna tvoří minimálně 90% uhlík, 7% dusík a zbylé procenta jsou zastoupeny v kyslíku, či vodíku. Průměr těchto vláken je 5 až 10 μm . [9]

1.1.4 Přírodní vlákna

Aby přírodní vlákna mohly fungovat jako výztuž, jejich základem musí být celulóza. Zástupci této skupiny jsou len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Značná výhoda těchto vláken je jejich odolnost proti stárnutí a nezávadnost při měnících se kinematických podmínkách. Za zmínku stojí i pevnost v tahu. Jejich nízká měrná hmotnost je vhodná pro lehké konstrukce. Mezi nevýhody patří závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu, omezená délka vláken, citlivost na vliv vlhkosti nebo také drahá úprava pro zlepšení vazby s matricí. [2]

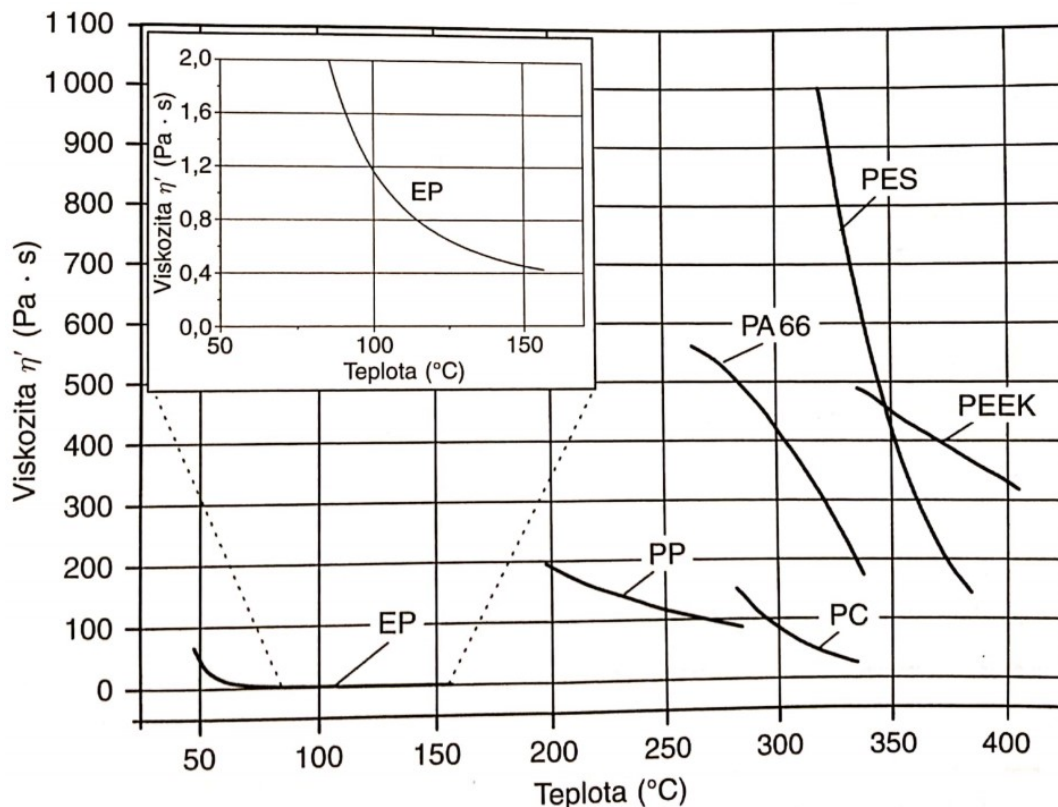
1.2 Matrice

Matrice nebo také pojivo je materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponentů tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklý kus označujeme jako kompozit.

Hlavní úlohy matrice jsou:

- Přenos zatížení na vlákno a také z vlákna na další vlákno
- Zaručení geometrické i tvarové stálosti
- Ochrana vláken [15]

Matrice musí disponovat vhodnou viskozitou a povrchovým napětím. Matrice polymerních kompozitů můžeme rozdělit na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. Dříve se pro kompozity využívali pouze jediné nenasyčené polyesterové (UP-R) či také epoxidové (EP-R) pryskyřice. Tyto reaktivní pryskyřice nyní produkují většinu kompozitních celků. Výhodou reaktivních pryskyřic je jejich viskozita tekutá fáze za pokojové teploty. Viskozita termoplastů je výrazně vyšší než u termosetů (Obrázek 5). [7]



Obrázek 5. Viskozita termoplastů a termosetů závislé na teplotě [2]

1.2.1 Reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice patří do skupiny termosetů. Tyto pryskyřice se vytvrzují samostatně nebo díky jiných složek, jakými jsou tvrdidla (iniciátory), katalyzátory, urychlovače nebo aldehydy (fenoly). Vytvrzovací procesy se uskutečňují polyadací nebo polymerací bez štěpení těkavých látek. [2]

Nejvýznamnější druhy reaktivních pryskyřic jsou:

- Nenasyčené polyesterové pryskyřice
- Vinylesterové pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice

- Fenolické pryskyřice
- Metakrylátové pryskyřice
- Izokyanátové pryskyřice

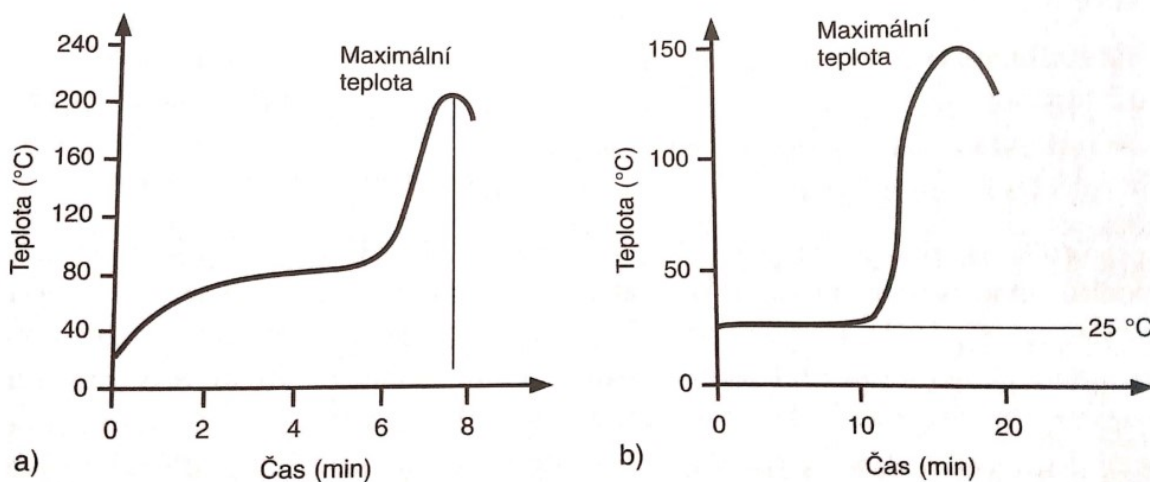
Tvrdidla jsou sloučeniny, které vyvolávají katalytickou polymerizaci pryskyřic metakrylátových, polyesterových nebo také vinylesterových pryskyřic. Nadále působí na vytvrzování v průběhu polyadice u epoxidových i izokyanátových pryskyřic. Urychlovače plní funkci zrychlení síťovací reakce, avšak ty se přidávají v menším měřítku. [2]

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)**

Každá UP-R obsahuje nenasycenou karbonovou kyselinu a taky minimálně jeden alkohol, většinou vícemocný. Rozpouští se v monomerním rozpouštědle, často ve styrenu, se kterým je kopolymerizovatelná. Pryskyřice tohoto typu jsou bezbarvé, až lehce nažloutlé. Můžeme je vytvrzovat za běžné pokojové či zvýšené teploty. Při procesu vytvrzování se uvolňuje reakční teplo, které zapříčiní objemové smrštění 5 – 9 %. Díky nízké viskozitě, dobré smáčení vláken, nízké ceně a velké rychlosti vytvrzování se jedná o nejvíce využívaný materiál pro výrobu kompozitu v průmyslu. Velký význam má délka polyesterového řetězce ve stavbě makromolekuly. Obsah polymerizovatelných dvojných vazeb a také flexibilní prvky mají velký smysl na reaktivitu pryskyřice (pryskyřice je reaktivnější). Na viskozitu pryskyřice nejvíce disponuje obsah styrenu, který se vyskytuje přibližně mezi 30 až 50 procenty. Dosažení lepší zpracovatelnosti a schopnosti prosycování vláken, může výrobce zvýšit obsahem styrenu, a tím docílit nižší viskozity. Nadměrný obsah styrenu však může způsobit zkřehnutí.

Výběr vhodných přísad nám ovlivňuje zpracovatelnost i vlastnosti vyrobených lisovacích hmot. Přísady se využívají na zvýšení objemu za účelem levnější produkce. Zvyšují viskozitu, a díky tomu se mění zatékavost i zpracovatelnost. Mezi významná plniva patří křída, kaolin, hydroxid hlinitý (snižuje hořlavost). Smrštění vlivem přísad klesá, a to i součinitel tepelné délkové roztažnosti. [9] [2]

Vytvrzování UP-R nastává radikálovou kopolymerizací dvojných vazeb v pryskyřici s dvojnými vazbami molekuly styrenu. Vytvrzovací rychlost usměrňuje teplota i množství dodaného katalyzátoru především urychlovače. Přidání inhibitorů zapříčiní pohlcení nově vzniklých radikálů, a tím prodlouží vytvrzovací reakci. Příslušná doba vytvrzovacího systému je odvozena od toho, zdali bude pryskyřice vytvrzována za tepla či za studena. Tento proces znázorňuje obrázek 6.



Obrázek 6. Proces vytvrzování nenasycené polyesterové pryskyřice [2]

(a) za tepla b) za studena)

- **Vinylesterové pryskyřice (VE-R)**

Rozdíl mezi nenasycenou polyesterovou a vinylesterovou pryskyřicí vzniká tak, že zesíťování UP-R nastává pomocí koncových metakrylátových, kde se nachází esterové vazby. U vinylesterových probíhá zesíťování pomocí bisfenolu A, důsledkem toho je vysoká houževnatost, nízká tvarová stálost (vzhledem ke dvojným vazbám) a dobrá odolnost proti alkalickému prostředí. VE-R vychází z počátečních složek fenolických pryskyřic a jsou zásadně reaktivnější. Kratší molekulové řetězce mají na svědomí nižší viskozitu, ale vyšší stupeň zesíťení. Odolnost proti vyšším teplotám, a také reaktivní křehkost jsou další vlastnosti, kterým disponují vinylesterové pryskyřice. Zpracovávají se stejně jako UP-R. Většinou jsou rozpouštěny ve Styrenu. Zahrnují reaktivní dvojně vazby a radikální vytvrzovací proces nastává vlivem přídavku peroxidu. VE-R se vytváří na principu epoxidu z bisfenolu A, a na bázi epoxidového novolaku. Další typ VE-R je vinylesteruretan (VEU-R), který se vytváří na bázi bisfenolu A epoxidu. Její přednosti jsou dobré mechanické vlastnosti zejména tuhost. Vinylesteruretanové pryskyřice vykazují vhodnou tixotropicitu a dobrou vazbu se skleněným vláknem. Dále disponují nižší hmotností než VE-R a taky více hydrofilní. Vinylesterové pryskyřice disponují dvěma přednostmi oproti nenasyceným polyesterovým pryskyřicím. Je to houževnatost a vyšší chemická odolnost.

Vinylesterové pryskyřice ve srovnání s epoxidovými pryskyřicemi má nižší viskozitu a řízenou vytvrzovací reakci, tím pádem snadnější zpracování. Vzhledem k uvedeným vlast-

nostem VE-R využívám tam, kde je vysoké korozní namáhání. Používá se na pračky, chladičí věže, komíny, potrubí, stavbu lodí, tepelné generátory a přepravní nádrže. [9]

- **Epoxidové pryskyřice (EP-R)**

Předností těchto termosetických pryskyřic jsou velmi dobré mechanické vlastnosti, obstojná rozměrová stálost a přilnavost k povrchu. Epoxidové pryskyřice se musí míchat s tvrdidlem v přesném stechiometrickém poměru, z důvodu vzájemně reagujících molekul pryskyřice a tvrdidla. Reakční mechanismus je zde polyadice. Radikálová polymerace pracuje tak, že váže řetězovou reakcí několik řetězců k sobě. Můžeme posoudit, že se jedná o rychlý proces. Naopak polyadice je proces zdlouhavý, do kterého vstupuje několik molekul pryskyřice s molekulami tvrdidla. Molekulární hmotnost roste postupně. Hlavní typy EP-R jsou bisfenol A, a novolakové pryskyřice. Další typ se označuje vysokým počtem epoxidových skupin v molekule. Poslední zmíněný typ vykazuje vysoce zesíťovaný polotvar, a také velkou tvarovou stálostí za tepla. EP-R mohou být označeny epoxidovým ekvivalentem. Udává nám počet epoxidových skupin na váhovou jednotku. Čím větší ekvivalent, tím je větší zesíťování. Tyto a ještě další údaje jsou nezbytné pro určení stechiometrického poměru míchání pryskyřice s tvrdidlem. Epoxidový ekvivalent je hmotnost pojiva v gramech, které obsahuje 1 mol epoxidové skupiny. EP-R se používá jako pojivo pro velmi kvalitní materiály v elektrotechnice, díky skvělým izolačním vlastnostem. Dále se využívá na sportovní potřeby, v letectví i v kosmonautice, a také čím dál více nahrazuje UP-R při výrobě listů větrných elektráren. EP-R jsou vysoce kvalitní pryskyřice, které se využívají jako drahé matrice pro uhlíkové kompozity. Tyto kompozity jsou nezbytnou součástí drahých automobilů nebo letadel. Epoxidové pryskyřice mají relativně malé objemové smrštění, přibližně 2-5%. [2] [9]

- **Fenolické pryskyřice (PF-R)**

Patří do skupiny termosetů, které jsou označovány výbornou tvrdostí, modulem pružnosti a nízkou houževnatostí. Vzniká jako reakční produkt kombinace fenolu s formaldehydem. Dvoustupňová pryskyřice má molární poměr formaldehyd/fenol menší jak 1 a s výskytem kyselého katalyzátoru. Tato pryskyřice je termoplastická, jelikož neobsahuje dostatek metylenových spojovacích vazeb pro síťování. Vytvrzení může nastat za pomoci hexametyléntetraminu, který je výsledkem reakce amoniaku s formaldehydem. Teplem se rozpadá a vznikají nové metylonové spojovací vazby, jež pryskyřici vytvrdí. Při vytvrzování se uvolňuje amoniak, z toho to důvodu se proces nazývá dvoustupňový. Resol nebo také jed-

nostupňová pryskyřice vzniká z reakce formaldehydu s fenolem, přičemž molární poměr formaldehyd/fenol je vyšší jak 1. Reakce je katalyzována za pomoci alkalického katalyzátoru. Chceme-li docílit zvýšené hustoty, aplikuje se tzv. „dopečení“ probíhá za zvýšené teploty cca 170-180 °C a doby 10-20 hodin. Zpracování fenolických pryskyřic probíhá za teplot od 150 do 210 °C. Dvoustupňová pryskyřice umožňuje skladovací dobu 1 až 3 roky, za podmínky, že se skladovací teplota nepřevyší hodnotu 25 °C a relativní vlhkosti 50%. U Jednostupňové pryskyřice by se měla spotřebovat do 3 měsíců, pokud však je třeba uchovávat pryskyřici déle, je nutné, aby se teplota pro uskladnění držela pod 5 °C. Fenolické pryskyřice se uplatňují jako základ lepidel pro laminování dřeva. Dále jsou využívány při výrobě brzdových destiček, brusných kotoučů, kde je PF-R pojivem vlastních brusných částic. Méně známé uplatnění najdeme ve formě pochůzkových roštů. Tyto rošty vzdorují teplotě až 900 °C v časovém intervalu 40 minut. Ani za těchto podmínek nedojde k výraznému snížení pevnosti a tuhosti. Toto jsou vlastnosti, které nepřevyšují ani oceli. Takové rošty můžeme nalézt při stavbě vrtných plošin nebo v dalších oborech chemického odvětví. Pro takové situace je předpoklad velmi dobré požární bezpečnosti. Nejlepší vlastnosti této pryskyřice je její výborná termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost. [9]

1.3 Výrobní technologie

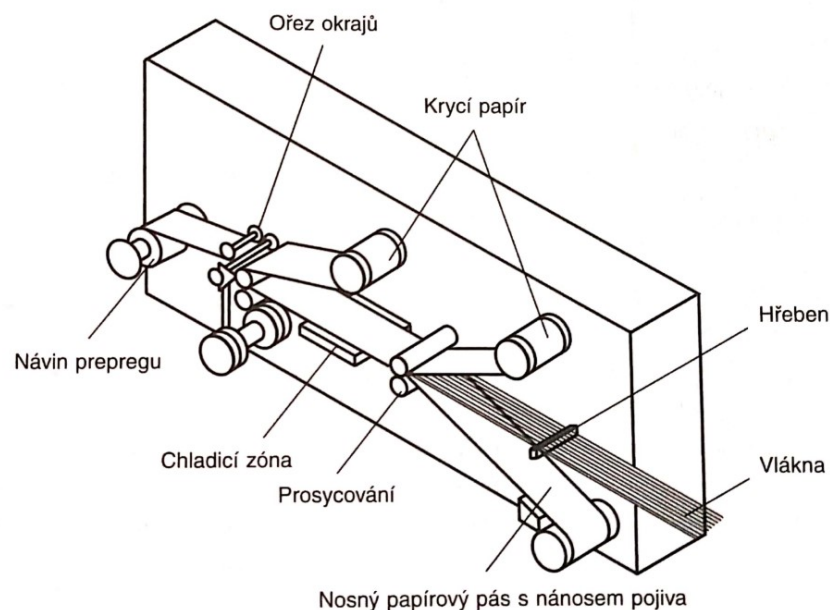
Reaktivní pryskyřice se chemickou reakcí vytvrzují na pevnou součást. Převážně se kompozity vyrábí z plochých polotvarů. Důležitou předností je zde smáčení a prosycování výztuže. Termoplasty se roztaví důsledkem teploty, v podobě taveniny se smáčí a prosytí výztuž. Po ochlazení polotvar ztuhne. Viskozita termoplastických materiálů je mnohonásobně větší jak u reaktivních pryskyřic ve výchozím skupenství. Pro snadnější vyjmutí z formy se používají separátory, aby nedošlo k poškození nově vzniklého výrobku. [15]

1.3.1 Výroba prepregů

Při výrobě produktů lisováním nebo v autoklávu se velice často aplikuje předimpregnovaná výztuž zvaná prepreg. Tato výztuž má výhodu oddělení složitého výrobního postupu prosycování výztuže s pojivem od následujícího zpracování. Tento proces má vliv na kvalitu nového výrobku. Výroba prepregů se provádí na speciálním zařízení.

Výroba jednosměrného prepregu probíhá na jednoduché lince. Vlákná jsou vedena ze stojanu přes hřeben, který je srovná do potřebné roviny. Takto zpracovaný pás vláken se vkládá mezi krycí a nosný papír. Nosný papír je opatřen silikonovou vrstvou, která zahrnu-

je i pryskyřici. Pás směřuje na vytápěný válec kalandru - zde nastává prosycení výztuže s pojivem pod vlivem tlaku. Další část linky je chladicí zařízení, zde se zastaví vytvrzovací reakce. Poslední část je ořezávací a navíjecí ústrojí, které nám zajistí konečný tvar výsledného prepregu. Kromě jednosměrných prepregů se vyrábí široká škála předimpregnovaných tkanin a rohoží. [2]



Obrázek 7. Schéma výroby jednosměrného prepregu [2]

Prepregy s reaktivním termosetickým pojivem se skladují v mrazničkách při teplotě -20°C . Při zpracování se 6 hodin dopředu nechá prepreg rozmrazit, je-li možno, bez přístupu vzduchu. Vzduch nám sráží vzdušnou vlhkost na povrch prepregu. [16]

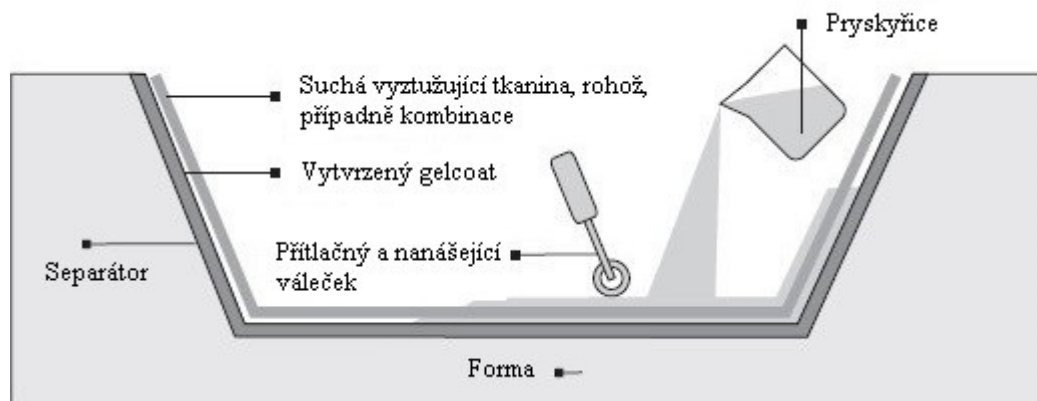
1.3.2 Ruční laminace

Při tomto procesu se nanáší pryskyřice i výztuž ručně. Povrch formy může být pozitivní či negativní. Omezující ojedinelost se jeví, že pouze jedna strana kompozitu má kvalitní povrch. Jednotlivé kroky ručního nanášení jsou:

1. Vyleštění formy separačním činidlem,
2. Použití „gel coat“ zdali je třeba,
3. Nanesení první vrstvy katalyzované pryskyřice,
4. Uložení výztuže do formy,
5. Následující vrstva pryskyřice je rozetřena válečkem (vtlačena do výztuže), při tom je nezbytné vytlačit přebytek vzduchu ve formě tvořících se bublin,

6. Krok 4 a 5 jsou opakovány do doby, dokud nevznikne požadovaná tloušťka kompozitu,
7. Vytvrzování do určitého času,
8. Odebrání kompozitu z formy. [9]

Předností ručního kladení je hlavně její jednoduchost, malé náklady na nástroje, obrovská variabilita tvarů a velikostí. Jednoduchá aplikace „gel coat“ nebo také snadné dokončovací operace jsou největší výhody tohoto výrobního procesu. Nevýhodami tohoto procesu jsou nemožnost opětovně zpracovat odpad, kvalitní povrch má pouze jedna stran kompozitu, velký objem odpadu, malá produktivita. [9]



Obrázek 8. Schéma ruční laminace [16]

1.3.3 Metoda vakuové folie

Tato metoda je lepší forma ruční laminace. Vakuová fólie vytlačí zbytkové bubliny z jednotlivých vrstev a to za pomoci podtlaku. Postup je následující:

1. Ruční nakladení laminátu,
2. Přípravení fólie a následné přiložení na povrch výrobku,
3. Vysátí vzduchu mezi spodní a vrchní (fólie) částí formy,
4. Vytvrzování,
5. Vyjmutí z formy ven. [9]

Výhodou zmíněného procesu je uskutečnitelnost výroby kompozitu s minimálním obsahem vzduchových bublin. Je vhodný pro sendvičové struktury. Mezi nevýhody patří zdoluhavý proces, velký obsah odpadu, vyžaduje zručnou pracovní jednotku. Používá se na vojenské a letecké součásti, kde finanční stránka není na prvním místě. [9]

1.4 Vláknové kompozity

Pro vláknové kompozity je charakteristická vysoká pevnost či vysoký modul pružnosti. Tyto vlastnosti nám ovlivňují vlákna ve formě výztuže. Princip vláknového kompozitu spočívá v tom, že matrice, která vykazuje nižší modul pružnosti, se začne při okolním zatížením pružně případně plasticky deformovat a vlákna toto zatížení přenáší vlivem adheze. Matrice se musí deformovat bez porušení. Nejlepší účinek matrice se získá v momentu, když jsou vlákna zatížena až do meze pevnosti napětím přeneseným matricí. V kompozitu každá složka zužitkuje svoje přednosti. Vlákna přenášejí zatížení, zatím co matrice je chrání proti účinkům okolního prostředí. Nepříznivé vlastnosti jedné složky jsou překryty přednostmi složky druhé. Vláknové kompozity se produkují nejčastěji s plastovou matricí, ta je buď termoplastová nebo reaktoplastová. [8]

1.4.1 Lamináty

Laminát je kompozit sestavený z několika vrstev. Vrstvy jsou spojeny v jeden celek. Jednotlivé vrstvy mohou být uloženy jednosměrně, dvousměrně, vícesměrně anebo prostorově, díky čemu laminát získá izotropní vlastnosti. U laminátu se předpokládá, že spoj mezi jednotlivými vrstvami je nekonečně tenký, dokonale pevný a smykově nedeformovatelný. Hybridní laminát je ten, který obsahuje vlákna z různých materiálů. Vynikající schopnost vláknových kompozitů je, že jejich vlastnosti mohou být účinně řízeny. Orientace jednotlivých vrstev tvořící laminát hraje velikou roli. [8]

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní výroba neboli 3D tisk je technologie, při které se z nakresleného digitálního 3D modelu stane fyzický výrobek. Všechna zařízení na výrobu 3D modelů pracují na bázi rozložení počítačové předlohy do velice tenkých vrstev, které se následně sestaví do fyzického modelu. Na rozdíl od strojního obrábění se materiál neodebírá, ale naopak po malých vrstvách přidává. Výrobek (model) je staven na základní desce, která se po dokončení každé vrstvy posune směrem dolů (v ose Z) o právě zmiňovanou tloušťku vrstvy. [5]

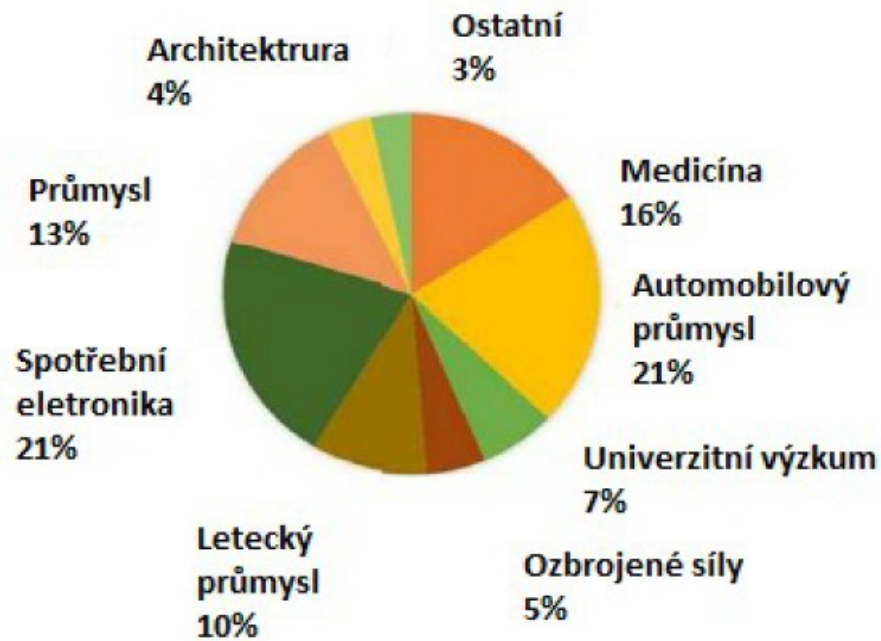
Nejběžnější typ spotřebitelského 3D tisku, se označuje FDM (z anglického jazyka Fused Deposition Modeling, v překladu modelování depozicí taveniny). Také se můžeme setkat se zkratkou FFF (z angl. Fused Filament Fabrication, v překladu výroba z taveného vlákna). Do části, která se nazývá extrudér, směřuje tenké vlákno (struna), následně extrudér vlákno roztaví za pomoci vysoké teploty. Tento proces můžeme přirovnat k tavné lepicí pistoli. [1]

Vzestup 3D tisku se označuje jako počátek „třetí průmyslové revoluce“. První a druhá průmyslová revoluce spočívala v tom, že efektivní výroba ukazovala na mnoho dělníků, přechod od ruční práce k výrobě pomocí strojů, výrobu v továrnách (které se nacházely ve velkých městech), využití parní síly či nové způsoby chemického zpracování. Hlavní rozdíl nastává v tom, že aditivní výroba je velice osobní. Ve skutečnosti se jedná o továrnu na pracovním stole, která může vyrobit prakticky cokoli. [20]

Spotřebitelské 3D tiskárny se rozdělují na dva hlavní typy; první používá modelování depozicí taveniny FDM a druhá pracuje s pryskyřicí metodou stereolitografie SLA. Spotřebitelské 3D tiskárny začaly být na trhu dostupné kolem roku 2009, značný nárůst této oblasti se datuje k roku 2012. Tento výrobní obor vznikl teprve nedávno, a proto je možné usuzovat, že nejlepší část aditivní výroby je pořád před námi. [1]

Při výběru klasické 2D tiskárny se můžeme setkat s rozlišením typu „ 600dpi“ či „ 1200dpi“. Tato informace označuje počet bodů na palec při nanášení inkoustu na papír. Čím více inkoustu je umístěno na papíře, tím je rozlišení větší. Na stejný způsob funguje i 3D tiskárna. Rozlišení v 3D problematice se udává v mikronech a tisíc mikronů je rovno jednomu milimetru. Nejčastější rozlišení bývá 100, 200 nebo 300 mikronů. Čím méně mikronů obsahuje tisková vrstva, tím méně bude tisková linie viditelná. Model tištěný vrstvou 100 mikronů bude vznikat dvakrát tak déle, jak model, který má tiskovou vrstvu 200 mikronů. Model s menším obsahem mikronů bude trvat déle, avšak bude mít větší kvalitu. [1]

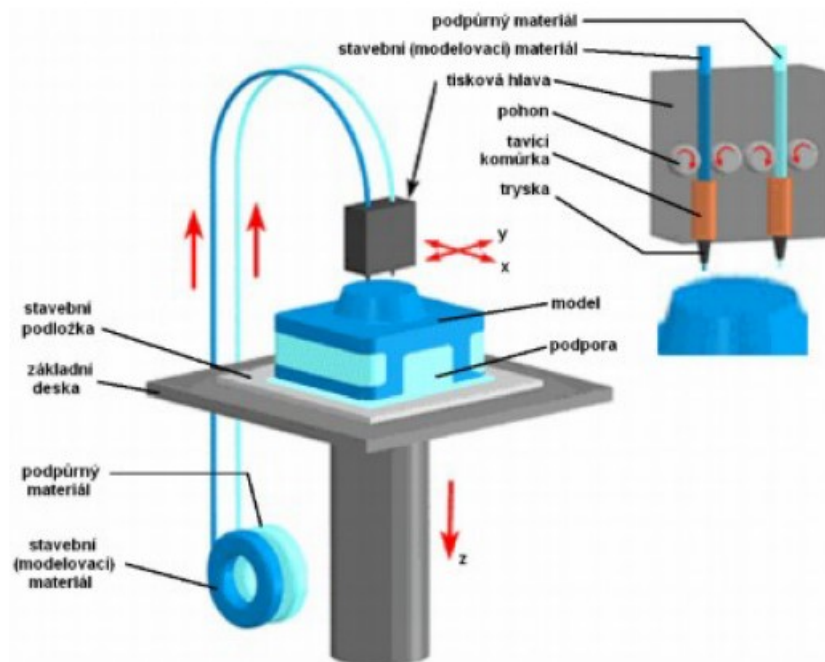
V současné době se aditivní výroba rozšiřuje do celé řady oborů (Obrázek 9).



Obrázek 9. Průmyslové rozdělení aditivní výroby [15]

2.1 Části FDM tiskárny

Každá FDM 3D tiskárna má následující komponenty: Strunu, Extrudér či soustavu extrudéru, tiskovou desku, komponenty lineárního pohybu, Rám (šasi) a jednotku řadiče. Princip 3D tisku pomocí FDM je zobrazen níže (Obrázek 10).



Obrázek 10 Princip FDM tiskárny [12]

2.1.1 Rám

Rám nebo také „šasi“ nám určuje tvar 3D tiskárny. Od rámu je vyžadována co nejvyšší dlouhodobá strukturální stabilita. Každá 3D tiskárna obsahuje pohyblivé části, které se mohou zachvát vlivem sundávání hotového modelu z tiskové desky. V případě manipulace s tiskárnou je zapotřebí dát pozor na pevnost rámu a tuhost celé tiskárny. [14]

2.1.2 Tisková deska

Tisková deska nebo také tisková oblast je poměrně jednoduchá část 3D tiskárny. Na tomto místě vzniká tištěný model. Častokrát se můžeme setkat s akrylovými nebo skleněnými tabulemi. Každá FDM tiskárna určuje, aby byla tisková deska rovnoběžná s rovinou pohybu soustavy extrudéru. Mnoho lidí se domnívá, že termín „vyrovnání tiskové desky“ označuje, aby se tisková deska nacházela ve vodorovné rovině. Tenhle fakt, však není pravda. Tisková deska musí být rovnoběžná s rovinou pohybu soustavy extrudéru. Přesněji řečeno extrudér musí přesně sledovat rovinu tiskové desky. Správná orientace první vrstvy patří k nejdůležitějším podmínkám úspěšného tisku. Některé 3D tiskárny nabízejí automatickou kalibraci desky. Vedle trysky se nachází senzor, který však nesnímá výšku, ale pouze detekuje její úhel. U většiny 3D tiskáren však musíme kalibraci orientace první vrstvy provést

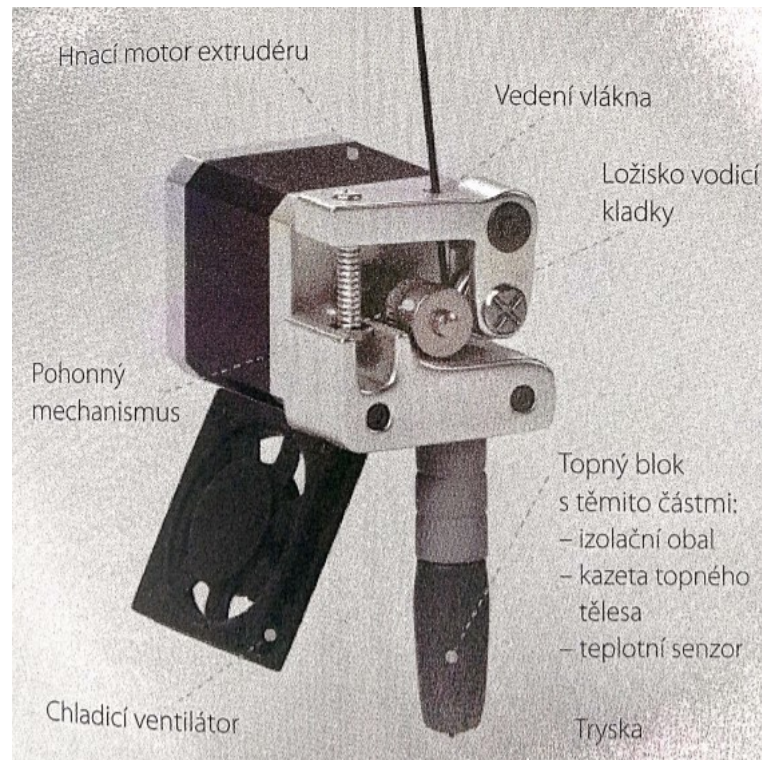
manuálně. Tento postup se skládá ze dvou kroků. Za prvé je třeba tiskovou desku vyrovnat ve směru pohybu doprava, doleva a dopředu, dozadu (v rovině XY), tak aby všechny rohy leželi v rovině. Za druhé musíme nastavit výšku tiskové oblasti (osa Z) pro první vrstvu tak, aby tryska nebyla moc daleko ani moc blízko tiskové desky. Pro tiskárnu, která má rozlišení 100 mikronů, nastavíme výšku tiskové desky od trysky 0,1mm. Některé tiskové desky mají vyhřívaná topná tělesa, a díky tomu jsou schopny tisknout z více materiálů. [14]

2.1.3 Extrudér

Extrudér (Obrázek 9) je sestava součástek, které táhnou vlákno vodícím kanálem, ohřívá jej k jeho bodu tání a roztavený materiál vytlačuje přes trysku malého průměru na tiskovou oblast.

Sestava extrudéru se skládá z několika částí:

- Pohonný mechanismus (je určený k uchopení vlákna),
- hnací motor extrudéru (pohání mechanismus vlákna),
- vodící kanál vlákna (je určený k vedení vlákna),
- vodící kladka (táhne vlákno na pohonný mechanismus),
- topný blok (slouží k tavení vlákna),
- tryska (díky ní roztavené vlákno putuje na tiskovou desku),
- chladicí ventilátor. [15] [6]



Obrázek 11 Schéma Extrudéru [1]

Každá 3D tiskárna od jiného výrobce se liší sestavou extrudéru. Někteří výrobci produkují uzavřenou sestavu extrudéru tak, aby byly všechny součástky skryté v jediné vyměnitelné části. Jiní výrobci umožňují otevřenou sestavu extrudéru, proto aby se dala vyměnit či jednotlivé dílce vylepšit. Na sestavě extrudéru obvykle měníme pouze jednu součást (za předpokladu, že ostatní součásti fungují) a to je tryska. Průměr trysky na spodní straně nám ovlivňuje výsledné vlastnosti výtisku. Vyžadujeme-li rychlý tisk velkých součástí, volí se tryska s větším průměrem. Tryska s malým průměrem umožňuje tisk tenčí stěny s kvalitnějšími povrchovými detaily. Standartní velikost trysky se pohybuje od 0,35mm do 0,45mm. [15]

2.1.4 Vlákno

Vlákno je v 3D tiskárně důležité stejně asi jako inkoust v klasické 2D tiskárně. Standartní průměry vlákna jsou 1,75mm nebo 2,85mm a jsou dodána v návinnu několika větví na cívce (Obrázek 10). Častěji jsou používány struny malých průměrů, protože vyžadují menší sílu pro vytlačení, díky tomu můžeme pracovat s menšími a slabšími motory, které pak snižují celkovou hmotnost tiskárny. Tiskárna je kompatibilní pouze s jedním průměrem vlákna, nelze průměr vlákna zaměnit za větší či naopak.

Nejpoužívanějšími materiály strun pro FDM tisk jsou:

- Polylaktid (PLA)
- Termoplastický elastomer (TPE)
- Akrylonitributadienstyren (ABS)
- Polyethyltereftalát (PET)
- Nylon (PA)
- Pomocné materiály [11] [21]



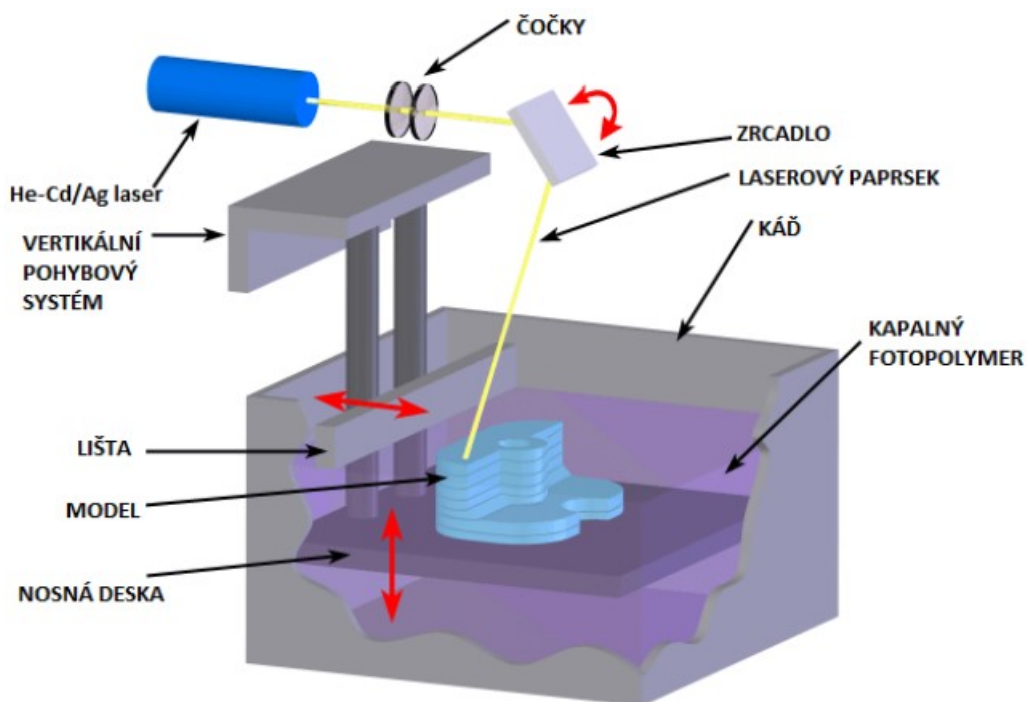
Obrázek 12 Struna na cívce pro FDM [11]

2.2 Tiskárny SLA

Tiskárny SLA místo vláknů používají kapalnou pryskyřici, která je vytvrzena vlivem ultrafialových paprsků. Pracuje podobně jako tiskárna FDM po vrstvách ale obráceným způsobem. SLA tiskárny mají daleko menší zastoupení na trhu, jako tiskárny FDM, jsou daleko dražší, ale dokáží vyrobit kvalitnější modely s mnohem jemnějšími detaily. [6]

2.2.1 Základní proces tisku

1. Do 3D tiskárny umístíme vanu s kapalnou pryskyřicí (polymerem).
2. Tisková deska se ponoří do vany s pryskyřicí, tak aby vznikla tenká vrstva mezi dnem vany a tiskovou deskou. Tisková oblast musí být orientovaná směrem dolů.
3. Ze spodní strany tiskové desky dopadají směřované paprsky, které v požadovaných místech pryskyřici vytvrdí.
4. Po vytvrzení dané vrstvy se tisková oblast posune mírně nahoru.
5. Směřované paprsky vytvrdí další vzor dané vrstvy, která se následně připojí k předešlé vytvrzené vrstvě.
6. Proces se opakuje, dokud není model hotový. (přepsat) [6] [1]



Obrázek 13 Princip SLA tisku [4]

2.2.2 Údržba pryskyřice

Použitá pryskyřice vyžaduje vzácnou péči. Je nutné ji skladovat při teplotě cca 21°C, aby nedošlo ke změně viskozity. Pryskyřice má výrazný chemický zápach, který je lehce nasádlý. Tiskárnu SLA je nutné umístit dále od oken, aby nebyla vystavená slunečním paprskům. Paprsky mohou zapříčinit nežádoucí vytvrzení pryskyřice. Pryskyřice by se neměla vůbec dostat na lidskou kůži - to znamená, že práce v rukavicích je nutná. Když je model hotový, měl by se očistit isopropylalkoholem. Po očistění je dobré dát hotový výrobek

na přímý svit slunečních paprsků, dojde tak vytvrzení vnějších vrstev. Po odebrání výtisku z tiskové oblasti je nutné očistit tiskovou oblast od nežádoucích drobných částic vytvrzené pryskyřice. Tyto částice by mohli narušit příští tisk. Jednou použitou pryskyřicí by neměla být míchána s novou (čistou) pryskyřicí, je vhodné skladovat zvlášť a při dalším tisku ji použít přednostně. Vanu, kde se uchovává pryskyřice, je nutné po jistém časovém úseku vyměnit. Odhadovaná životnost je 3 až 4 litry pryskyřice na vanu. [5]

2.2.3 Typy pryskyřice

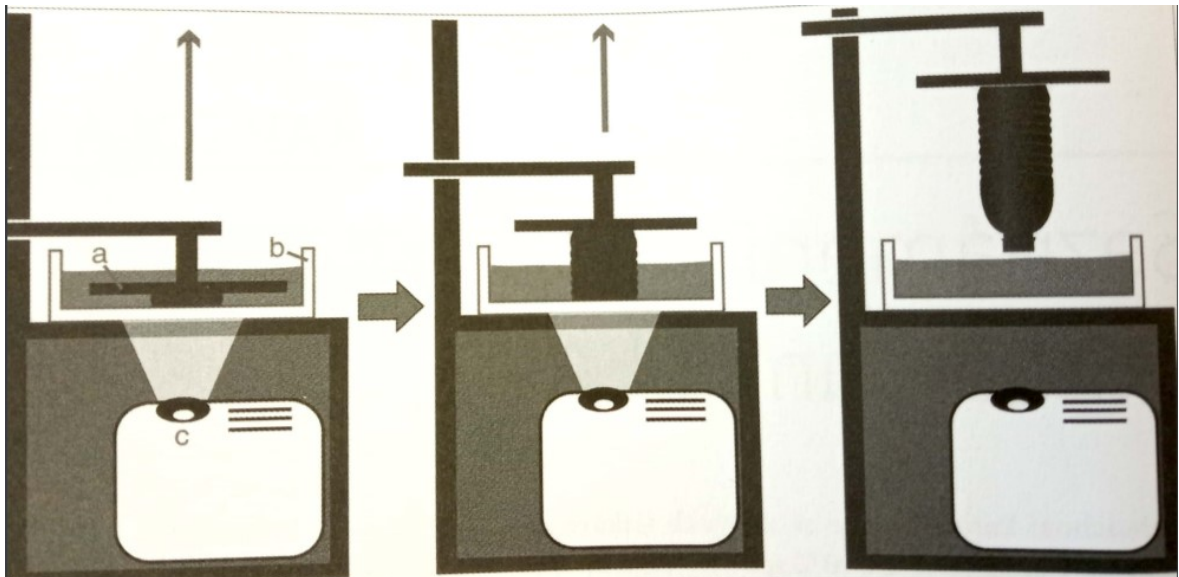
Tiskárny SLA mají menší výběr vlastností materiálů, jak tiskárny FDM. Běžné typy pryskyřic se řadí do čtyř kategorií:

- Tvrdé a trvanlivé
- Pružné
- Normální a univerzální
- Odlévatelné [5]

Jednotlivé typy pryskyřic vykazují specifické výhody ale i nevýhody. Pryskyřice, které vykazují vysokou tvrdost a odolnost, neumožňují tisk vytříbených detailů jako třeba univerzální pryskyřice. Tvrdé pryskyřice dovolují větší fyzické zatížení než univerzální pryskyřice. Odlévatelné pryskyřice se používají při návrhu a výrobě šperků. []

2.2.4 Typy SLA tiskáren

Existují dva typy 3D tiskáren SLA, laserová a DLP (z angl. Digital Light Processing) tiskárna. Hlavní rozdíl mezi těmito tiskárnami je, že laserová tiskárna pracuje s osvětlením vytvrzovaného vzoru, kdežto tiskárny DLP vytvrzují souměrně celou vrstvu pomocí světelného projektoru (viz Obrázek 14). [6]

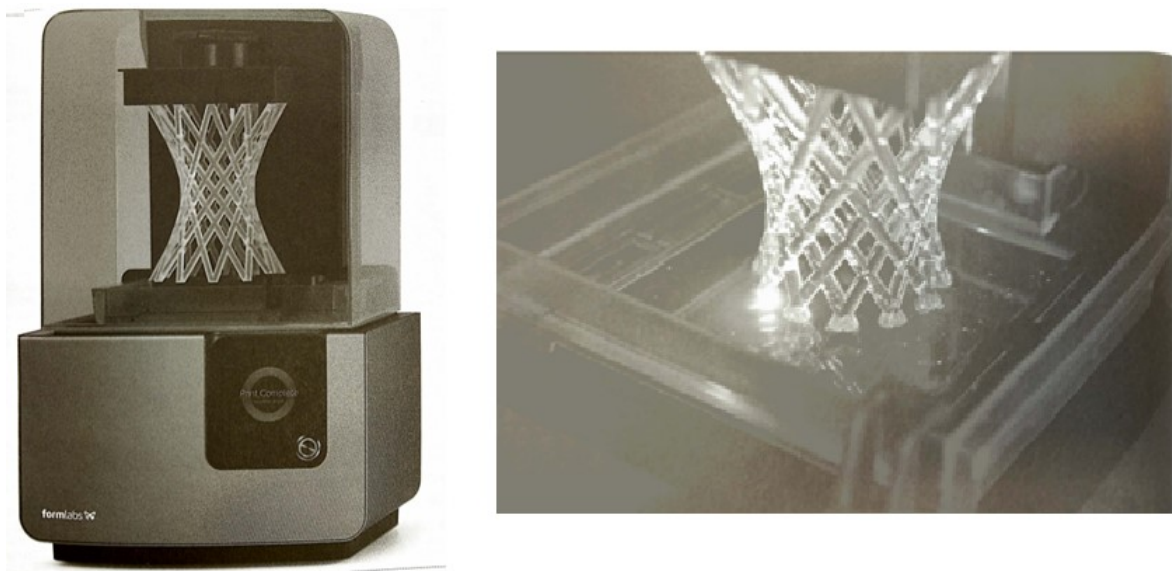


Obrázek 14. Tiskárna SLA typu DLP [1]

(a) tisková deska, (b) vana s kapalnou pryskyřicí, (c) projektor)

- Laserová tiskárna SLA

U malých objektů dosahuje velkých rychlostí, kde v každé vrstvě stačí laserem vykreslit pouze malý objekt, zatímco u větších modelů jednotlivá vrstva trvá déle, protože musí přesně kopírovat tvar velké plochy. Vzorovou laserovou ukazuje Obrázek 12.



Obrázek 15. Laserová tiskárna FormLabs Form 2 a detail laserového systému [22]

- Tiskárna SLA typu DLP

U tohoto typu tiskáren nezáleží na velikosti modelu, protože vytvrzování celé vrstvy probíhá najednou (viz Obrázek 14). Jeden z představitelů 3D tiskáren typu DLP je tiskárna Autodesk Ember (viz obrázek dole)



Obrázek 16. 3D tiskárna Autodesk Ember (technologie DLP) [5]

Tato tiskárna má velmi malou pracovní oblast (konstrukční návrh), která má rozměry 64mm x 40mm x 134mm. Tento konstrukční návrh je především pro prototypy šperků a projekty určené pro biomedicínu (viz Obrázek 15).



Obrázek 17. Vlasová struktura vytisknutá na 3D tiskárně Ember [5]

2.3 Komerční typy plastů pro 3D tisk

Při 3D tisku metodou FDM se nejčastěji používá termoplastický polymer. Nejvíce užívaný materiál je ABS (akrylonitril butadien styren) a PLA (polyactic acid – kyselina polymléčná). Další typy materiálů jsou termoplastický elastomer (TPE), Nylon (PA), CPE, Polyethylentereftalát (PET), ASA. Pro vybrání vhodného materiálu je nezbytné zohlednit několik aspektů. Patří tam například barva nebo šířka struny, hmotnost balení, potenciaální délka struny, maximální rychlost tisku, optimální teplota tisku vybraného materiálu a vhodná teplota podložky při procesu tisknutí. Každý materiál má od výrobce tzv. materiálový list, ve kterém je uvedeno napětí v tahu nebo ohybu a taky teplota měknutí. [10]

3 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část se skládá ze dvou částí. První část popisuje kompozitní materiály, jejich složení, druhy vláken, matric a technologií.

V další části je popsána aditivní výroba. Jsou zde uvedeny základní principy tisku FDM a SLA. Z důvodu stanovení soudržnosti materiálů na základě rozdílných typu pryskyřic, tvoří nejdůležitější část popis druhů reaktivních pryskyřic. Jelikož byla zkušební tělíska vytisknuta na tiskárně typu FDM, je druhá část teoretické práce věnována jednotlivým komponentům a modelům těchto tiskáren.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem bakalářské práce bude výzkum soudržnosti materiálů vytvořených aditivní technologií spolu s vybranými typy reaktoplastických matric. Technologie zpracování kompozitních materiálů bude ruční laminace pod vakuovou fólií. Dále bude práce zaměřena na testování soudržnosti kompozitních materiálů a polymerů připravených 3D tiskem. Stanovení soudržnosti bude určováno za pomoci testu odlupu a třibodové ohybové zkoušky.

Hlavní cíle praktické části:

- Výroba zkušebních tělísek pomocí aditivní technologie.
- Laminace 3D vytisknutých tělísek.
- Příprava zkušebních tělísek.
- Test odlupu.
- Zkouška třibodového ohybu.
- Vyhodnocení a diskuze výsledku.

5 POUŽITÉ MATERIÁLY

5.1 Materiály tvořící kompozit

5.1.1 Skelná tkanina s keprovou vazbou

Plošná hmotnost tkaniny je 110 g/m^2 od firmy Havel composites. Tkanina s keprovou vazbou vykazuje dobrou tvarovatelnost i pevnost. Je vhodná pro složitější tvary.



Obrázek 18. Skelná tkanina

5.1.2 Epoxidová pryskyřice L285 (MGS)

Tento typ pryskyřice je velmi kvalitní. Používá se pro výrobu modelů a v leteckém průmyslu. Pryskyřice v kombinaci s tužidlem vytváří viskózní směs, díky tomu jsou vlákna kvalitně prosycena. Výrobek tak získává malou hmotnost a vyšší užitkovou hodnotu. Poměr míchání pryskyřice s tužidlem je zde 100/40 váhově nebo 100/50 objemově. Doba zpracování při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ je 50 minut. [16]

5.1.3 Polyesterová pryskyřice

Jedná se o univerzální typ pryskyřice určený zejména k opravám laminátových předmětů nebo k laminaci samotné. Jedná se o roztok nenasyčené polyesterové pryskyřice ve styrenu. Příprava pryskyřice s iniciátorem probíhá za stálého míchání v hmotnostním poměru 100/2. Doba zpracování při teplotě 20 °C je 15 minut.



Obrázek 19. Polyesterová pryskyřice

5.2 Polymerní materiály pro 3D tisk

5.2.1 Nylon FX256

Tento všestranný materiál je velice odolný, silný a flexibilní v tenkých vrstvách. Vykazuje velmi vysokou adhezi (přilnutí) mezi vrstvami. Vysoká teplota tání a nízký součinitel tření je dobrou volbou pro funkční či technické díly. Nylon je náchylný na vlhkost, proto je při tisku zapotřebí, dát si pozor na pohlcování vody ze vzduchu. Pokud by vlákno nebylo suché, mohly by při tisku vzniknout nežádoucí bublinky. Suché vlákno je předpoklad pro hladké předměty s lesklým povrchem. Teplota tisku je 225 °C, zatímco teplota vyhřívání podložky je 80 °C. Tloušťka vrstvy byla rovna 0,29 mm a rychlost tisku nastavena na 34 mm/s. Proces tisku se odehrál v uzavřeném pracovním prostoru. [14]

5.2.2 ASA ExtraFill

Materiál ASA disponuje velkou tuhostí, je rezistenční proti UV záření a vykazuje nízkou hladinu žloutnutí. Výborná odolnost vůči povětrnostním podmínkám je nespornou výhodou zmíněného materiálu. Tento typ látky je vhodný pro výrobu prototypů, strojírenských nástrojů i pro díly určené k venkovní aplikaci. Tisk je pevný a vhodný pro drobné detaily, vytisknutý model je lesklý. Teplota tisku byla 250 °C a teplota vyhřívané podložky byla 90 °C. Rychlost tisku byla shodná jako v předchozím případě (34 mm/s) a shodná byla i tloušťka vrstvy. Tisk se odehrával v uzavřeném pracovním prostředí. [14]

5.2.3 CPE HG 100

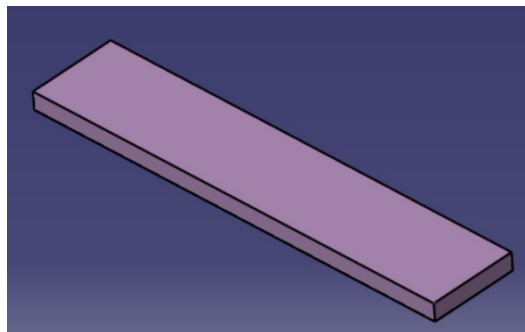
CPE je odolný materiál vhodný pro technické komponenty, zejména pro tisk funkčních prototypů a mechanických součástí. Vyznačuje výbornou přilnavost bez deformace a zdraví škodlivého zápachu. Dále vykazuje vynikající houževnatost, vyšší tvrdost, vysokou pevnost v tahu, odolnost proti chemikáliím a teplotám do 70 °C. Průhlednost u tenkostěnných modelů zůstává výhodou. Teplota tisku byla nastavena na 275 °C, přičemž teplota vyhřívané podložky byla 90 °C. Tryska pro tento materiál měla průměr 0,4 mm. Tloušťka vrstvy byla rovna 0,15 mm a rychlost tisku byla 34 mm/s. [14]

6 3D TISK ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Každé vytisknuté těleso mělo rozměry 100x20x4 mm. Užitá 3D tiskárna byla Zortrax M200 (Obrázek 23). Tento typ 3D tiskárny se vyznačuje vynikajícím zpracováním, stabilní a odolnou konstrukcí. Vytisknuté modely vykazují vysokou kvalitu tisku. Pracovní prostor 3D tiskárny je 200 x 200 x 185 (XYZ). Tiskárna disponuje nástrojem automatické kalibraci stavební desky. [17]



Obrázek 20. 3D tiskárna Zortrax M200 [15]



Obrázek 21. Tělísko vytvořené v 3D programu



Obrázek 22. Reálné tělísko vzniklé aditivní výrobou

7 VÝROBA KOMPOZITŮ A LAMINACE VYTISKNUTÝCH TĚLES

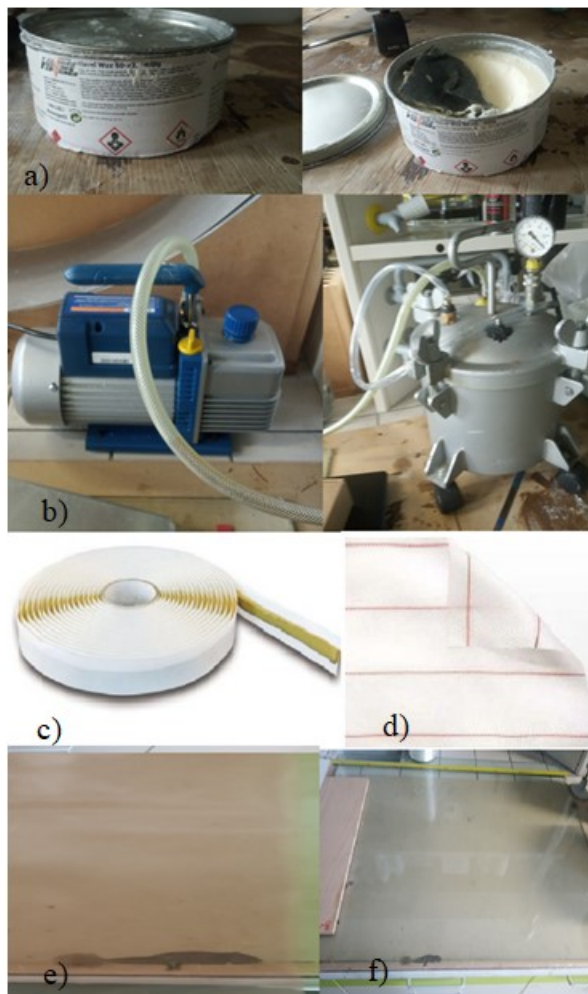
Pro výrobu ruční laminací za pomoci vakuové fólie je zapotřebí několik nezbytných komponentů. Díky těmto součástem se při technologii docílí dostatečné kvality výrobku. Po úplném vytvrzení a následném odformování se za pomocných materiálů stává odpad. Pro dosažení efektivní výroby je nutné odpad minimalizovat a nakládat obezřetně s pomocnými materiály.

7.1 Výrobní nástroje a pomocné materiály

Pro tvorbu kompozitů a laminací vytisknutých tělísek byly použity tyto pomůcky:

- Výrobní forma – Spodní část formy je obyčejná skleněná tabule (viz. Obrázek 23f). Rovinný povrch pro vytvoření rovinně plošného kompozitu je nepostradatelný.
- Separální vosk Havel Wax 60-x3 – Separální vosk (Obrázek 23a) se nanáší ručně na skleněnou tabuli (spodní část formy). Malý hadřík slouží k namazání vrstvy separálního vosku. Po zaschnutí vrstvy je forma mechanicky vyleštěna ubrousky. Tento proces je třikrát opakovaný. Důkladné separování zapříčiní snadnější odformování hotového výrobku.
- Přístroje vytvářející vakuum - Kombinace těchto přístrojů (Obrázek 23b Vakuová vývěva a Rezervoár) slouží pro vytvoření vakua mezi spodní a vrchní částí formy. Za přítomnosti vakua dochází k prosycování jednotlivých tkanin výrobku.
- Hadice - Hadice je určena pro odvod vzduchu z prostoru formy. Je vyrobena z PE (polyethylenu), tudíž vykazuje tepelnou a chemickou odolnost.
- Těsnící páska - Oboustranná těsnící páska (Obrázek 23c) tvoří vzduchotěsný spoj mezi vakuovou fólií a skleněnou tabulí (spodní a vrchní část formy). Páska je nejprve nalepena na fólii, následně na spodní formu. Pro rozdílné teploty se používají jiné těsnící pásy.
- Odtrhová fólie a tkanina– Odtrhová fólie je dodávána firmou Havel composites. Aplikujeme ji tak, že ji přiložíme přímo na vyztužené materiály. Po odtržení způsobí drsný povrch a při správné manipulaci dojde ke správnému odformování výrobku. Tkanina (Obrázek 23d) je vyrobena ze syntetických vláken a přikládá se na odtrhovou fólii. Často se vyrábí polyesteru, méně často z nylonu. Největší význam má pro oddělení součástí, které jsou uloženy na ní.

- Separáční fólie – Slouží pro oddělení jednotlivých vrstev od sebe. Rozdělují odtrhovou tkaninu od vakuov  fólie.
- Vakuov  fólie – Tato pružn  plastov  fólie (Obrázek 23e) se vyrábí z polyamidu, polyethylenu a polytetrafluorethylenu. Pracují jako horní část formy a za pomoci těsnicí p sky formu uzavře od mořnost  prouděni vzduchu. Fólie je teplotn , mechanicky a chemicky odoln . Rozměr fólie musí být větší jak výrobek a také vše co je ve formě uzavřen  (tkaniny a ostatní fólie).

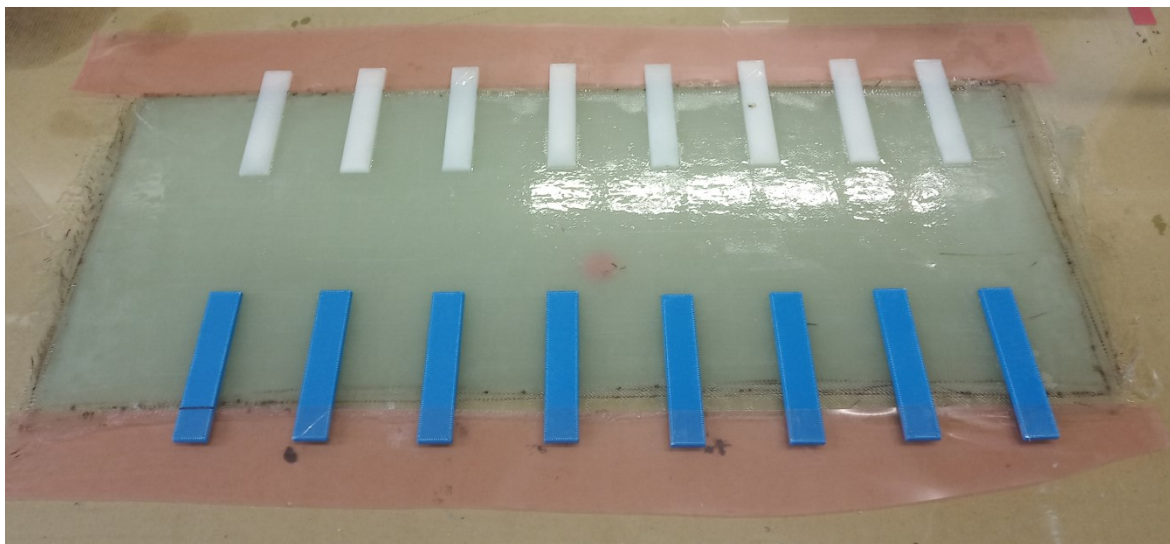


Obrázek 23. Použit  pomůcky a nástroje

7.2 Postup výroby

Na skleněnou tabuli byl nanesen separáční vosk a za pomoci papírového ubrousku byla forma vyleštěna, tento proces se opakoval ještě dvakrát. Byla namíchána pryskyřice s tuřidlem v poměru 100/40. Za pomoci válečku byla nanesena prvni vrstva pryskyřice na vyleštěnou formu, hned poté byla kladena vrstva vlákna. Celkem bylo polořeno osm vrstev

vláken ve skladbě 0/90/0/90/0/90/0/90. Mezi každou vrstvou byla přimíchána a rozetřena vrstva pryskyřice, aby vzniklý kompozit byl řádně prosycen. Po vložení poslední vrstvy vlákna se uložily 3D vytisknuté tělíska tak, aby přečnívaly o 20 mm. Zároveň každé tělísko bylo od druhého vzdálené 50 mm. Pod přečnívajících 20 mm byla uložena vakuová fólie, která plnila funkci separační fólie. Oddělovala vytisknutý materiál od vznikajícího kompozitu a také formy.



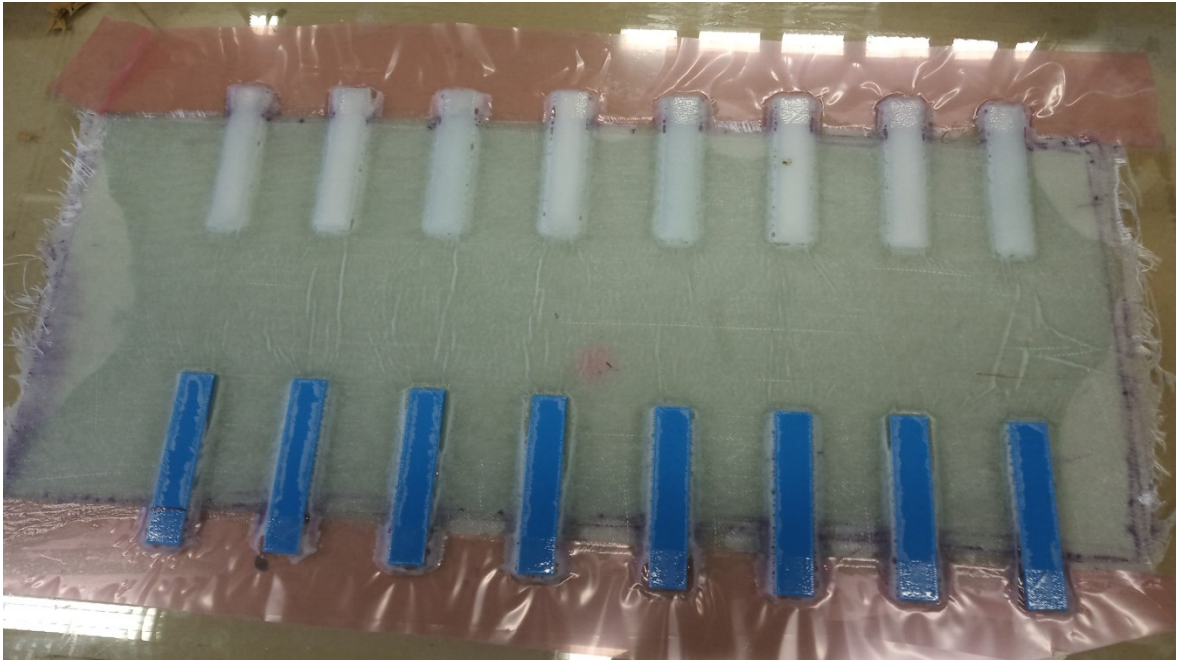
Obrázek 24. Vlákna prosycené pryskyřicí s položenými vytisknutými součástky pro test odlupu

Následně byla uložena odtrhová fólie, odsávací tkanina a separační fólie. Pod připravenou vakuovou fólii s nachystanou těsnící páskou byla vložena hadice pro vysátí vzduchu (vytvoření vakua).



Obrázek 25. Deska při procesu s vytvrzování

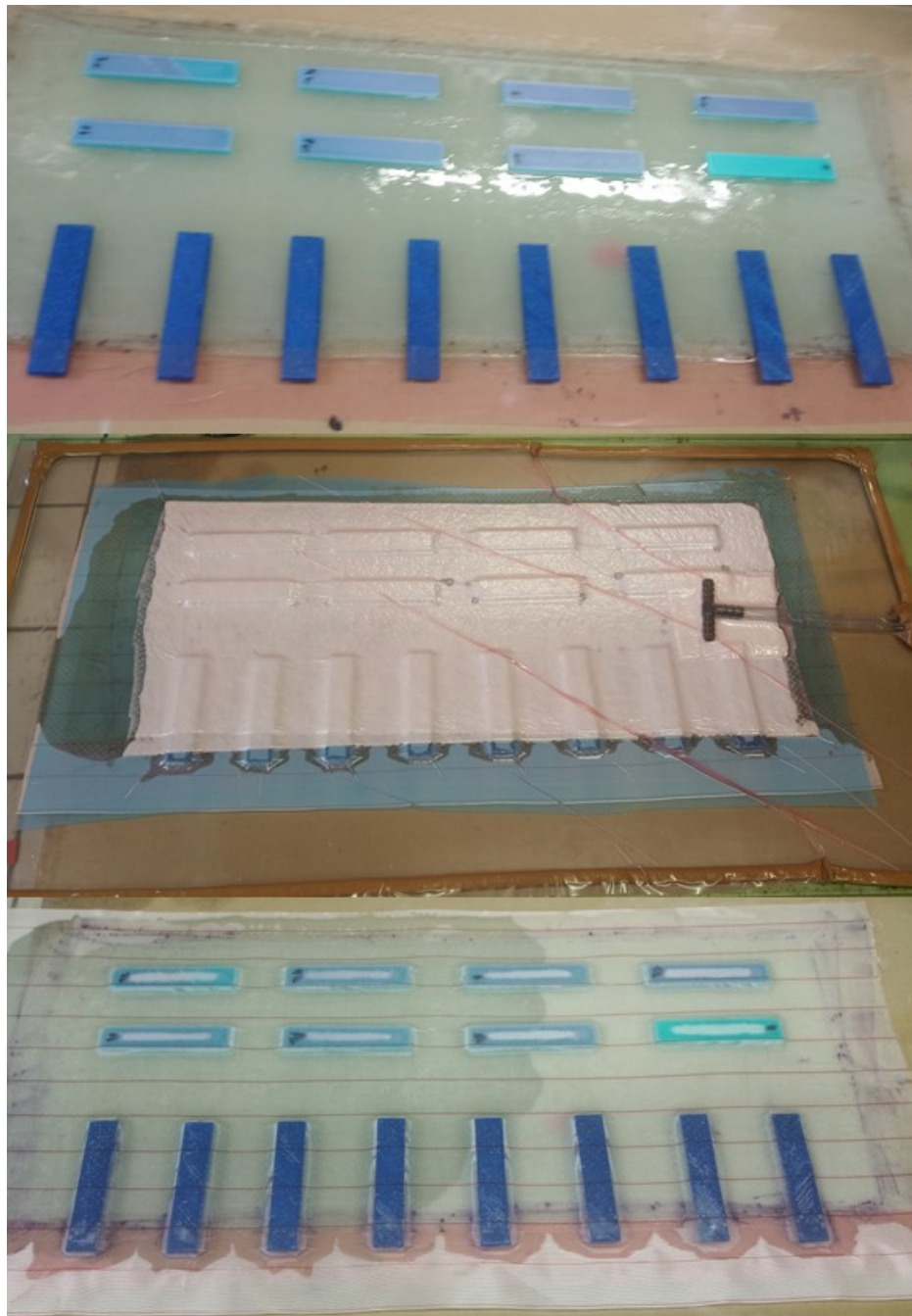
Po úspěšném vysátí vzduchu a vytvoření podtlaku, nastal 24 hodinový prostoj pro úplné vytvrzení pryskyřice a dokončení kompozitu.



Obrázek 26. Hotová deska po odformování

Po úspěšném odformování byla deska dokončena.

Další deska se vyráběla obdobně s malým rozdílem uložení 3D vytisknutých tělísek. Tyto laminované tělíska byly zvoleny ke zkoušce ohybem, proto je jejich uložení na poslední vrstvu vlákna v celé ploše spodní strany tělíska. Postup a uložení znázorňuje Obrázek 27.



Obrázek 27. Postup výroby desky s tělísky pro zkoušku ohybem

7.3 Příprava zkušebních těles

Vyrobená kompozitní deska spolu s tělísky byla orýsována tak, že od vytisknutého 3D tělíska byla 20 mm vzdálena ve všech směrech. Příprava zkušebních těles proběhla na pásové pile s vhodným pilovým pásem pro řezání tohoto typu materiálů. Celkem bylo připraveno 6 materiálových kombinací vytisknutých plastů a kompozitů.

Tabulka 1. Značení zkušebních těles

značení	druh pryskyřice	materiál 3D tisku
A	Epoxid	ASA
B	Epoxid	Nylon
C	Epoxid	CPE
D	Polyester	ASA
E	Polyester	Nylon
F	Polyester	CPE



Obrázek 28. Připravené těleso pro test odlupu

Zkušební těleso vykazuje rozměrové hodnoty kompozitního materiálu 60 x 100 mm. Vytisknuté těleso je v kompozitním materiálu položeno tak, že 20 mm přesahuje okraj kompozitního materiálu a rovněž 20 mm je vzdálený okraj kompozitu po okraj vytisknutého tělíska ze tří stran. Celkový rozměr kompozitního testovacího výrobku je 120 x 60 x 6 mm.

8 MECHANICKÉ ZKOUŠKY SOUDRŽNOSTI

Všechny mechanické zkoušky se konaly na trhacím stroji ZWICK 1456 (obrázek 31.). Celkem bylo otestováno 10 vzorků z každé série. Technické údaje k tomuto typu zkušebnímu stroji jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 2).



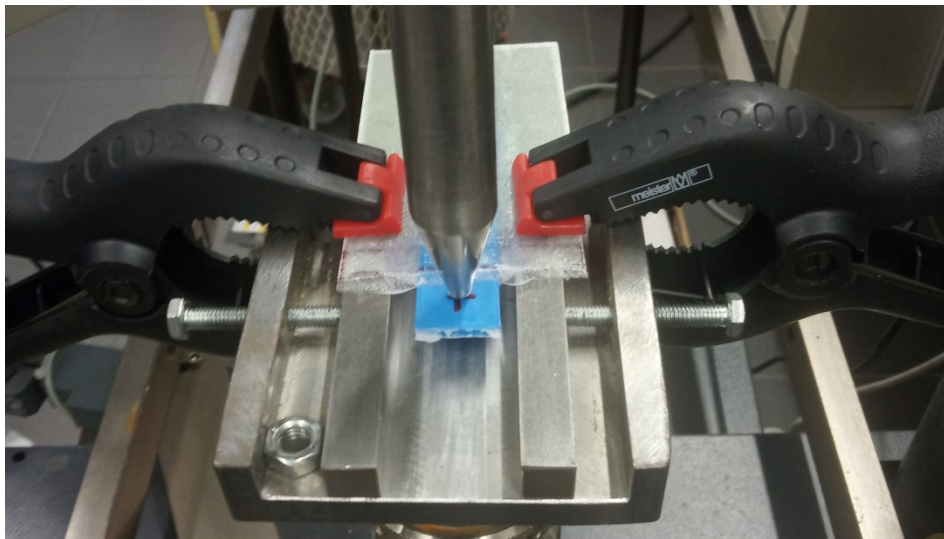
Obrázek 29. Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456

Tabulka 2. Technické údaje stroje

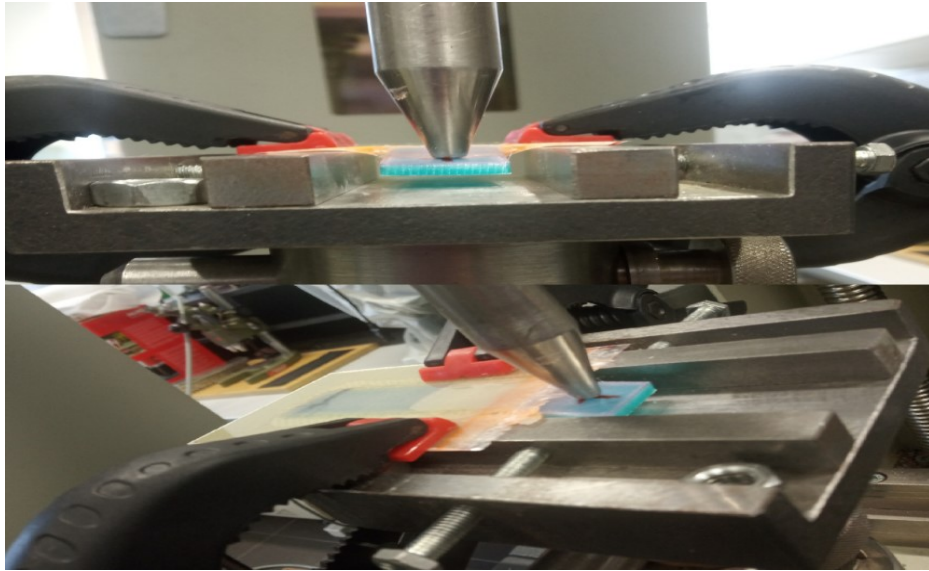
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 až 20 kN
Teplotní komora	-80/ +250 °C
Test	Tah/Ohyb/Tlak

8.1 Test odlupu

Test odlupu se realizoval při rychlosti $v = 3$ mm/min a za laboratorní teploty 25 °C. Působení síly bylo směřováno na rozhraní kompozitního materiálu. Cílem tohoto testu bylo zjistit únosnost spoje, neboli sílu F_{max} . Průběh testu popisuje Obrázek 34 a 35. Výsledky byly zpracovány do tabulek. Zkušební těleso bylo uchyceno ze dvou stran za část kompozitního výrobku pomocí dvou upínek (Obrázek 34 a 35).



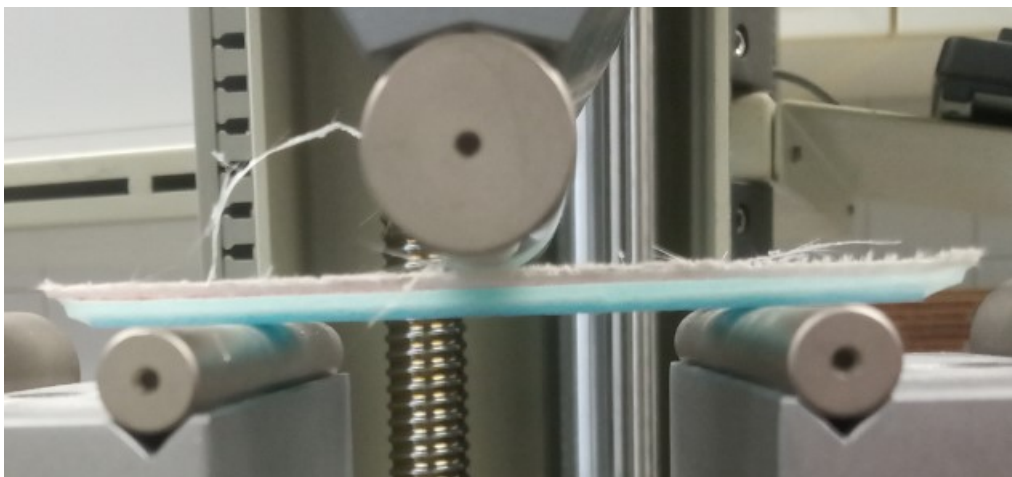
Obrázek 30. Test odlupu před zatížením



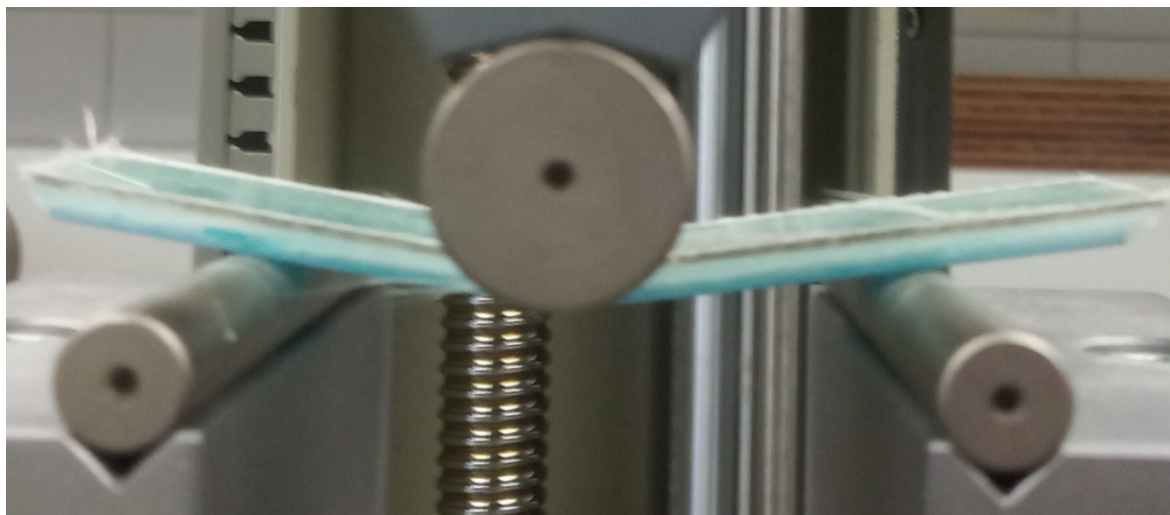
Obrázek 31. Test odlupu po zatížení

8.2 Zkouška soudržnosti v tříbodovém ohybu

Tříbodová zkouška ohybem se realizovala při rychlosti $v = 5 \text{ mm/min}$ a laboratorní teploty 25 °C . Vzdálenost podpor bylo 64 mm . Zkušební tělísko se vložilo doprostřed mezi podpěry. Působení síly bylo směřováno na střed zkušební tělesa.



Obrázek 32. Zkouška tříbodovým ohybem před deformací



Obrázek 33. Zkouška tříbodovým ohybem po deformaci

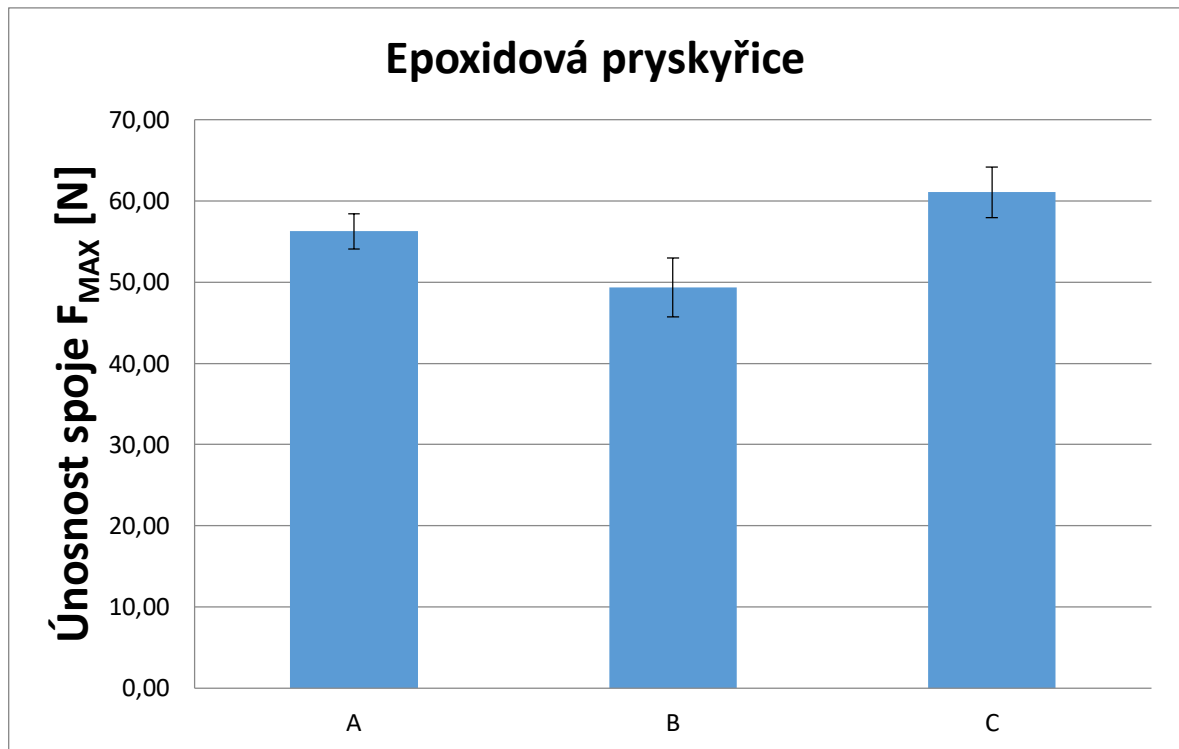
9 VÝSLEDKY A DISKUZE

Soudržnost materiálu byla stanovena na základě dvou testů. Testem odlupu se porovnávají druhy pryskyřic s typy vytisknutých materiálů a zkouškou třibodového ohybu je pro zjištění dovolené síly F_{MAX} v ohybu a charakteru poruchy.

9.1 Test odlupu pro epoxidovou pryskyřici

Tabulka 3. Test odlupu plastového dílu pro epoxidovou pryskyřici

Epoxidová pryskyřice			
Materiál	ASA	Nylon	CPE
číslo měření n	F max [N]		
1	56,7	34,4	77,1
2	52,7	42,7	51,5
3	60,8	68,6	55,7
4	56,4	51,3	62,7
5	66,5	52,9	61,2
6	59,6	42,4	58,3
7	47,3	54,5	59,4
8	50,1	48	63,6
Průměr	56,26	49,35	61,19
Směrodatná odchylka	2,19	3,61	2,66
Maximum	66,50	68,60	77,10
Minimum	47,30	34,40	51,50
Variační koeficient [%]	3,89	7,32	4,35



Obrázek 34. Únosnost spojů pro epoxidovou pryskyřici

Epoxidová pryskyřice vykazuje podobné výsledky u všech tří testovaných materiálů. Největší únosnost spoje má vzorek C, nejmenší únosnost spoje má vzorek B. Hodnoty vzorku A leží ve středu mezi největší a nejmenší únosností spoje (mezi vzorkem C a vzorkem B).

- **Únosnost vzorku A**

U vzorku A je průměrná únosnost 56,26 N. Naměřené maximum hodnoty únosnosti má 66,5 N a minimum odpovídá hodnotě 47,3 N. Všechny hodnoty vzorku A jsou přibližně stejné a žádná z nich není vysoce vzdálená od průměru.

- **Únosnost vzorku B**

Hodnoty vzorku B jsou průměrně menší jak u Vzorku A, avšak její maximum je větší ($F_{MAX} = 68,6$ N). Naměřené hodnoty vzorku B jsou více vzdálená od průměru, z těchto výsledku se dá posoudit, že pryskyřice byla nerovnoměrně rozetřena po celé desce kompozitu.

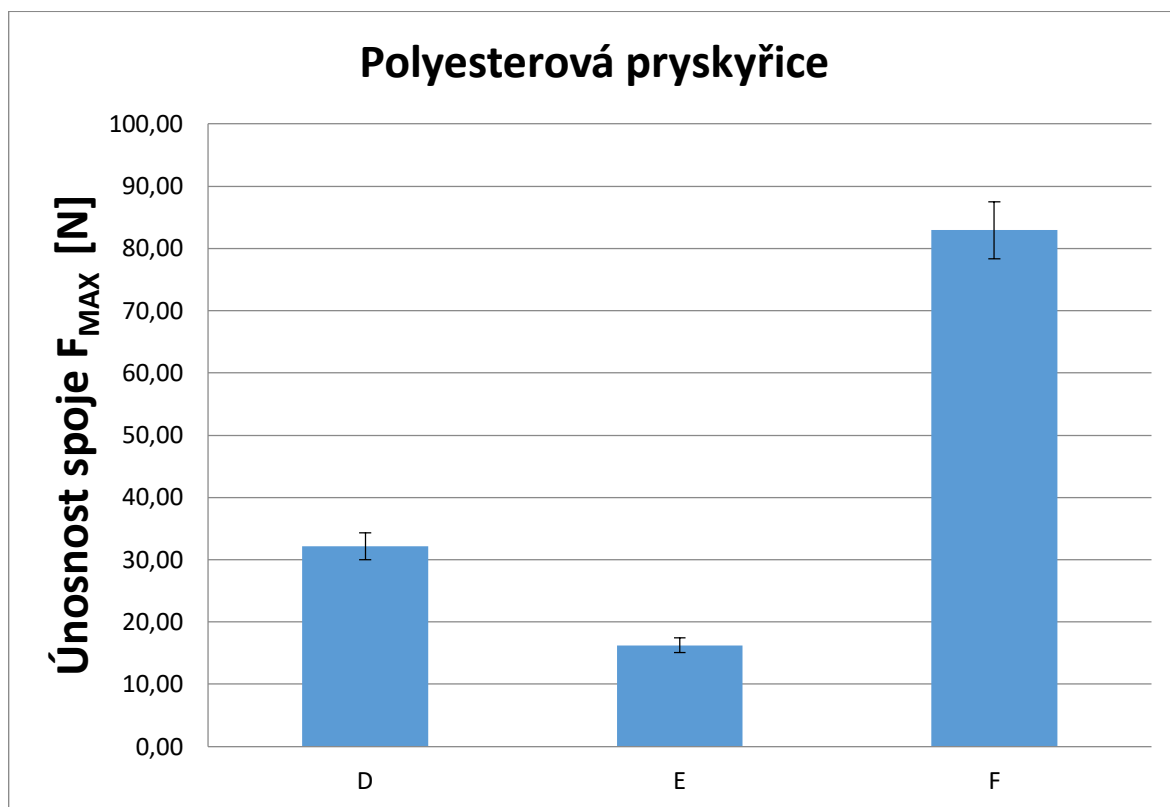
- **Únosnost vzorku C**

Z naměřených dat vyplývá, že hodnota průměru je největší ($F_{MAX} = 61,19$ N) stejně jako naměřené maximum i minimum. Rozptyl vzorku C od průměru je menší jak u vzorku B ale menší jak u vzorku A.

9.2 Test odlupu pro polyesterovou pryskyřici

Tabulka 4. Test odlupu plastového dílu pro polyesterovou pryskyřici

Polyesterová pryskyřice			
Materiál	ASA	Nylon	CPE
číslo měření n	F_{MAX} [N]		
1	21,1	17,1	72,6
2	34,1	12,5	94,6
3	34,5	19,1	81
4	31,2	-	101
5	39,8	-	73,1
6	32,2	-	66,8
7	-	-	91,5
Průměr	32,15	16,23	82,94
směrodatná odchylka	2,18	1,20	4,57
Maximum	39,80	19,10	101,00
Minimum	21,10	12,50	66,80
Variační koeficient [%]	6,79	7,37	5,51



Obrázek 35. Únosnost spojů s polyesterovou pryskyřicí

Polyesterová pryskyřice dokládá značně jiné výsledky jak pryskyřice epoxidová. Zde jsou výsledky odlišné, maximum (vzorek F) je pětikrát větší jak minimum (vzorek E). Naměřené hodnoty polyesterové pryskyřice jsou průměrně menší jako u pryskyřice epoxidové, avšak zde byla naměřena největší soudržnost získaná testem odlupu (vzorek F).

- **Únosnost vzorku D**

Hodnoty únosnosti vzorku D mají malý rozptyl od průměru ($F_{MAX} = 32,15$ N). Hodnoty vzorku D jsou přibližně dvakrát větší jako rozměry vzorku E.

- **Únosnost vzorku E**

Z naměřených dat vyplývá, že vzorek E má vůbec ty nejmenší naměřené hodnoty. Má nejmenší průměr ($F_{MAX} = 16,23$ N) ale také nejmenší minimum, maximum a rozptyl od průměru. Hodnoty vzorku E jsou ze všech šesti vzorků ty nejmenší a vykazují nejnižší soudržnost materiálu.

- **Únosnost vzorku F**

Hodnoty vzorku F jsou přesným opakem hodnot vzorku E. Je zde naměřená největší soudržnost materiálu a taky se jedná o jediný zkušební vzorek, který má maximum větší jak 100 N. Průměr byl naměřen ($F_{MAX} = 32,15$ N) jako vůbec největší ale také maximum, minimum i rozptyl.

9.3 Tříbodová zkouška ohybem

Tabulka 5. Tříbodová zkoušky ohybem

Ohybová zkouška	
číslo měření n	F_{MAX} [N]
1	509
2	517
3	494
4	537
5	504
6	537
7	502
Průměr	514,29
směrodatná odchylka	6,01
Maximum	537,00
Minimum	494,00
Variační koeficient [%]	1,17

Tříbodová zkouška ohybem byla provedena pouze pro materiál CPE s kombinací s epoxidovou pryskyřicí. Soudržnost materiálu je zde mnohonásobně vyšší jak u testu odlupu. Je to proto, že u tříbodové zkoušky ohybem působila síla do středu kompozitního materiálu spojeného s tělesem vzniklým aditivní výrobou (mnohem větší styčná plocha mezi kompozitem a plastem), kdežto u testu odlupu působila síla na rozhraní materiálu mezi kompozitním výrobkem a vytisknutým tělesem, a proto je zde soudržnost materiálu mnohonásobně menší. Průměrná hodnota únosnosti je 514,29 N. Všechny naměřené hodnoty jsou blízké k průměru, což určuje malý rozptyl.

10 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo stanovit soudržnost plastů vzniklých aditivní výrobou spolu s vybranými typy pryskyřic u kompozitů. Testované druhy pryskyřic byly epoxidové a polyesterové. Tato práce se zaměřuje na výrobu kompozitu pomocí ruční laminace pod vakuovou fólií.

S pomocí 3D tisku bylo možné testovat různé druhy materiálů s vybranými typy pryskyřic bez dodatečného obrábění. Práce je rozdělena na dvě části.

Teoretická část se zabývá základním popisem kompozitních materiálů, konkrétně vláken, matric a technologií. V další části se zabývá aditivní výrobou, přesněji základními typy 3D tiskáren jako FDM nebo SLA.

V praktické části je nejprve uveden postup a způsob výroby vytisknutých tělísek. Jsou zde uvedeny materiály a druhy pryskyřic pro vznik kompozitního materiálu, postup výroby kompozitního materiálu až po nařezání na zkušební vzorky, které jsou otestovány testem odlupu i tříbodovou zkouškou ohybu. Soudržnost materiálu byla stanovena na základě výsledků uvedených v tabulkách, grafech a následně byla provedena diskuze výsledků.

Epoxidová pryskyřice vypovídá o stálejších průměrných únosnostech spoje, avšak z naměřených dat vyplývá, že nejlepší soudržnost materiálů vykazuje materiál CPE v kombinaci s polyesterovou pryskyřicí. Materiál CPE dokládá nejlepší výsledky soudržnosti a to i u epoxidové pryskyřice. Hodnoty Nylonu určují nejmenší soudržnost materiálu. U obou příkladů pryskyřic je pořadí soudržnosti stejná, nejlepší soudržnost má materiál CPE, po ní následuje materiál ASA a nejhorší soudržnost s pryskyřicemi u kompozitů vykazuje Nylon.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KLOSKI, Liza Wallach a KLOSKI, Nick. *Začínáme s 3D tiskem*. Vyd.1. Brno: Albatros Media a. s., 2017. ISBN 978-80-251-4876-1
- [2] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. Vyd.1. Praha: Nakladatelství Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6
- [3] KOŘÍNEK, Zdeněk [online]. Dostupné z: <<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>
- [4] HOMOLA, J. Vydavatelství nová média, s. r. o., 2014. 3D-tisk.cz [online]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/>
- [5] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. PRUSA RESEARCH S. R. O. *Základy 3D tisku 2014* [online] Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/>
- [6] GEBHARDT, A., HOTTER, J.-S., *Additive Manufacturing 3D printing for Prototyping and Manufacturing*, Cincinnati, Ohio: Hanser, 2016, ISBN 978-1-56990-582-1
- [7] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály- modely a vlastnosti*. Vyd. 1. Liberec: Vysokoškolský podnik Liberec, s. r. o., 2005. ISBN 80-7083-972-4
- [8] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Polymery a kompozity*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČUVT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4
- [9] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 80-214-2443-5
- [10] FABBSTER [online]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/fdm-technology>
- [11] 3D tiskové materiály. [online]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>
- [12] Specifikace a druhy jednotlivých technologií tisku [online]. Dostupné z: http://talmar.masteride.cz/Modul_EP_pf/EP-vyuka10.html
- [13] BARNATT, CH.: *3D Printing: The Next Industrial Revolution*, United Kingdom: Crea Space Independent Publishing Platform, 2013. ISBN: 9781484181768
- [14] Materiál pro 3D [online]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz>
- [15] [online]. Dostupné z: <https://www.3dprinter gear.com.au>

- [16] [online]. Dostupné z: Havel-composites.com
- [17] <https://shop.boukal.cz/3d-tiskarny-a-prislusenstvi/3d-tiskarna-zortrax-m200/>
- [18] CAMPBELL, F., Structural Composite Materials, Ohio, ASM, United Kingdom: C Space Independent Publishing Platform, 2013 ISBN: 9781484181768
- [19] Kompozity.info [online]. *Ztráta stability kompozitu*. Dostupné z: http://www.kompozity.info/clanky/compdb/ztrata_stability_kompozitu.pdf
- [20] Aditivní technologie. [online] Dostupné z: www.custompartner.com/wu/additive-fabrication
- [21] Materiály pro 3D tisk. [online]. Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>.
- [22] [online]. Dostupné z https://3dwiser.com/3d-tiskarny/sla-dlp/formlabs-form-2/?gclid=CjwKCAjwiZnnBRBQEiwAcWKfYILVA7mS1S2ZzKFMn6-VJ0lSYV9D2DxejnVlf40W57OqnKAE_-hlVxoCL1oQAvD_BwE

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FDM	Fused deposition modeling
SLA	Stereolitografický aparát
DLP	digital light processing
UP-R	nenasyčená polyesterová pryskyřice
EP-R	nenasyčená epoxidová pryskyřice
PF-R	Fenolické pryskyřice
VE-R	Vinylesterové pryskyřice
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PET	Polyethyléntereftalát
PC	Polykarbonát
N	Newton
F_{MAX}	Maximální zatěžující síla
mm	Milimetr
mm^2	Milimetr čtvereční
°C	Stupeň Celsia
%	Procento
T_g	Teplota skelného přechodu
T_z	Teplota tepelného rozpadu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku [3]	14
Obrázek 2. Výroba skleněného vlákna tažením z trysek [2]	15
Obrázek 3. Dělení vazeb vyztužujících tkanin [3]	15
Obrázek 4. Výroba aramidových vláken [2].....	16
Obrázek 5. Viskozita termoplastů a termosetů závislé na teplotě [2]	18
Obrázek 6. Proces vytvrzování nenasycené polyesterové pryskyřice [2]	20
Obrázek 7. Schéma výroby jednosměrného prepregu [2]	23
Obrázek 8. Schéma ruční laminace [16].....	24
Obrázek 9. Průmyslové rozdělení aditivní výroby [15]	27
Obrázek 10 Princip FDM tiskárny [12].....	28
Obrázek 11 Schéma Extrudéru [1].....	30
Obrázek 12 Struna na cívce pro FDM [11]	31
Obrázek 13 Princip SLA tisku [4].....	32
Obrázek 14. Tiskárna SLA typu DLP [1].....	34
Obrázek 15. Laserová tiskárna FormLabs Form 2 a detail laserového systému [22]	34
Obrázek 16. 3D tiskárna Autodesk Ember (technologie DLP) [5]	35
Obrázek 17. Vlasová struktura vytisknutá na 3D tiskárně Ember [5].....	35
Obrázek 18. Skelná tkanina	40
Obrázek 19. Polyesterová pryskyřice	41
Obrázek 20. 3D tiskárna Zortrax M200 [15]	43
Obrázek 21. Tělísko vytvořené v 3D programu.....	43
Obrázek 22. Reálné tělísko vzniklé aditivní výrobou	43
Obrázek 23. Použité pomůcky a nástroje	45
Obrázek 24. Vlákná prosycené pryskyřicí s položenými vytisknutými součástky pro test odlupu.....	46
Obrázek 25. Deska při procesu s vytvrzování	46
Obrázek 26. Hotová deska po odformování	47
Obrázek 27. Postup výroby desky s tělísky pro zkoušku ohybem.....	48
Obrázek 28. Připravené těleso pro test odlupu	49
Obrázek 29. Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456	50
Obrázek 30. Test odlupu před zatížením	51
Obrázek 31. Test odlupu po zatížení.....	52

Obrázek 32. Zkouška třibodovým ohybem před deformací	52
Obrázek 33. Zkouška třibodovým ohybem po deformaci	53
Obrázek 34. Únosnost spojů pro epoxidovou pryskyřici	55
Obrázek 35. Únosnost spojů s polyesterovou pryskyřicí	56

SEZNAM TABULEK

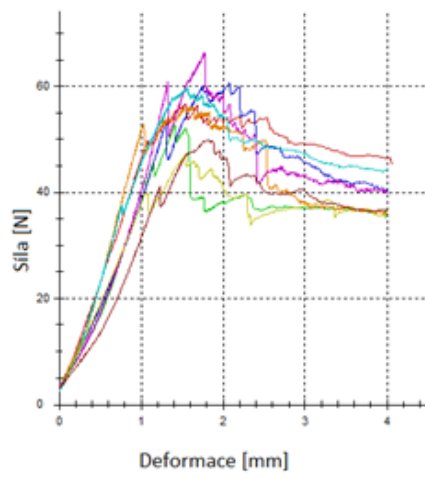
Tabulka 1. Značení zkušebních těles.....	49
Tabulka 2. Technické údaje stroje	51
Tabulka 3. Test odlupu plastového dílu pro epoxidovou pryskyřici.....	54
Tabulka 4. Test odlupu plastového dílu pro polyesterovou pryskyřici	56
Tabulka 5. Tříbodová zkoušky ohybem	58

SEZNAM PŘÍLOH

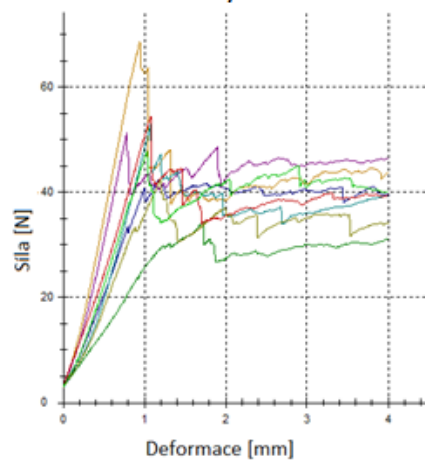
- Příloha PI Výsledky epoxidové pryskyřice na trhacím stroji
- Příloha PII Výsledky polyesterové pryskyřice na trhacím stroji
- Příloha PIII Výsledky tříbodového ohybu na trhacím stroji

PŘÍLOHA P I:

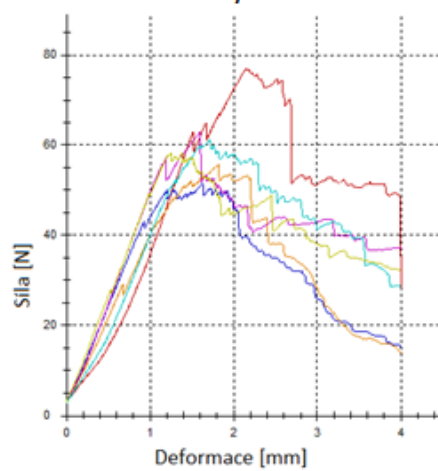
Vzorky A



Vzorky B

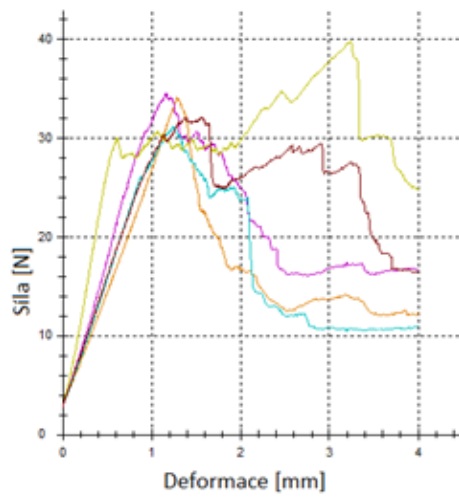


Vzorky C

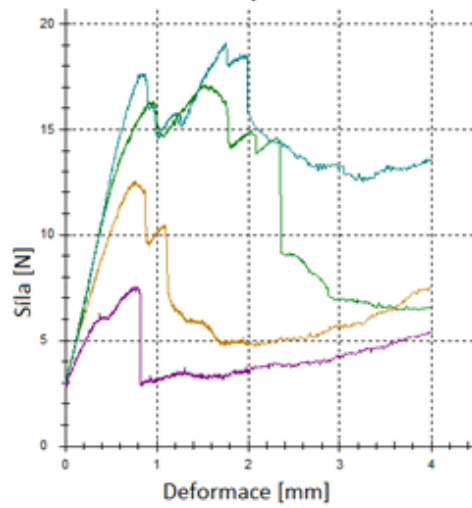


PŘÍLOHA P II:

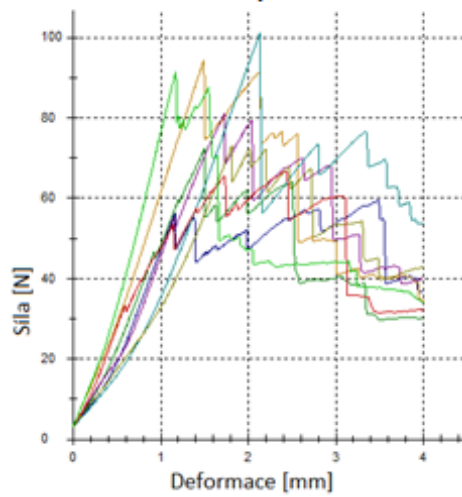
Vzorky D



Vzorky E



Vzorky F



PŘÍLOHA P III:

