

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

3D TISK KOMPOZITŮ S TERMOPLASTICKOU MATRICÍ
3D PRINTING OF THERMOPLASTIC MATRIX COMPOSITES

AUTOR: PETR ŠIFALDA

STUDIJNÍ PROGRAM: KONSTRUKCE A VÝROBA SOUČÁSTÍ Z PLASTŮ
A KOMPOZITŮ

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. RNDr. PETR ŠPATENKA, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šifalda** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **419934**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce a výroba součástí z plastů a kompozitů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

3D tisk kompozitů s termoplastickou maticí

Název diplomové práce anglicky:

3D printing of thermoplastic matrix composites

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu metod 3D tisku kompozitních materiálů
- 2) Navrhněte jednoduchou metodu úpravy 3D tiskárny umožňující tisk kompozitních materiálů a tiskárnu realizujte
- 3) Proveďte pilotní ověření funkce
- 4) Vytiskněte vzorek a stanovte jeho základní mechanické parametry

Seznam doporučené literatury:

- [1] Krishan K. Chawla: Composite Materials. Science and Engineering. Third Edition. Springer 2013
- [2] Daniel Gay: Composite materials : design and applications. CRC Press/Taylor & Francis, 2015
- [3] Xin Wang et al: 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. Composites Part B 110 (2017) 442-458

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

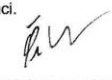
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Obsahem této diplomové práce je návrh konstrukčního řešení a výroba speciální filamentové 3D tiskárny na kompozitní materiály s termoplastickou maticí vyztuženou dlouhým vyztužujícím vláknem. V teoretické části se práce zabývá popisem současných aditivních technologií a jejich možnostmi v oblasti 3D tisku dílů z kompozitních materiálů.

Klíčová slova

aditivní technologie, termoplast, kompozit, dlouhá vlákna, FDM

Annotation

This diploma thesis focuses on designing and manufacturing of specialized FDM 3D printer for composite materials which consists of thermoplastic matrix and continuous reinforcement fiber. In theoretical part this thesis is focused on description of current additive technologies and their possibilities in 3D printing of parts from composite materials.

Keywords

additive technology, thermoplastics, composite, continuous fiber, FDM

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. RNDr. Petrovi Špatenkovi, CSc. za vedení diplomové práce, za odborné rady a cenné připomínky při jejím vypracování, dále své přítelkyni a rodině za jejich podporu při psaní diplomové práce a během celého svého studia.

Obsah

1	Seznam zkratk a pojmů.....	9
2	Úvod.....	10
3	Aditivní technologie.....	11
3.1	Charakteristika technologie.....	11
3.2	Etapy výroby pomocí aditivních technologií.....	12
3.2.1	Preprocessing.....	12
3.2.2	Processing.....	12
3.2.3	Postprocessing.....	13
3.3	Rozdělení.....	13
3.3.1	Nekovové.....	13
3.3.2	Kovové.....	15
4	3D tisk kompozitů.....	17
4.1	Rozdělení.....	17
4.1.1	Částicové kompozity + Kompozity s krátkými vlákny.....	17
4.1.2	Kompozity s dlouhými vlákny.....	18
4.1.3	Laminátové kompozity.....	19
4.2	Mechanické vlastnosti kompozitů s dlouhými vlákny.....	19
5	Konstrukce FDM tiskárny na kompozitní materiály.....	22
5.1	Koncept.....	22
5.2	Konstrukční řešení dílčích komponent.....	23
5.2.1	Rám.....	23
5.2.2	Lineární pojezdy.....	24
5.2.3	Pohony.....	25
5.2.4	Základní deska.....	26
5.2.5	Zdroj.....	26
5.2.6	Drivery krokových motorů.....	27

5.2.7	Vyhřívaná podložka	27
5.2.8	Endstopy	28
5.2.9	Vyrobené díly	28
5.3	Konstrukční řešení tiskové hlavy – verze 1	31
5.3.1	Hotend.....	31
5.3.2	Extruder výztuže.....	32
5.3.3	Střihací mechanismus	33
5.4	Konstrukční řešení tiskové hlavy – verze 2	34
5.4.1	Hotend.....	34
5.4.2	Extruder výztuže.....	35
6	Nastavení firmwaru	37
7	Nastavení slicovacího softwaru.....	39
8	Zásady tvorby modelů pro tisk z kompozitního materiálu	43
9	Závěr.....	44
10	Doporučení pro budoucí práce	45
11	Bibliografie	46
12	Seznam obrázků.....	47
13	Seznam příloh.....	50



1 Seznam zkratk a pojmů

ABS	[-]	Akrylonitrilbutadienstyren
CCFR	[-]	continuous carbon fiber reinforcement (dlouhé uhlíkové vyztužující vlákno)
CF	[-]	carbon fiber (uhlíkové vlákno)
DMLS	[-]	direct metal laser sintering
EBM	[-]	electron beam melting
FDM	[-]	fused deposition modeling
filament	[-]	polotovár pro výrobu pomocí FDM tiskáren
g-code	[-]	zdrojový kód pro ovládání 3D tiskáren
GF	[-]	glass fiber (skleněné vlákno)
HIP	[-]	izostatické lisování za tepla
PEEK	[-]	Polyetereterketon
PET	[-]	Polyetylentereftalát
PLA	[-]	polylactic acid (kyselina polymléčná)
SLA	[-]	Stereolithography
slicovací program	[-]	program určený k vygenerování g-code
SLS	[-]	selective laser sintering



2 Úvod

Aditivní technologie se v poslední době dostávají stále více do popředí v mnoha různých průmyslových odvětvích. Důvodem je například obrovská variabilita v designu výrobků, minimalizace odpadního materiálu, jednoduchá a relativně levná výroba. Běžně používané materiály pro aditivní výrobu jsou polymery a kovy v různých formách – prášek, struna, pryskyřice. Aplikace výrobků je však kvůli horším mechanickým vlastnostem omezená [1]. Jedním z řešení je využití kompozitních materiálů, které mohou díky syntetickému účinku jednotlivých fází mít jinak nedosažitelné vlastnosti. Kompozity jsou nejčastěji tvořeny dvěma fázemi – matricí a výztuží. Matrice má za úkol přenášet zatížení na výztuž a chránit ji proti vnějším podmínkám. Výztuž plní v kompozitu pevnostní funkci. Výhodou těchto materiálů je vysoká pevnost při zachování nízké hmotnosti, což lze výhodně uplatnit například v leteckém nebo automobilovém průmyslu. V oblasti aditivní výroby jsou v současné době používány převážně částicové kompozity a kompozity s krátkými vlákny [2]. Výroba kompozitů s dlouhými vlákny 3D tiskem zatím nebyla plně prozkoumána a poskytuje tedy vysoký potenciál pro dosažení nových možností.

V teoretické části se tato práce zabývá obecným přehledem aditivních technologií a současnými možnostmi aditivní výroby dílů z kompozitních materiálů.

Cílem praktické části této diplomové práce je konstrukce funkční FDM tiskárny na kompozitní materiály s termoplastovou matricí a následné otestování jejich mechanických vlastností.



3 Aditivní technologie

3.1 Charakteristika technologie

Je to technologie výroby, při které se pro dosažení požadovaného výsledného tvaru výrobku používá postupné přidávání materiálu, místo jeho odebírání. Metoda je obecně známá pod pojmem 3D tisk. Oproti konvenčním metodám výroby přináší 3D tisk nesporné výhody, např. v úspoře času nebo odpadního materiálu. 3D tiskem je navíc možno vyrobit předměty, které jsou konvenčním třískovým obráběním nevyrobitelné. Je tedy možné si do posledního detailu optimalizovat design tisknutého komponentu. Další hlavní výhodou je nezávislost na složitosti výrobku – náklady na výrobu neurčuje složitost geometrie výrobku, ale především doba tisku. Mezi hlavní nevýhody patří rozdílné mechanické vlastnosti výrobku, oproti konvenčním metodám výroby. Při výrobě tvarově jednoduchých součástí je proces výroby mnohem delší. Pro plné využití potenciálu aditivní výroby je tedy nutné aplikovat technologii v malosériové výrobě, výrobě prototypů, nebo individuální výrobě. Ačkoliv se technologie aditivní výroby dostává do popředí až v posledních letech, byl první prototyp SLA tiskárny vytvořen v roce 1984 a technologie stereolitografie byla patentována v roce 1986 [1]. Aditivní technologie se dělí, z hlediska použitých materiálů, na kovové a nekovové. Mezi kovové se řadí například technologie DMLS, EBM. Mezi nekovové se řadí například technologie SLA, FDM, SLS [1]. Obr. 1-3 zobrazuje příklady dílů vyrobených pomocí 3D tisku.



Obrázek 1: díl vyrobený pomocí 3D tisku



Obrázek 2: díl vyrobený pomocí 3D tisku



Obrázek 3: díl vyrobený pomocí 3D tisku

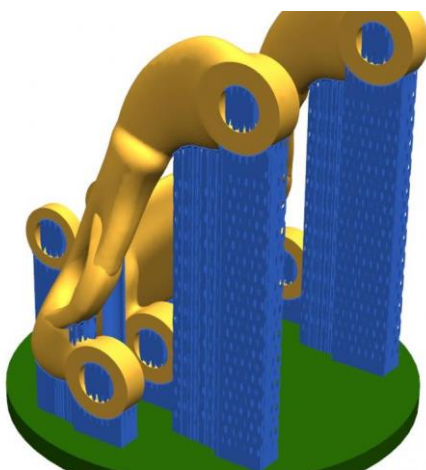


3.2 Etapy výroby pomocí aditivních technologií

Postup výroby pomocí aditivních technologií se dá zobecnit do třech základních fází: preprocessing – příprava 3D dat, processing – samotná výroba, postprocessing – dokončovací operace.

3.2.1 Preprocessing

První fáze výroby zahrnuje tvorbu 3D modelu a jeho následnou diskretizaci na lineární polygonální model. Je důležité, aby model po této transformaci neobsahoval žádné chyby, jako např. neuzavřený objem, stěny s nulovou tloušťkou, nebo překrývající se elementy. Z modelu se následně pomocí slicovacích programů (Cura, Slic3r, ...) vytvoří gcode, kterým je řízen celý proces aditivní výroby. Správné nastavení parametrů tisku bývá často obtížné zvládnout na první pokus, proto se v poslední době výrobci simulačních softwarů zaměřují i na simulaci procesu aditivní výroby, a celý proces je tak možno důkladně optimalizovat. Na obr. 4 můžeme vidět slicovaný model připravený pro 3D tisk.



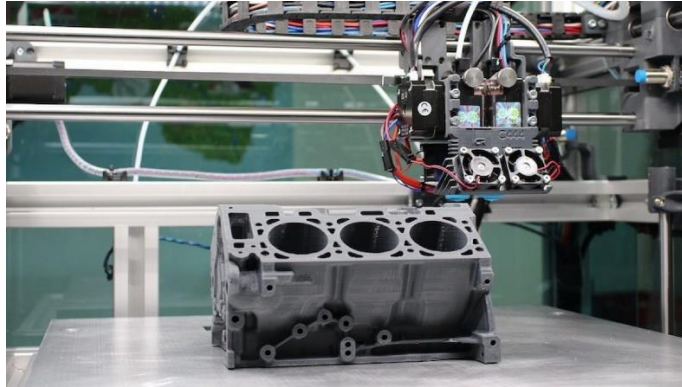
Obrázek 4: slicovaný model

3.2.2 Processing

Druhá fáze spočívá v samotné výrobě součásti. Celý proces výroby je plně automatizován, a kromě přípravy zařízení nevyžaduje žádnou obsluhu. Výrobní čas



se, v závislosti na velikosti dílu a použité technologii, pohybuje v řádech hodin, až dnů. Na obr. 5 je zobrazen samotný proces výroby metodou FDM.



Obrázek 5: proces výroby pomocí metody FDM

3.2.3 Postprocessing

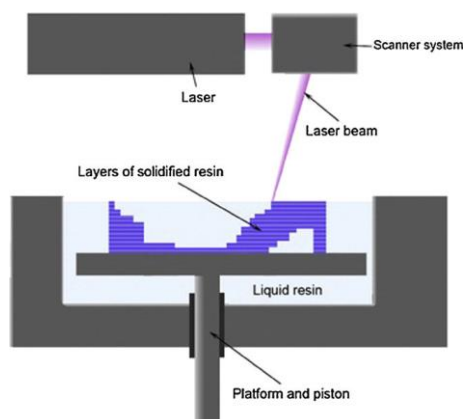
Postprocessing je poslední část výrobního cyklu. Vzhledem k tomu, že může být časově i technologicky náročná, představuje jednu z nevýhod aditivní výroby. V případě práškových tiskáren je nutno odstranit přebytečný materiál. Některé díly je po výrobě potřeba vytvrdit, např. pomocí technologie HIP, nebo UV záření. U velké většiny výrobků je, nezávisle na použité technologii výroby, nutné odstranit podpory. Posledním krokem bývá povrchová úprava – broušení, lakování, barvení.

3.3 Rozdělení

3.3.1 Nekovové

3.3.1.1 SLA

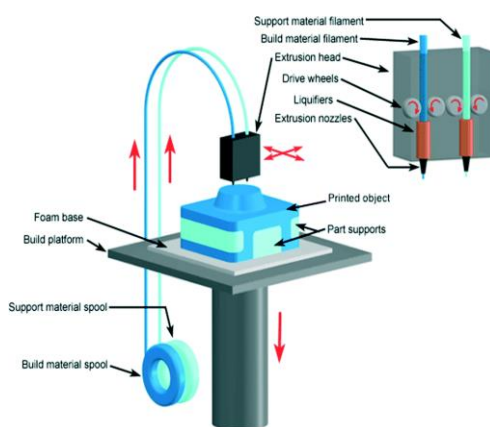
Nejstarší a zároveň jedna z nejpřesnějších technologií 3D tisku. Teoretická přesnost odpovídá velikosti molekuly použitého materiálu. Výroba probíhá postupným vytvrzováním fotopolymerové pryskyřice UV zářením, po jednotlivých vrstvách. Technologie je používána převážně pro výrobu menších dílů. Touto metodou není možné vyrobit uzavřené dutiny – nevytvrzená pryskyřice se z nich už nedostane. Výhodou metody je vysoká kvalita povrchu vytištěných dílů [1]. Obr. 6 zobrazuje schéma SLA metody tisku.



Obrázek 6: schéma metody SLA

3.3.1.2 FDM

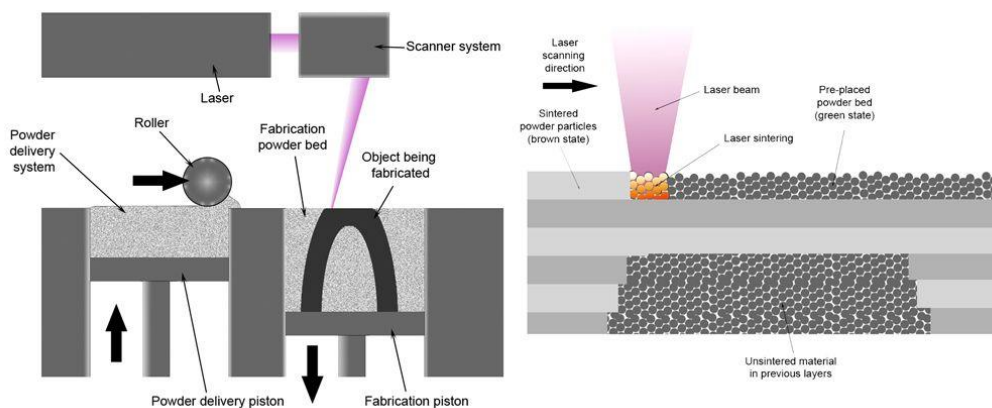
Tato technologie je určena převážně ke zpracování termoplastů. Materiál je pomocí pohyblivé tiskové hlavy postupně taven a nanášen vrstvu po vrstvě a téměř okamžitě opět tuhne. Mezi běžně používané materiály patří například PLA, ABS, PET-G. Kvalita a vlastnosti vytištěných dílů jsou ovlivněny velkým množstvím parametrů tisku, jako například, výška vrstvy, průměr nanášecí trysky, orientace tisknutého dílu, rychlost, chlazení. Vlivem fluktuace tepelného pole může být vytištěný díl vystaven velkému vnitřnímu pnutí, které v krajních případech může způsobit delaminaci vrstev. Výhodou této technologie je nízká cena a jednoduchá a levná údržba. Nevýhodou je špatná kvalita povrchu vytištěných dílů a pomalý proces výroby [1]. Obr. 7 zobrazuje schéma FDM metody tisku.



Obrázek 7: schéma metody FDM

3.3.1.3 SLS

Tato technologie je určena ke zpracování materiálu v podobě termoplastového prášku. Prášek je pomocí laseru zahříván na teplotu tání a po jednotlivých vrstvách je spečen dohromady v homogenní těleso. Během procesu je celý objem prášku předehřán na teplotu těsně pod teplotu tání pro usnadnění natavení a zajištění lepšího spojení jednotlivých vrstev. Výsledné vytištěné díly mají hrubší povrch a je tedy nutné jeho vyhlazení. Výhodou je možnost recyklace nespečeného prášku a vyšší rychlost [1]. Obr. 8 zobrazuje schéma SLS metody tisku.



Obrázek 8: schéma metody SLS

3.3.2 Kovové

3.3.2.1 Materiál

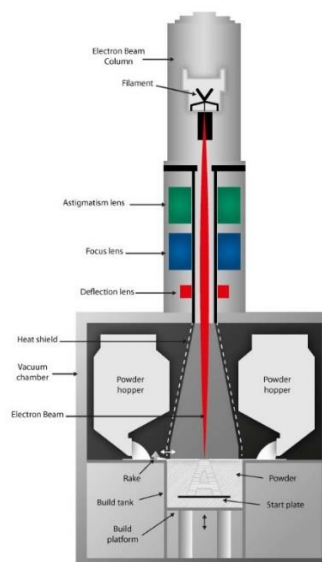
Pro metalický 3D tisk se používá plynem atomizovaný prášek s nezoxidovaným povrchem. Velikost zrn se pohybuje v rozmezí 10-40 um pro maximální objemovou hustotu prášku a maximální vyplnění prostoru. Mezi nejpoužívanější materiály patří hliníkové slitiny (AlSi10Mg), titanové slitiny (Ti6Al4V) a oceli. Ne všechna zařízení jsou vhodná pro tisk všech materiálů. Například reaktivní materiály (Ti, Al) je nutné tisknout v ochranné atmosféře, neboť reagují se vzdušným kyslíkem, což má za následek vytváření nežádoucích oxidických vrstev, degradaci výrobku, a nebezpečí výbuchu. Při nevhodně nastavených tiskových podmínkách se v materiálu vyskytuje porozita, která výrazně degraduje mechanické vlastnosti, způsobuje netěsnost výrobků a snižuje korozivzdornost [1].

3.3.2.2 DMLS

Technologie kovového 3D tisku, která využívá postupné natavování kovového prášku pomocí laseru. V principu je technologie velmi podobná SLA. Ve stavěcí komoře je nanesen prášek o výšce jedné tiskové vrstvy. Následně je laserem spečen prášek na požadovaných místech, platforma s práškem sjede o výšku jedné tiskové vrstvy níže a celý proces se opakuje. Při vhodném technologickém zpracování má vytisknutá součást stejné mechanické vlastnosti jako při výrobě kováním. Převážně se jedná o odstranění vnitřního pnutí [1]. Schematicky je metoda stejná jako SLS (Obr. 8).

3.3.2.3 EBM

Tato technologie využívá, stejně jako DMLS, princip postupného natavování kovového prášku. Celý proces však probíhá ve vakuové komoře za zvýšené teploty okolí. Zdrojem tepla je místo laseru elektronový paprsek. Výhodou technologie je vysoká rychlost výroby (až 60x vyšší než DMLS) a vysoká kvalita výrobků, bez nutnosti následného tepelného zpracování [1]. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena. Obr. 9 zobrazuje schéma EBM metody tisku.



Obrázek 9: schéma metody EBM



4 3D tisk kompozitů

4.1 Rozdělení

Pomocí aditivních technologií lze vyrobit čtyři druhy polymerových kompozitů – částicové kompozity, kompozity s krátkými vlákny, kompozity s dlouhými vlákny, laminátové kompozity.

4.1.1 Částicové kompozity + Kompozity s krátkými vlákny

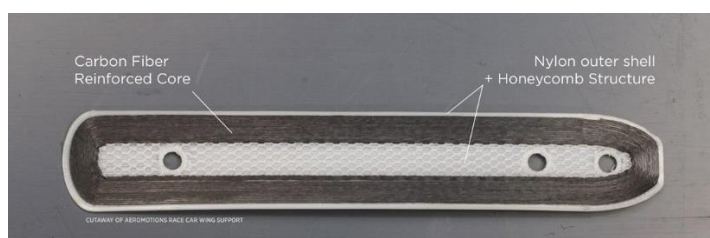
Pro výrobu dílů z těchto dvou druhů kompozitů lze použít stejnou metodu zpracování, což je výroba kompozitního materiálu ve formě filamentu (pro FDM), pryskyřice (pro SLA), nebo prášku (pro SLS) ještě před vstupem do zařízení pro 3D tisk. Při procesu aditivní výroby už tedy dochází pouze ke zpracování tohoto materiálu, a ne k jeho výrobě. Je tak možno tisknout kompozitní součásti na klasickém zařízení, bez nutnosti speciálních konstrukčních úprav. Matrici tvoří běžně používaný polymer, který je vyztužen různými materiály, které mají formu částic, nebo krátkých vláken. Částicové výtzuže jsou levné, jednoduché na výrobu a lze je snadno smísit s matricí v pevné (pro FDM, SLS), nebo tekuté formě (pro SLA). Při použití mikročástic je problém v zajištění rovnoměrného rozložení výtzuže v matrici. Lze tedy pouze omezeně predikovat finální složení a vlastnosti kompozitu. I přes tyto problémy vykazují kompozitní materiály lepší mechanické a tepelné vlastnosti [2]. Například u velkoformátových výtisků (zejména z ABS) je jedním z problémů výrazné smrštění po ochlazení, jehož vlivem může v krajních případech dojít až k delaminaci výrobku. Toto smrštění lze razantně snížit použitím měděné, nebo železné částicové výtzuže, která má za následek zvýšení tepelné vodivosti výrobku. Dále například materiál Nylon-6- Al_2O_3 vykazuje výrazně lepší tribologické vlastnosti [2]. Kompozity s termoplastovou matricí (filament, prášek) vykazují obecně horší mechanické vlastnosti. Je to způsobeno porozitou a špatnou adhezí mezi matricí a výtzuží. Při použití reaktoplastové matrice je adheze s výtzuží mnohem silnější, protože tekutá pryskyřice smáčí vlákna, popř. částice, výtzuže a vytvoří s nimi chemickou vazbu [3].



4.1.2 Kompozity s dlouhými vlákny

V oblasti 3D tisku kompozitních součástí s dlouhými kompozitními vlákny neexistuje v současnosti příliš mnoho možností. Mnoho studií se zabývá metodou výroby, při níž do tiskové hlavy vstupují odděleně matrice a vlákno, následně se přímo v hlavě smísí a vystupují jednou tryskou [4] [5]. Při použití této metody může docházet k problematickému spojení matrice s vláknem vlivem špatné adheze a porozitou, kterou obecně FDM tisk vykazuje [3]. Výhodou je veliká variabilita v použitých materiálech jak pro matrici, tak i pro výztuž. Kritickým faktorem při výrobě je index toku matrice, který přímo ovlivňuje schopnost impregnace vlákna. Jedním z nejdůležitějších procesních parametrů tisku je tedy teplota. Dalším důležitým parametrem je tlak. Vysoký tlak částečně odstraňuje jeden z problémů FDM tisku – porozitu. Tento parametr je však obtížné sledovat, popř. regulovat [5]. Prozatím neexistuje žádné komerční zařízení schopné výroby kompozitních součástí touto metodou.

Druhou možností výroby kompozitů s dlouhými vlákny je využití výztuže ve formě prepregů – vlákna jsou potažena termoplastovým povlakem. Pro výrobu je potřeba speciálně upravená tiskárna s dvěma tryskami, z nichž jedna je určena k tisku klasického plastového filamentu, a druhá k tisku kompozitních vláken. Je tedy možné jednoduše optimalizovat umístění vláken ve výtisku. Další výhodou je lepší adheze mezi výztuží a matricí. Nevýhodou je nutnost používání upravených kompozitních vláken což limituje jejich výběr. První komerční zařízení určené pro tisk kompozitů touto metodou uvedla na trh společnost Markforged. Na svých zařízeních využívá nylonovou matrici a skleněná nebo uhlíková vlákna jako výztuž. Obr. 10 zobrazuje výrobek z tiskárny firmy Markforged [6].



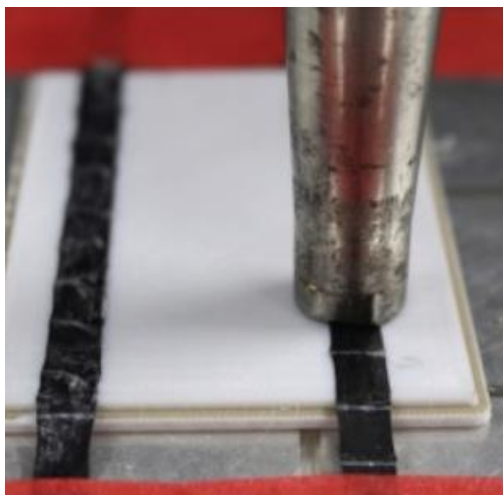
Obrázek 10: výrobek z 3D tiskárny firmy Markforged



Společnost Orbital Composites využívá netradiční metodu aditivní výroby. Tisková hlava je umístěna na šestiosém robotickém rameni a je navíc osazena rolerem, který z každé vytisknuté vrstvy působením tlaku odstraní dutiny. Není však zatím důkladně otestováno, do jaké míry ovlivní působení roleru přesnost výtisků z takového zařízení [6].

4.1.3 Laminátové kompozity

Zatím poslední možností výroby kompozitních součástí pomocí aditivních technologií, je vytvoření laminátového (sendvičového) kompozitu. Tuto metodu lze použít, bez jakýchkoliv úprav, na klasickém FDM zařízení. Během procesu výroby je tisk v daných vrstvách pozastaven, a do dílu je ručně vložena výztuž v podobě tkaniny. Tkaninu je nutné, například pomocí lepidla, zajistit proti posunu a poté působením tepla a tlaku spojit s předchozí vrstvou. Následně je výroba obnovena a výztuž je zatisknuta do dílu následujícími vrstvami. Tento postup lze využít pro laboratorní, nebo kusovou výrobu. Pro širší průmyslové využití je nutné celý proces automatizovat. Příklad takového kompozitu je zobrazen na obr. 11 [7].

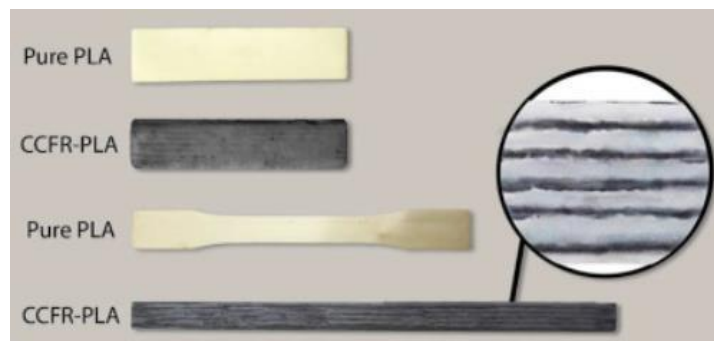


Obrázek 11: sendvičový kompozit [7]

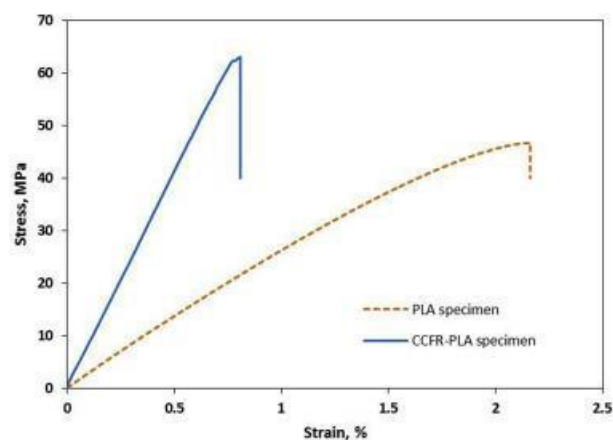
4.2 Mechanické vlastnosti kompozitů s dlouhými vlákny

I přesto, že tato oblast 3D tisku není ještě tak rozšířena, existují studie zabývající se mechanickými vlastnostmi vytisknutých dílů z kompozitů z dlouhými vlákny [8] [4]

[5]. Nejběžnější zkoumané materiály jsou ABS a PLA vyztužené CF nebo GF. Oproti nevyztuženým materiálům vykazují výrazně lepší mechanické vlastnosti. Níže je uveden příklad porovnání mechanických vlastností běžného PLA a kompozitu CCFR-PLA. Vzhledem k silné anizotropii výtisků byla zkušební tělíska tisknuta v podélném směru dílu pro zajištění maximálních možných pevnostních vlastností. Vzorky (obr. 10) byly podrobeny tahové a ohybové zkoušce. Diagram 1 zobrazuje závislost napětí na relativním prodloužení vzorků z PLA a CCFR-PLA při statické tahové zkoušce.

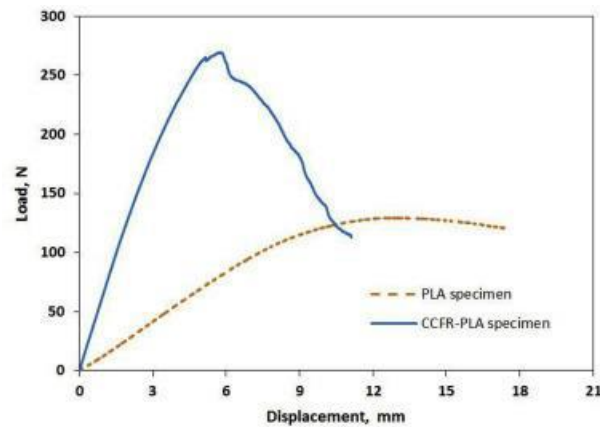


Obrázek 12: vzorky pro mechanické zkoušky [4]



Graf 1: výsledky tahové zkoušky [4]

Diagram 2 zobrazuje závislost zatížení na průhybu vzorků z PLA a CCFR-PLA při statické tříbodové ohybové zkoušce.



Graf 2: výsledky tříbodové ohybové zkoušky [4]

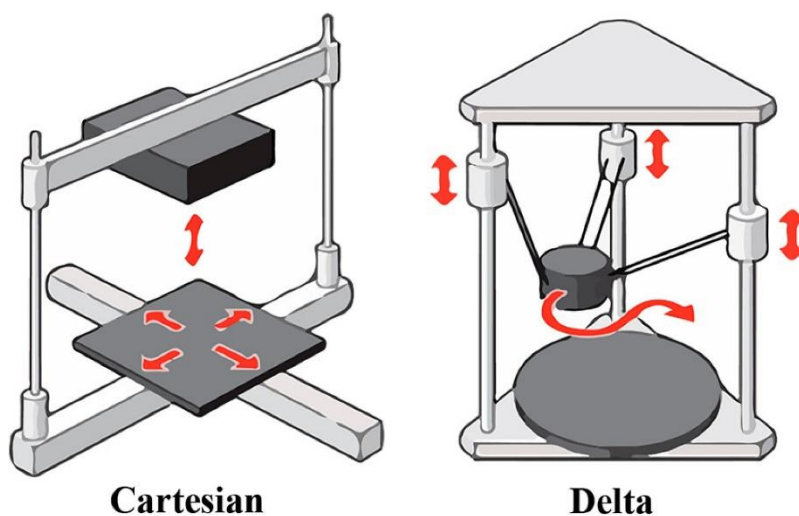
Jak můžeme vidět, tak vyztužený materiál vykazuje během obou zkoušek výrazně vyšší tuhost. Relativní prodloužení na mezi kluzu bylo sníženo o cca 60% a průhyb byl snížen o cca 100%. Zároveň materiál vykazuje vyšší mez kluzu. Při tahové zkoušce byla hranice meze kluzu zvýšena o 200% a při tříbodové ohybové zkoušce až o 360% [4].

5 Konstrukce FDM tiskárny na kompozitní materiály

5.1 Koncept

Při konstrukci 3D tiskárny je možné si vybrat z několika již ověřených koncepčních řešení. Zdaleka nejběžnějším řešením je tiskárna kartézská, ve které zajišťují pohyb tři lineární osy. Extruder se pohybuje na osách X a Z, zatímco podložka na ose Y. Výhodou je jejich snadné sestavení a kalibrace.

Další možností je tiskárna typu delta. Zde je pohyb zajištěn pomocí tří ramen, která jsou jedním koncem uchycena kloubově na lineárním pojezdu a druhým koncem na tiskové hlavě. Mohou se tedy pohybovat nezávisle na sobě a přesná pozice tiskové hlavy je určena pomocí trigonometrických funkcí, které jsou založeny na úhlech, které ramena svírají. Výhodou tohoto typu konstrukce je vysoká rychlost tisku. Nevýhodou je nutnost dodržet co možná nejnižší hmotnost tiskové hlavy a složitá kalibrace tiskárny.



Obrázek 13: schéma konceptuálních řešení 3D tiskáren

Pro konstrukci FDM tiskárny na kompozitní materiály byla zvolena varianta kartézské 3D tiskárny. Hlavním důvodem této volby je hmotnost tiskové hlavy. Pro tisk kompozitů je potřeba tiskovou hlavu upravit a osadit více komponenty, což znamená značné navýšení její hmotnosti. Z toho důvodu je tiskárna typu delta nevhodná.



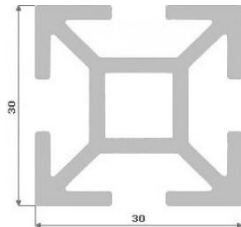
Po výběru konceptu lze dále postupovat dvěma způsoby. Mohla být upravena pouze tisková hlava již zakoupené 3D tiskárny, nebo mohla být postavena kompletně nová. Protože jsem při návrhu nechtěl být omezován možnostmi a kompozicí již předem koupeného zařízení, bylo rozhodnuto, že se postaví kompletně nová 3D tiskárna specializovaná na tisk kompozitů.

5.2 Konstrukční řešení dílčích komponent

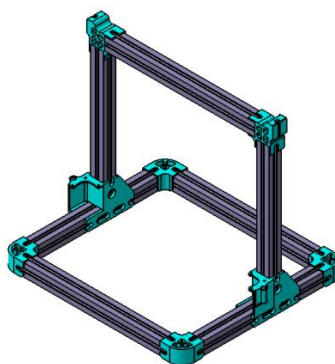
5.2.1 Rám

Pro konstrukci rámu byl zvolen stavebnicový systém hliníkových profilů, které jsou pro stavbu 3D tiskáren hojně využívány. Rám 3D tiskáren není namáhán velkými silami, jako například u CNC obráběcích strojů, a vysoká tuhost tedy není důležitým faktorem.

Byly použity čtvercové profily 30x30 s T drážkou spojené vytisknutými spojkami z materiálu PET-G. Profily s T drážkou byly zvoleny, protože je lze snadno osazovat komponenty a libovolně měnit jejich pozici bez konstrukčních úprav.



Obrázek 14: hliníkový profil



Obrázek 15: rám 3D tiskárny



5.2.2 Lineární pojezdy

Pro vedení os X, Y a Z lze použít 3 základní řešení. První a nejméně používanou možností je vedení na hlazených tyčích z nerezové oceli pomocí axiálních ložisek. Povrch tyčí je zakalen pro zvýšení tvrdosti a tolerance rozměru je h9. Jako ložiska je možno využít buď ložiska kuličková, nebo kluzná.



Obrázek 16: pojezdová tyč



Obrázek 17: lineární ložisko kuličkové



Obrázek 18: lineární ložisko kluzné

Druhou možností jsou specializovaná lineární vedení pro CNC zařízení složená z kolejničky a vozíku. Toto řešení zaručuje velmi vysokou kvalitu pojezdů a je proto využíváno u profesionálních 3D tiskáren. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena.



Obrázek 19: lineární vedení

Posledním řešením jsou kolečkové vozíky umístěné přímo na speciálních profilech rámu tiskárny. Tyto profily mají na dvou protilehlých stěnách klasické T drážky pro montáž komponent a na zbylých dvou stěnách mají V drážky, do kterých přesně



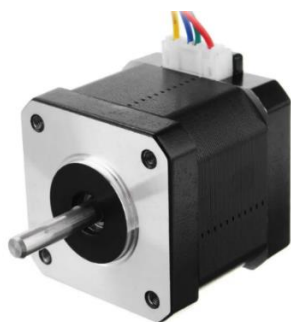
dosedají speciální polyoxymetylenová kolečka, která zajišťují lineární pohyb po profilu. Nevýhodou je, že tímto řešením si ubíráme prostor při konstrukci zařízení, protože 2 drážky profilu rámu nemůžeme využít pro montáž komponent.

Pro konstrukci lineárních pojezdů byla zvolena první varianta – pojezdy z hlazených tyčí a axiálních kuličkových ložisek.

5.2.3 Pohony

Pro pohon pojezdů os X, Y, Z a extruderu se využívají výhradně krokové motory. Krokový motor je bezkartáčový synchronní elektromotor napájen stejnosměrným proudem, který se otáčí po diskretních úsecích. Pohyb je zajištěn střídavým spínáním dvojic pólů na statoru, čímž se vytvoří magnetické pole a rotor se zarovná se sepnutou dvojicí. Tyto motory se používají v systémech bez zpětné vazby. Zdaleka nejpoužívanější jsou motory s rozměrem příruby Nema 17. Výhodou těchto motorů je vysoký krouticí moment při malých otáčkách, nízká cena a bezúdržbovost.

Pro pohon os X, Y a Z byly zvoleny krokové motory s maximálním krouticím momentem 0,56Nm a krokem 1,8°. Pro pohon extruderů a stříhacího mechanismu byly, pro snížení hmotnosti tiskové hlavy, zvoleny menší motory s krouticím momentem 0,28Nm a krokem 1,8°. K pohonu osy Z byly použity dva motory kvůli zamezení průhybu na ose X vlivem vysoké hmotnosti tiskové hlavy.



Obrázek 20: krokový motor 0,56Nm

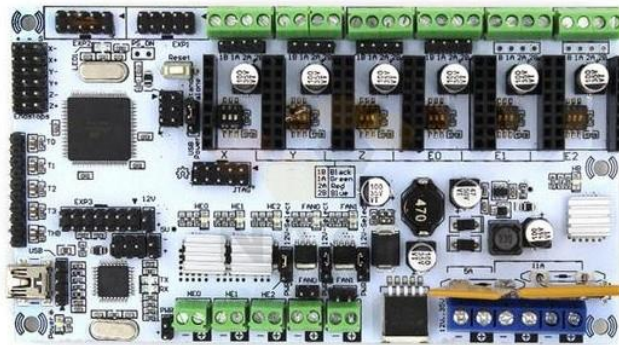


Obrázek 21: krokový motor 0,28Nm



5.2.4 Základní deska

Účelem základní desky je propojit všechny elektronické komponenty do jednoho funkčního celku a rozdělit mezi ně elektrické napětí. Pro tuto tiskárnu se výběr základních desek ztelně zúžil, protože je potřeba vybrat takovou, která podporuje možnost připojení až 6 krokových motorů – osa X, osa Y, osa Z (zde jsou připojeny paralelně dva motory na jednom driveru), extruder matrice, extruder výztuže, pohon stříhacího mechanismu. Většina běžných základních desek podporuje připojení pouze 5 krokových motorů. Mezi desky, co tento požadavek splňují, patří například desky GTR V1.0, SKR PRO V1.1, Tango V1.0, RUMBA. Pro tuto tiskárnu byla vybrána základní deska RUMBA.



Obrázek 22: základní deska RUMBA

5.2.5 Zdroj

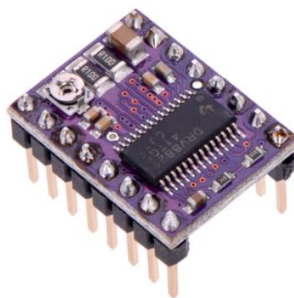
Základní deska je napájena stejnosměrným napětím 12V nebo 24V. Pro napájení je využít průmyslový zdroj s výkonem 240W. Vstupní napětí lze nastavit v rozsahu 90-132V a 180-264V. Pro tuto tiskárnu je použit zdroj s výstupním napětím 12V.



Obrázek 23: zdroj

5.2.6 Drivery krokových motorů

Pro ovladače (drivery) krokových motorů existuje na výběr mnoho možností. Mezi nejpoužívanější patří drivery A4988, DRV8825, TMC2209, TMC2208. Pro ovládání všech krokových motorů byly zvoleny drivery DRV8825. Spolu s A4988 patří k nejlevnějším variantám, ale oproti A4988 umožňuje mikrokrokování až 1/32. Mikrokrokování umožňuje zvýšit rozlišení krokových motorů – napětí na pólech motoru nemá pouze dva stavy (zapnuto/vypnuto) ale může se plynule měnit a lze tedy přesně nastavit polohu rotoru mezi plné kroky. Driver umožňuje přes potenciometr nastavovat napětí motorech.



Obrázek 24: driver DRV8825

5.2.7 Vyhřívání podložka

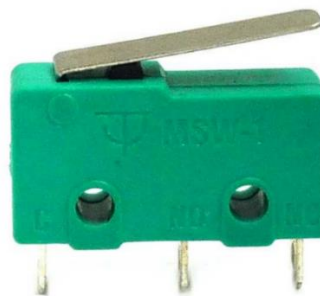
Pro lepší adhezi tisknutého polymeru, se používají podložky se zdrsňeným povrchem, popř. pokud je vyžadován hladký povrch, je možné tisknout na sklo nastříkané adhezivem. Podložka je vyhřívána pro další zlepšení adheze a pro minimalizaci smrštění výtisku během procesu výroby.



Obrázek 25: vyhřívána podložka

5.2.8 Endstopy

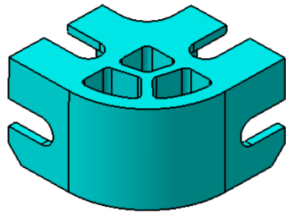
Pro určení počátku souřadnicového systému 3D tiskárny se využívají tzv. endstopy. Nejběžnější jsou jednoduché mechanické endstopy, které jsou v závislosti na poloze páčky schopny vysílat dva signály – sepnuto a nesepnuto. Každá osa je na jednom konci opatřena endstopem, který určuje nulovou, nebo maximální hodnotu na dané ose.



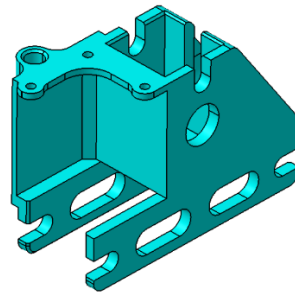
Obrázek 26: endstop

5.2.9 Vyrobené díly

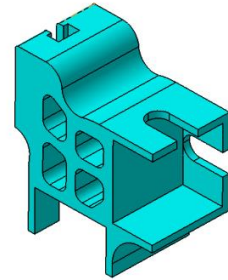
Zbylé nenakupované díly tiskárny byly vyrobeny pomocí 3D tisku z materiálu PET-G. Důvodem této volby byla hlavně možnost pružně reagovat na případné potřebné změny na designu zařízení a rychlá a snadná výroba náhradních dílů. Mezi tyto díly patří spojovací úhelníky rámu, ložiskové domky, většina komponent tiskové hlavy, držáky endstopů, motorů, pojezdových tyčí, zdroje, základní desky. Všechny tisknuté díly jsou zobrazeny na obrázcích níže.



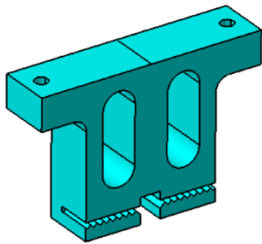
Obrázek 27: spojka rámu 1



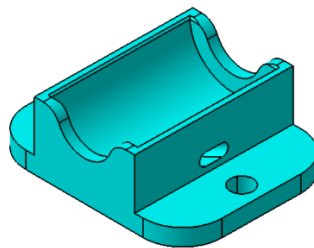
Obrázek 28: spojka rámu 2



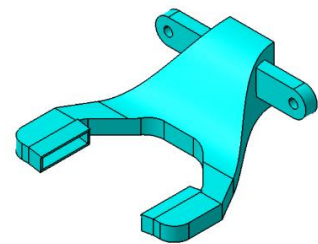
Obrázek 29: spojka rámu 3



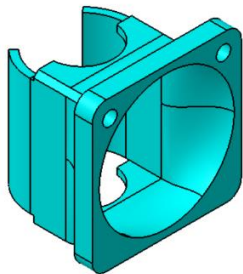
Obrázek 30: držák řemenu osy Y



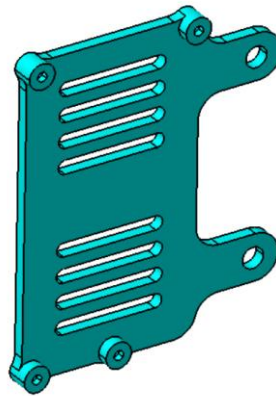
Obrázek 31: držák ložisek osy Y



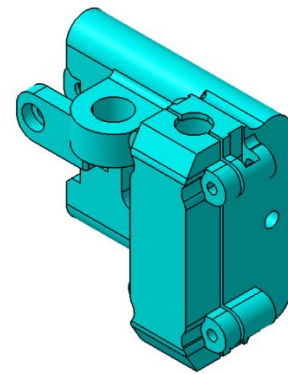
Obrázek 32: ofuk výtisku



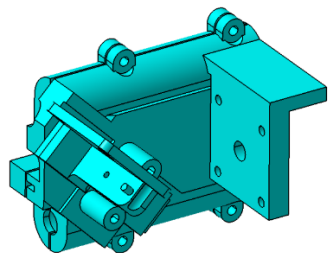
Obrázek 33: ofuk chladiče



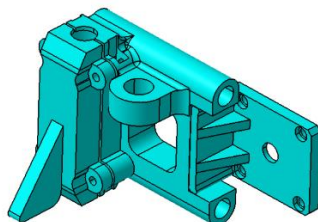
Obrázek 34: držák základní desky



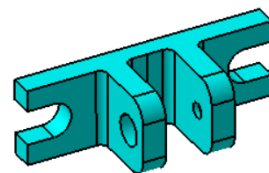
Obrázek 35: pojezd osy Z 1



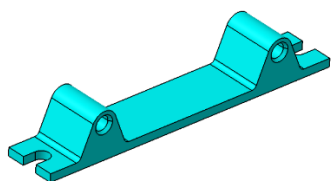
Obrázek 36: tisková hlava



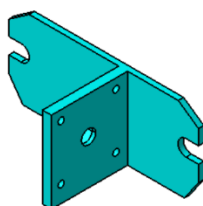
Obrázek 37: pojezd osy Z 2



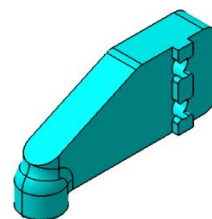
Obrázek 38: držák řemenice



Obrázek 39: držák pojezdových tyčí osy Y



Obrázek 40: držák motoru osy Y



Obrázek 41: držák pojezdové tyče osy Z

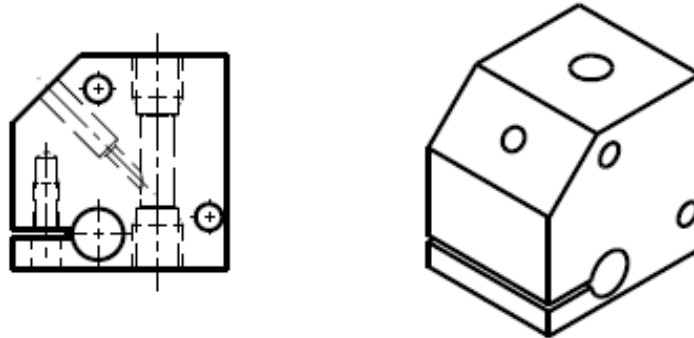


5.3 Konstrukční řešení tiskové hlavy – verze 1

Nejdůležitějším komponentem zařízení je tisková hlava. Je to prakticky jediná část, která se liší od klasické 3D tiskárny na termoplasty. Pro účel tisku kompozitních materiálů muselo být navrženo nové konstrukční řešení tohoto komponentu. Hlava je osazená dvěma extrudery, z nichž jeden slouží k pohonu matrice a druhý k pohonu výztuže. Obě fáze kompozitu se spojují v hotendu (topné kostce) a vystupují jednou tryskou. První verze tiskové je navíc osazena stříhacím mechanismem, aby bylo možno plně automaticky selektivně pokládat výztuž do dílu.

5.3.1 Hotend

Hotend je komponent, který zajišťuje tavení termoplastového filamentu. V případě této tiskárny slouží zároveň ke spojování matrice s výztuží a bylo proto potřeba navrhnout speciální hotend. Běžné hotendy mají jeden výstup v podobě závitové díry pro trysku a jeden vstup v podobě závitové díry pro heatbreak. Nově navržený hotend zachovává vstup pro filament, výstup pro trysku, ale navíc obsahuje jeden další vstup pro trubičku k vedení výztuže. Vstup pro výztuž je vrtaný pod úhlem 45° k ose trysky a ústí těsně nad tryskou. Celá sestava hotendu se skládá z topné kostky, chladiče, trysky heatbreaku a trubičky pro vedení výztuže. Do vstupu topné kostky je zašroubován heatbreak, na který je našroubován chladič. Chladič slouží k vytvoření vysokého teplotního gradientu na vstupu do topné kostky. Pro správnou funkci tiskárny, je nutné zajistit, aby tisknutý filament neměknul ještě před vstupem do topné kostky. Přechod z pevného skupenství do kapalného musí nastat náhle, protože změkklý, ale ještě nekapalný filament může způsobit ucpání tiskárny. Trubička pro vedení výztuže kompozitu je do topné kostky vedena bočním vstupem a je protažena skrz kostku až těsně nad konec trysky, aby bylo zajištěno, že výztuž se nikde nezasekne. Vstupní otvor pro trubičku a oba závitové spoje jsou v kostce utěsněny tepelně odolným tmelem. Pro lepší stabilizaci teploty je topná kostka opatřena odnímatelným návlekm odlitým ze silikonového tmelu.



Obrázek 42: topná kostka verze 1



Obrázek 43: sestava hotendu verze 1

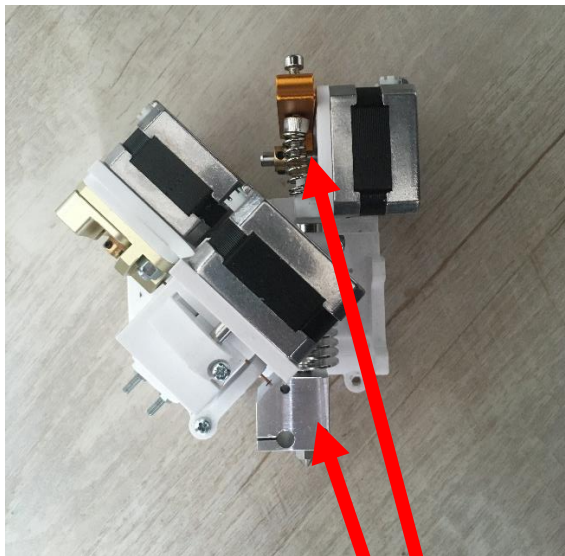
5.3.2 Extruder výztuže

Pro stavbu extruderu výztuže byl jako základ použit klasický extruder pro filament. Výztuž je, stejně jako filament, poháněna krokovým motorem s ozubeným kolem, na které je, přes pákový mechanismus, přitlačeno přitlačné kolo. Vlákno výztuže je sevřeno mezi těmito dvěma koly a otáčením ozubeného kola je hnáno do hotendu skrze měděnou trubičku o vnitřním průměru 0,5mm.

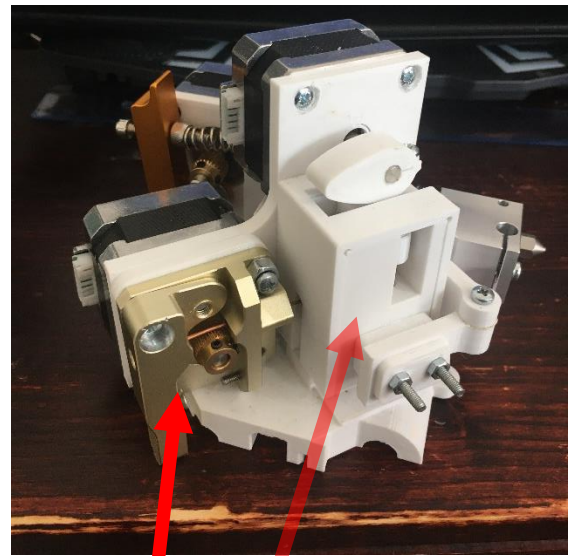


5.3.3 Stříhací mechanismus

Za extruderem výztuže je umístěn stříhací mechanismus, který má za úkol, v případě potřeby, dělit výztuž. Pohyb je zajištěn vačkovým mechanismem, který je poháněn krokovým motorem. V místě trajektorie stříhacího nože je trubička pro vedení výztuže rozdělena na dvě části. Při procesu stříhání se přes klínový mechanismus vrchní trubička přizvedne a v ní vedená výztuž se tak obnaží. Díky tomu je noži umožněno projet s dostatečným přesahem.



Obrázek 44: tisková hlava verze 1



Obrázek 45: tisková hlava verze 1

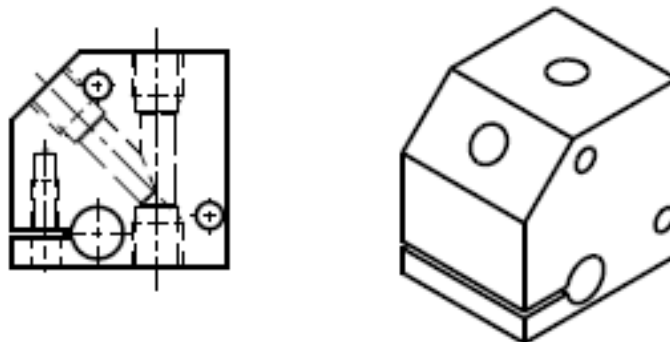
- Extruder matrice
- Sestava Hotendu
- Extruder výztuže
- Stříhací mechanismus

5.4 Konstrukční řešení tiskové hlavy – verze 2

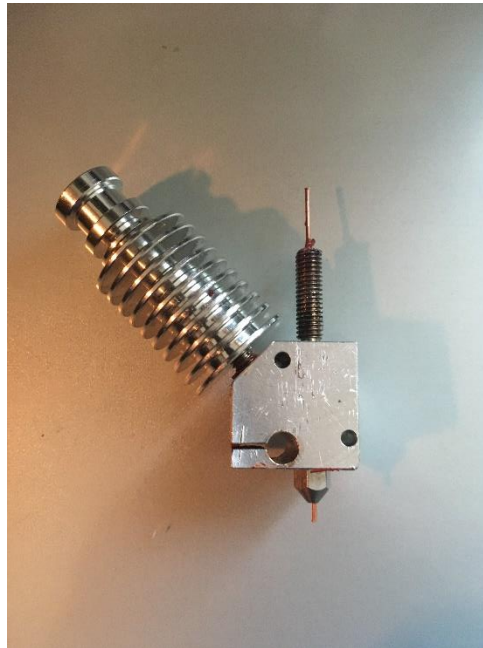
První varianta tiskové hlavy poskytuje větší variabilitu při procesu aditivní výroby kompozitních součástí, ale vzhledem ke složitosti konstrukce a vysokým nárokům na přesnost kinematiky stříhacího mechanismu se toto řešení nepodařilo bezchybně zprovoznit. Dalším důvodem nevyhovující funkčnosti bylo zřejmě umístění přívodu výztuže do boku topné kostky. Trubička pro vedení výztuže v topné kostce prudce měnila směr, což mělo za následek časté zasekávání výztuže v trubičce. Velikou nevýhodou byla omezená možnost údržby, protože spoj trubičky a topné kostky byl nerozebíratelný. V případě potřeby čištění topné kostky byl proces velmi zdlouhavý a hrozilo poškození trubičky. Z těchto důvodů byla navržena druhá varianta tiskové hlavy.

5.4.1 Hotend

Kvůli problémům s vedením výztuže, byly na topné kostce prohozeny vstupy fází kompozitu. Výztuž je přiváděna vrchním vstupem, soustředným s osou trysky a z boku kostky je přiváděn filament. Toto řešení eliminuje změny trajektorie výztuže a snižuje tak riziko zasekávání na minimum. Trubička je v topné kostce zajištěna šroubovým spojem, a celá sestava je tedy jednoduše rozebíratelná, což značně ulehčuje údržbu. Všechny závitové spoje jsou utěsněny tepelně odolným tmelem.



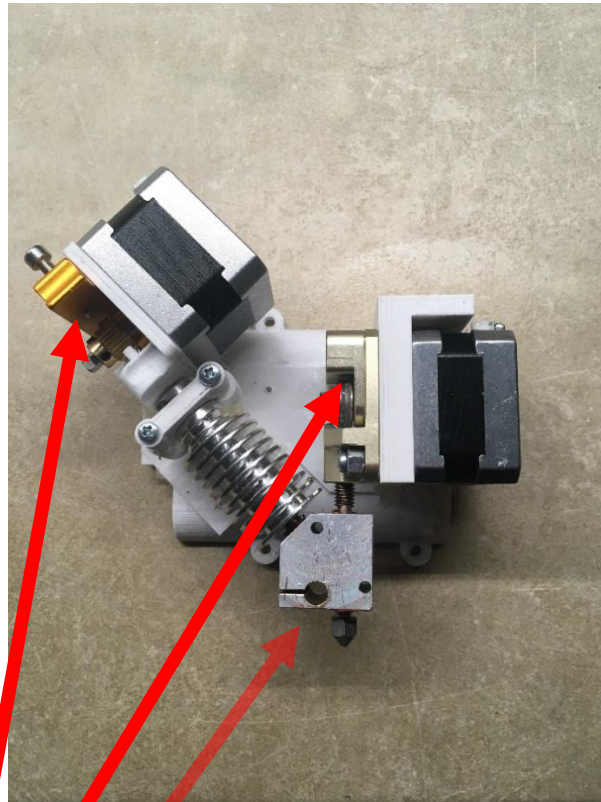
Obrázek 46: topná kostka verze 2



Obrázek 47: sestava hotendu verze 2

5.4.2 Extruder výztuže

Ve druhé variantě byl odstraněn stříhací mechanismus a extruder výztuže je tedy umístěn těsně před vstup do topné kostky. Trubičku pro vedení výztuže tedy není potřeba dělit a celou sestavu je tak výrazně jednodušší spasovat. Absence pohyblivých komponent také snižuje riziko zasekávání výztuže.



Obrázek 48: tisková hlava verze 2

Extruder matrice

Extruder výztuže

Sestava Hotendu



6 Nastavení firmwaru

Aby bylo možné tiskárnu ovládat, je potřeba nahrát do základní desky firmware, který obsahuje veškeré nastavení tiskárny. Na výběr máme více možností, ale mezi nejpoužívanější firmwary patří Marlin a Repetier. Oba se vyznačují vysokou kompatibilitou s různými základními deskami, velkým množstvím funkcí a dobrou uživatelskou přístupností. Pro ovládání této tiskárny byl zvolen firmware Repetier, protože umožňuje implementaci funkce „MIXING EXTRUDER“, která je pro správné fungování této tiskárny naprosto zásadní. Tato funkce umožňuje definovat současný pohyb dvou extruderů, které vedou do jedné společné trysky. Na běžné tiskárně lze díky tomu tisknout zároveň dva různě barevné filamenty v přesně daném poměru a vytvářet tak zajímavé barevné kombinace. Na této tiskárně byla funkce využita pro současnou extruzi matrice a výztuže a nebylo tedy nutné vytvářet speciální zdrojový kód.

Repetier je open source software a je tedy možné ho zdarma stáhnout a dle potřeby upravit. Pro úpravy je potřeba použít software Arduino IDE, který je také volně dostupný. Samotná konfigurace se provádí změnou v jediném souboru Configuration.h.

Při nastavování firmwaru je nejprve nutné definovat použitou základní desku. Repetier obsahuje ve svých souborech knihovnu předdefinovaných kompatibilních základních desek, a je tedy možné mezi nimi jednoduše přepínat změnou jednoho řádku kódu. Další důležité nastavení, je charakteristika tiskové hlavy. Podobu tohoto komponentu určuje počet extruderů a charakteristika hotendu. Pro tuto tiskárnu byly nedefinovány dva extrudery s jednou společnou tryskou a povolenou funkcí „MIXING EXTRUDER“. Dále je nutné definovat vzájemný vztah otáček motorů a lineárního posunu na osách X, Y a Z. Tento vztah je definován poměrem počtu kroků motoru na jeden milimetr posunu osy – „steps/mm“. Pro správné nastavení je potřeba znát geometrii mechanismu, který přenáší krouticí moment motoru na lineární pohyb pojezdů na osách. Pro motory extruderu je potřeba definovat vztah počtu kroků motoru na jeden milimetr extrudovaného materiálu. Pro pohony extruderů často k určení



správných hodnot steps/mm nestačí výpočet z geometrie mechanismu, ale je potřeba je následně upravit kalibrací. Hodnoty pro oba extrudery bylo nakonec potřeba zdvojnásobit, protože funkce „MIXING EXTRUDER“ neumožňuje v součtu překročit 100% extruze. Tato tiskárna využívá funkci k současnému pohonu matrice a výztuže a je tedy potřeba, aby oba extrudery dodávaly současně 100% materiálu v poměru 1:1.

Další nastavení se týká koncových dorazů – endstopů. Zde je potřeba definovat logiku endstopů a jestli určují maximální, nebo minimální hodnoty souřadnicového systému tiskárny. V této tiskárně byly definovány endstopy, které určují počátek souřadnicového systému. Na závěr je potřeba definovat použitá teplotní čidla a způsob regulace teploty u vyhřívaných prvků tiskárny. Tato tiskárna obsahuje dva vyhřívané prvky – hotend a vyhřívanou podložku. Teplota obou těchto komponent je snímána pomocí termistoru s odporem 100K ohm a je řízena pomocí PID regulace. Konstanty PID regulátoru byly kalibrovány pomocí funkce „PID autotune“ pro teplotu 215 °C se zapnutým chlazením výtisku. Pokud by byly při tisku použity jiné hodnoty teploty, nebo chlazení výtisku, je nutné, pro co nejlepší možný výsledek, před tiskem provést kalibraci znovu a upravit hodnoty konstant PID regulátoru.



7 Nastavení slicovacího softwaru

Pro generování g-code byl zvolen slicovací software Cura. Při dodržení následující metodiky je však možné využít i jiné softwary podporující všechny potřebné funkce. Nejprve je nutné definovat v softwaru nové zařízení. Mezi základní nastavení při vytváření nové tiskárny patří rozměry tiskového prostoru, použitý firmware, tvar podložky a počet extruderů. Dále je potřeba definovat start g-code, který určuje chování tiskárny před začátkem tisku jakéhokoliv dílu. Zde můžeme využít příkazy odemknuté povolením funkce „MIXING EXTRUDER“ a pomocí nich definujeme současnou extruzi dvou různých materiálů. Příkaz M163 s parametry S a P určuje poměr daného extruderu ve směsi. Parametr S určuje, o jaký extruder se jedná a parametr P určuje množství extrudovaného materiálu. Těchto příkazů můžeme na sebe navázat tolik, kolik obsahuje tiskárna extruderů. Následně je nutné pomocí příkazu M164 s parametrem S uložit nastavení do nového virtuálního extruderu. Při nastavování počtu extruderů tiskárny je tedy nutné, definovat o jeden extruder více, do kterého uložíme směs definovanou příkazy M163. Tato tiskárna má tedy dohromady definované tři extrudery – jeden pouze na termoplast, jeden pouze na výztuž a jeden na kompozit. Pokud plánujeme v rámci jednoho dílu kombinovat extruder na termoplast a na kompozitní materiál (z termoplastu se mohou tisknout například pouze podpory, nebo vnitřní výplň dílu a z kompozitního materiálu pouze obvodové stěny), je potřeba zajistit, aby při výměně extruderů, došlo k přestřižení výztuže, aby byl tiskové hlavě umožněn volný pohyb. Pro každý použitý extruder lze definovat jeho start g-code, který určuje chování tiskárny před použitím daného extruderu a end g-code, který určuje chování tiskárny po ukončení tisku daným extruderem, což lze pro tento účel výhodně použít. Pro první variantu tiskové hlavy do end g-code extruderu kompozitního materiálu napíšeme příkazy pro ovládání motoru, který pohání stříhací vačkový mechanismus. Tímto je zajištěno, že kdykoliv je ukončen tisk kompozitního materiálu, je vlákno přestřiženo. Protože k přestřižení dochází ještě před vstupem výztuže do topné kostky, je neustřižený zbytek zatisknut do dílu. Po ukončení tisku z termoplastu je výztuž povysunuta až na úroveň trysky, aby byla okamžitě připravena pro pokračování tisku. V druhé variantě nemáme možnost automaticky dělit vlákno

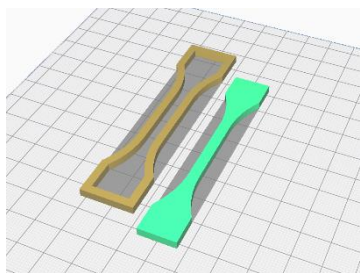


výztuže. V případě potřeby je tedy nutné výztuž dělit manuálně. Pro ulehčení dělení lze postprocessingem doplnit g-code o pozastavení procesu tisku pomocí příkazu M226 vždy když je potřeba dělit výztuž. Jedná se například o změnu vrstvy, nebo změnu extruderů.

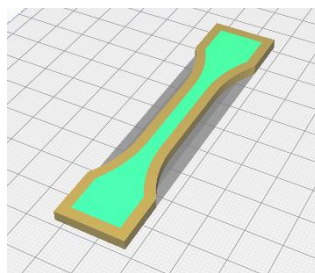
Výše uvedené parametry nastavení lze považovat na fixní a pro tisk různých dílů nebudou vyžadovány žádné úpravy. Nyní přejdeme k variabilním procesním parametrům. Mezi tyto parametry patří například teplota, výška vrstvy, intenzita chlazení, rychlost a obecné nastavení perimetrů. **Teplotu** je, vzhledem k velkému průměru trysky, potřeba zvolit vyšší, než je běžně doporučována pro daný termoplast, aby bylo zajištěno, že se materiál stihne v topné kostce dostatečně roztavit, než se dostane k trysce. Pokud by se materiál nestíhal tavit, hrozilo by ucpávání trysky. **Výška vrstvy** ovlivňuje výslednou kvalitu vytisknutého dílu. Tento parametr je volen v rozmezí 0,5 – 0,75 násobek průměru trysky. **Chlazení výtisku** je při tisku kompozitního materiálu důležitým parametrem, protože je nutné zajistit, aby co nejdříve po extruzi materiál ztuhl a výztuž byla pevně uchycena v matrici. Pokud by termoplast zůstával po extruzi příliš dlouho v kapalně fázi, může nastat problém v oblastech rohů, kde by docházelo k vytažení výztuže z matrice – nekopírovala by přesně konturu rohu, ale byla by tažena nejkratší vzdáleností za tryskou. Při nastavování **rychlosti** tisku obecně platí, že čím větší průměr trysky použijeme, tím nižší rychlostí musíme tisknout, aby se extrudovaný materiál stíhal ochladit. Vzhledem k velkému průměru trysky použité na tomto zařízení musí být rychlost extrémně nízká – 5-10 mm/s. Při tisku kompozitního materiálu je velice důležité správné nastavení tisku **perimetrů**. Vzhledem k použití nekonečného vyztužujícího vlákna je nutné absolutně eliminovat přejezdy tiskové hlavy. Během přejezdů nedochází k extruzi materiálu a vzhledem k tomu, že vlákno výztuže není přerušeno, by došlo k jeho vytržení z matrice, popř. k odtržení výtisku od podložky. Proces tisku musí tedy být spojitý a bez přejezdů. Z tohoto důvodu je tisk kompozitního materiálu vhodný převážně pro obvodové stěny modelu, protože zajistit spojitý tisk výplně bez přejezdů je vzhledem ke složité geometrii, mnohdy nemožné. Tento požadavek je zajištěn pomocí funkcí „optimize wall printing order“ a „Z seam alignment“. První funkce optimalizuje proces tisku



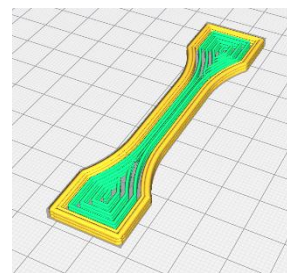
perimetrů z hlediska minimalizace přejezdů. Druhá funkce umožňuje zarovnat začátek a konec perimetrů do vybraného místa. Kombinace těchto funkcí zajistí plynulé navázání tisku jednotlivých perimetrů. I přesto je však třeba po slicování přezkontrolovat dráhy v každé vrstvě. Pokud chceme tisknout výplň dílu pouze termoplastem a obvodové stěny kompozitním materiálem, můžeme postupovat stejným způsobem, jako u tisku ze dvou různě barevných filamentů. Tisknutý díl je nutné rozříznout na části, které chceme tisknout z kompozitu, a na části, které chceme tisknout pouze z termoplastu. Obě části musí být zvlášť exportovány do formátu STL. Po importu obou částí do slicovacího softwaru se musí zarovnat jejich souřadnicové systémy, čímž vznikne původní díl, rozdělený do dvou částí. Následně je možné každé části přiřadit požadovaný extruder.



Obrázek 49: části tisknutého dílu



Obrázek 50: zarovnané části tisknutého dílu

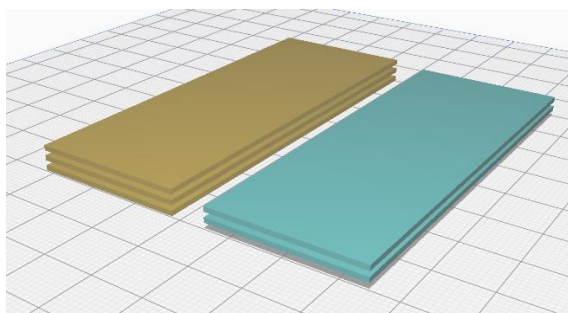


Obrázek 51: slicovaný díl

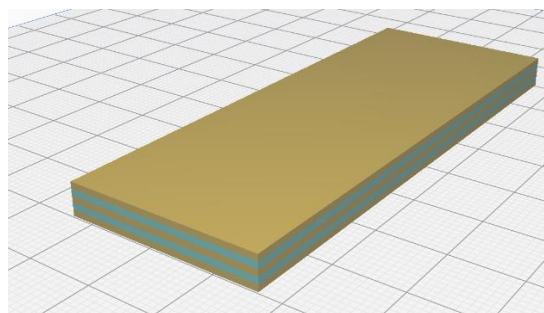
Pokud na tiskové hlavě není k dispozici stříhací mechanismus pro dělení vlákna, nelze během procesu výroby střídat tisk kompozitu a čistého plastu, pokud nechceme výztuž dělit manuálně. Je tedy potřeba zajistit, že dráha tisku bude spojitá absolutně bez přejezd, a to i při změně vrstvy tisku. Pro zajištění této podmínky je opět nutné rozdělit díl na dvě části. Na rozdíl od předchozího postupu budeme však díl dělit po jednotlivých vrstvách tisku. Jedna část bude obsahovat pouze liché vrstvy, druhá část pouze sudé vrstvy. Takto připravené části opět, jak je uvedeno výše, nahrajeme do slicovacího programu a zarovnáme na sebe tak, že vznikne původní díl. Dále je potřeba vytvořit další virtuální extruder, který bude totožný s tím, který je používán pro tisk kompozitního materiálu. Jediný rozdíl bude v pořadí tisku obvodových perimetrů. V základním nastavení probíhá tisk obvodových perimetrů zevnitř dílu ven. Pro libovolně zvolený virtuální extruder kompozitu je potřeba toto nastavení změnit na tisk



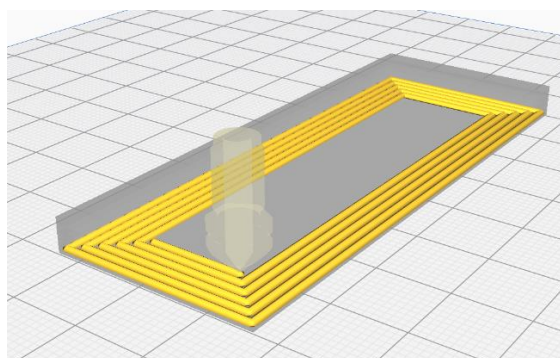
stěn zvenčí dovnitř. Následně již každé části dílu přiřadíme jeden extruder a je tím zajištěno, že při změně vrstvy začne tisk probíhat na stejném místě, kde skončil tisk předchozí vrstvy. Celý proces tisku tedy bude probíhat bez přejezdů. Bez výše uvedeného postupu toho nelze dosáhnout, protože nelze měnit nastavení extruderu pro jednotlivé vrstvy. Pokud bychom tedy ponechaly pro tisk dílu pouze jeden extruder, tak by se po dokončení každé vrstvy vždy přesunul zpět na začátek a nenavázal by v místě kde předchozí vrstva skončila.



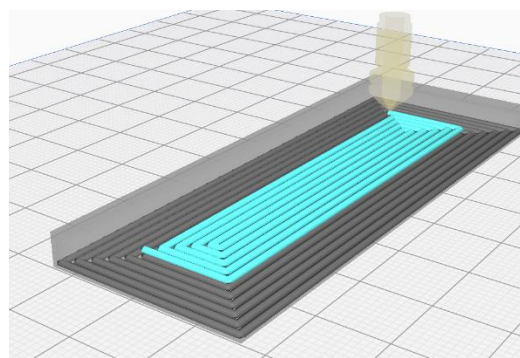
Obrázek 52: části tisknutého dílu



Obrázek 53: zarovnané části tisknutého dílu



Obrázek 54: dráha trysky

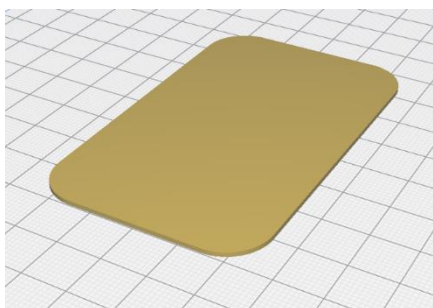


Obrázek 55: dráha trysky

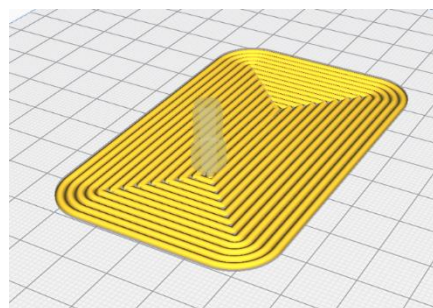


8 Zásady tvorby modelů pro tisk z kompozitního materiálu

Při návrhu modelů je třeba dodržet určité zásady, jinak je vysoce pravděpodobné, že se tisk nepovede. Tisknutý díl by ideálně měl být tvořen obvodovou konturou v rovině XY, rostoucí ve směru osy Z. V případě, že je požadován tisk celého výtisku pouze z kompozitního materiálu, je nutné, tvořit konturu dílu tak, aby bylo možné její obsah beze zbytku vyplnit paralelami kontury směrem dovnitř dílu. Příklady takových tvarů jsou například obdélník nebo čtverec.

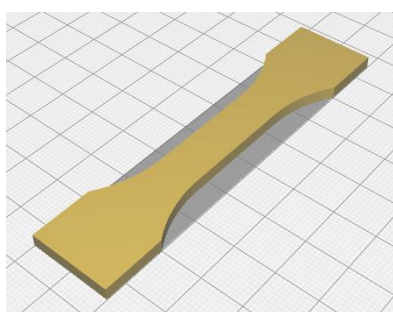


Obrázek 56: správně vytvořený díl

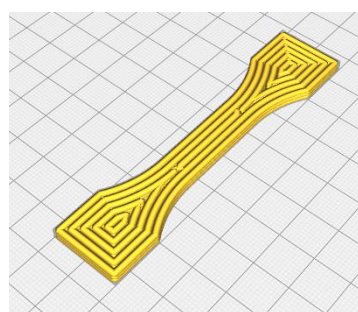


Obrázek 57: správně vytvořený díl – slicovaný

V případě nedodržení této podmínky rozdělí slicovací software model na více drah a propojí je přejezdy, jak můžeme vidět na obrázku níže.



Obrázek 58: špatně vytvořený díl



Obrázek 59: špatně vytvořený díl – slicovaný

Dále kvůli nutnosti odstranění přejezdů není možné používat při procesu tisku podpory převislých částí dílu. Je tedy nutné navrhovat díl tak, aby nebylo nutné podpory používat a byl tisknutelný bez nich.



9 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zmapování současného stavu možností aditivní výroby kompozitních materiálů a konstrukce speciální 3D tiskárny na tisk kompozitních materiálů.

V teoretické části práce byly popsány nejběžněji používané technologie aditivní výroby a obecný postup procesu výroby aditivními technologiemi. Dále byly popsány některé z možností 3D tisku výrobků z kompozitních materiálů. Byly uvedeny metody výroby dílů z částicových kompozitů, kompozitů s krátkými vlákny, kompozitů s dlouhými vlákny a sendvičových kompozitů. V současné době jsou v aditivní výrobě kompozitů nejvíce využívány částicové kompozity a kompozity s krátkými vlákny, kvůli jejich jednoduché výrobě.

Praktická část práce byla zaměřena na konstrukční návrh a výrobu 3D tiskárny na kompozitní materiály s dlouhými vlákny. Konceptně vychází konstrukce tiskárny z běžných kartézských tiskáren. Velké úpravy se udělaly až na tiskové hlavě, pro kterou byly navrženy dvě konstrukční varianty. První varianta obsahuje mechanismus pro dělení vyztužujících vláken a je tedy konstrukčně složitější. Z tohoto důvodu se nepodařilo tuto variantu uvést do provozu. Byla proto navržena druhá varianta bez stříhacího mechanismu. Tato verze tiskové hlavy se s určitými omezeními ukázala jako použitelná. Současné řešení extruderu výztuže neumožňuje spolehlivě pohánět měkká vyztužující vlákna. Použití tiskárny je tedy omezeno pouze na kovovou výztuž. I přes tyto omezení lze zařízení považovat za funkční.



10 Doporučení pro budoucí práce

Aby tiskárna byla schopna zpracovat širší paletu materiálů, je potřeba na ni udělat určité konstrukční úpravy.

V současné době je vedení filamentu v topné kostce zajištěno pomocí PTFE trubičky, která při vyšších teplotách degraduje. Pro běžně používané materiály, jako například PLA, PET-G, TPU a ABS, je to dostačující, ale pokud bychom chtěli vyrábět díly s matricí z tzv. high-performance polymerů, jako například PEEK, je potřeba upravit topnou kostku na celokovové provedení, které snese vyšší teploty.

Pro rozšíření možností při výběru vyztužujícího vlákna je dále potřeba upravit extruder výztuže. Současné řešení umožňuje pouze tisk kompozitního materiálu s kovovou výztuží, protože geometrie extruderu nemá dostatečně vysokou přesnost, a vyztužující vlákna z měkkých materiálů mají tendenci se v extruderu lámat a namotávat na hnací kolo. Dalším možným vylepšením je umožnění regulace přítlaku hnaného kola extruderu výztuže. Současné řešení toto neumožňuje, a příliš velký přítlak může příliš deformovat měkká vyztužující vlákna.

Po vyřešení těchto problémů bude tiskárna schopna vyrábět díly z kompozitních materiálů tvořených jakoukoliv termoplastickou matricí vyztuženou libovolným dlouhým vyztužujícím vláknem.



11 Bibliografie

- [1]. **Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui.** Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. 2018.
- [2]. **A. El Moumen, M. Tarfaoui, K. Lafdi.** Additive manufacturing of polymer composites: Processing and modeling approaches. 2019.
- [3]. **Nashat Nawafleh, Emrah Celik.** Additive manufacturing of short fiber reinforced thermoset composites with unprecedented mechanical performance. 2020.
- [4]. **M. Heidari-Rarani, M. Rafiee-Afarani, A.M. Zahedi.** Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. 2019.
- [5]. **Xiaoyong Tian, Tengfei Liu, Chuncheng Yang, Qingrui Wang, Dichen Li.** Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber. 2016.
- [6]. **S. M. Fijul Kabir, Kavita Mathur, Abdel-Fattah M. Seyam.** A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites. 2019.
- [7]. **M.N. Jahangir, K.M.M. Billah, Y. Lin, D.A. Roberson R.B. Wicker, D. Espalin.** Reinforcement of material extrusion 3D printed polycarbonate using continuous carbon fiber. 2019.
- [8]. **Juan Naranjo-Lozada, Horacio Ahuett-Garza, Pedro Orta-Castañón, Wilco M.H. Verbeeten, Daniel Sáiz-González.** Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. 2019.
- [9]. **M. Mohammadzadeh, A. Imeri, I. Fidan, M. Elkelany.** 3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis. 2019.



12 Seznam obrázků

Obrázek 1: díl vyrobený pomocí 3D tisku	11
Obrázek 2: díl vyrobený pomocí 3D tisku	11
Obrázek 3: díl vyrobený pomocí 3D tisku	11
Obrázek 4: slicovaný model	12
Obrázek 5: proces výroby pomocí metody FDM	13
Obrázek 6: schéma metody SLA.....	14
Obrázek 7: schéma metody FDM.....	14
Obrázek 8: schéma metody SLS.....	15
Obrázek 9: schéma metody EBM.....	16
Obrázek 10: výrobek z 3D tiskárny firmy Markforged.....	18
Obrázek 11: sendvičový kompozit.....	19
Obrázek 12: vzorky pro mechanické zkoušky	20
Obrázek 13: schéma konceptuálních řešení 3D tiskáren	22
Obrázek 14: hliníkový profil	23
Obrázek 15: rám 3D tiskárny.....	23
Obrázek 16: pojezdová tyč.....	24
Obrázek 17: lineární ložisko kuličkové	24
Obrázek 18: lineární ložisko kluzné.....	24
Obrázek 19: lineární vedení	24
Obrázek 20:krokový motor 0,56Nm.....	25
Obrázek 21: krokový motor 0,28Nm.....	25
Obrázek 22: základní deska RUMBA.....	26



Obrázek 23: zdroj	27
Obrázek 24: driver DRV8825	27
Obrázek 25: vyhřívaná podložka	28
Obrázek 26: endstop	28
Obrázek 27: spojka rámu 1	29
Obrázek 28: spojka rámu 2	29
Obrázek 29: spojka rámu 3	29
Obrázek 30: držák řemenu osy Y	29
Obrázek 31: držák ložisek osy Y	29
Obrázek 32: ofuk výtisku	29
Obrázek 33: ofuk chladiče	29
Obrázek 34: držák základní desky	29
Obrázek 35: pojezd osy Z 1.....	29
Obrázek 36: tisková hlava	30
Obrázek 37: pojezd osy Z 2.....	30
Obrázek 38: držák řemenice	30
Obrázek 39: držák pojezdových tyčí osy Y.....	30
Obrázek 40: držák motoru osy Y	30
Obrázek 41: držák pojezdové tyče osy Z	30
Obrázek 42: topná kostka verze 1	32
Obrázek 43: sestava hotendu verze 1	32
Obrázek 44: tisková hlava verze 1	33
Obrázek 45: tisková hlava verze 1	33
Obrázek 46: topná kostka verze 2.....	34
<hr/>	
3D tisk kompozitů s termoplastickou maticí	48



Obrázek 47: sestava hotendu verze 2.....	35
Obrázek 48: tisková hlava verze 2	36
Obrázek 49: části tisknutého dílu	41
Obrázek 50: zarovnané části tisknutého dílu.....	41
Obrázek 51: slicovaný díl	41
Obrázek 52: části tisknutého dílu	42
Obrázek 53: zarovnané části tisknutého dílu.....	42
Obrázek 54: dráha trysky	42
Obrázek 55: dráha trysky	42
Obrázek 56: správně vytvořený díl	43
Obrázek 57: správně vytvořený díl – slicovaný	43
Obrázek 58: špatně vytvořený díl	43
Obrázek 59: špatně vytvořený díl – slicovaný	43



13 Seznam příloh

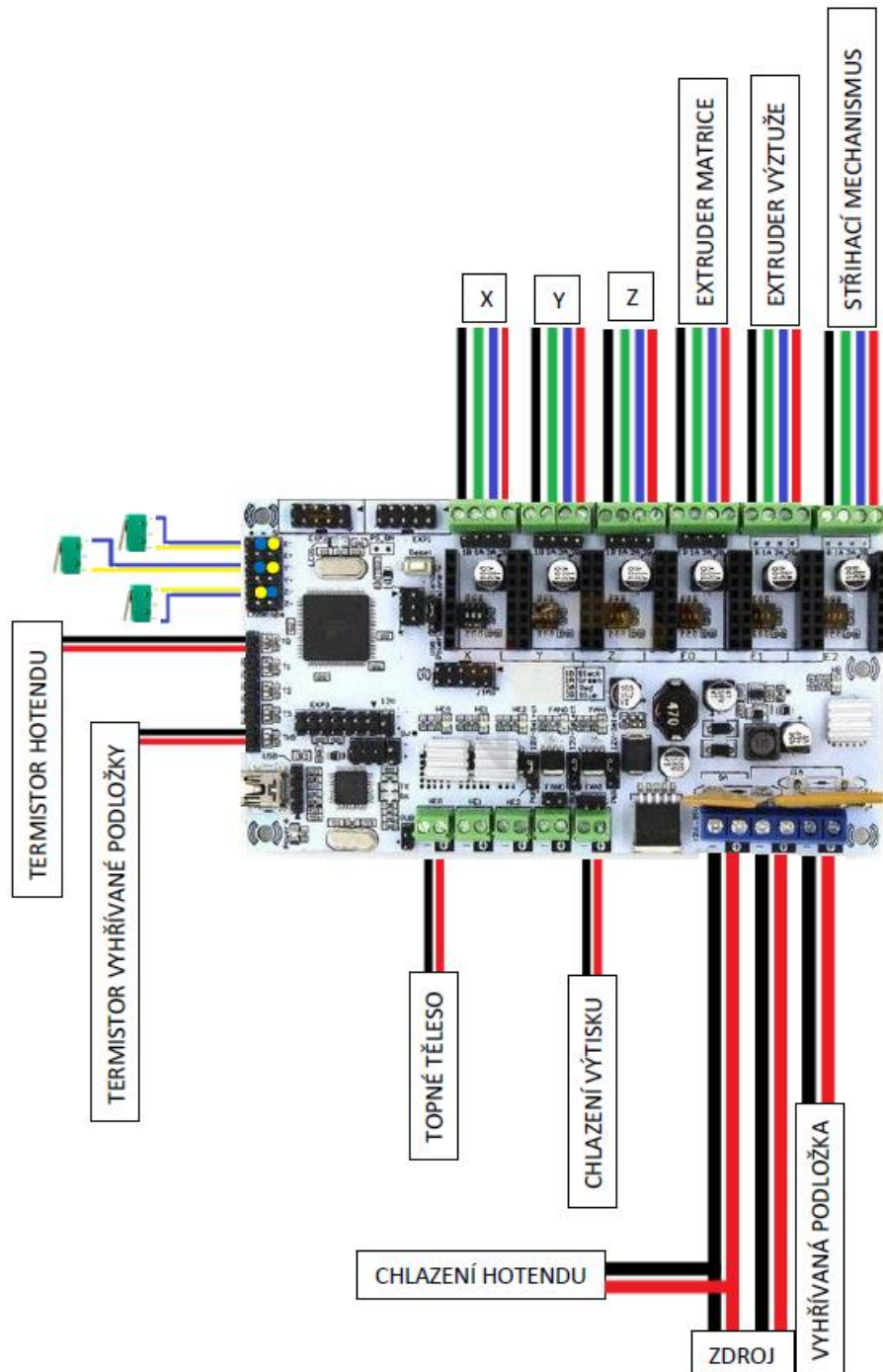
Schéma zapojení základní desky

Výkres topné kostky – verze 1

Výkres topné kostky – verze 2

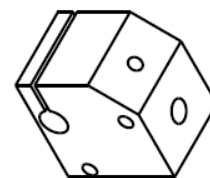
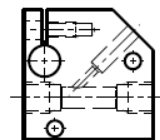
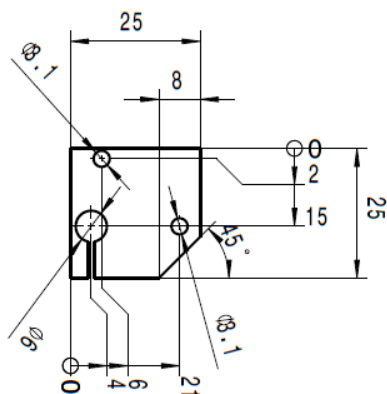
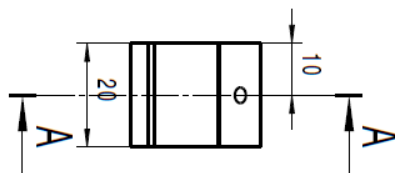
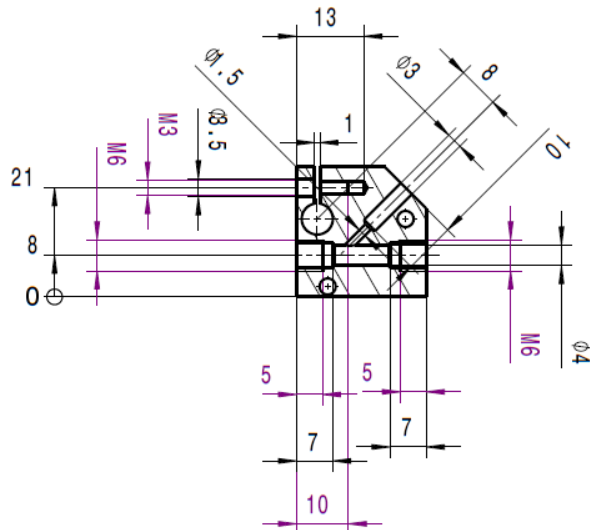


Schéma zapojení základní desky





Výkres topné kostky – verze 1





Výkres topné kostky – verze 2

