

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE
2022
JINDŘICH
ŠTERCL**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štercl** Jméno: **Jindřich** Osobní číslo: **475004**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a konstrukce extrudéru filamentu pro FDM tisk

Název diplomové práce anglicky:

Design of filament extruder for FDM printing

Pokyny pro vypracování:

1. Materiály pro FDM tisk
2. Rešerše současného trhu s extrudéry filamentů
3. Návrh konstrukce extrudéru
4. Zhotovení prototypu extrudéru a vyhodnocení jeho funkce

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lukáš Pelikán ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **22.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Lukáš Pelikán
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
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.

11.4.2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Lukáši Pelikánovi za čas věnovaný při konzultacích a cenné rady.

Dále patří mé díky Mubea, spol. s r.o., zejména mému nadřízenému Otomaru Šedivému, za nabídku tématu této práce a poskytnutí finančních prostředků.

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí prototypu vytlačovacího stroje, který má produkovat filament do 3D tiskáren používajících technologie FDM. V rešeršní části je popsána technologie FDM, běžně používané materiály touto technologií a následně je vysvětlena technologie vytlačování. Poté jsou představeny komerčně vyráběné extrudéry, které jsou pro svou velikost vhodné pro provoz v domácnosti nebo v kanceláři. V praktické části je vysvětlena volba použitých součástí a je popsáno správné a bezpečné používání stroje. Je vyrobeno několik vzorků filamentu, u nichž jsou změřeny rozměry, a jeden ze vzorků je použit na tisk testovacího modelu.

Abstract: This master's thesis is about the design and construction of a prototype of an extruder which is supposed to produce a filament used in FDM 3D printers. The theoretical part of this thesis concerns with FDM 3D printing technology, materials often used by it and technology of extrusion. Then, commercially produced filament extruders, which can be operated at home or in an office setting, are shown. In the experimental part, firstly the choice of individual parts is explained and then correct and safe way to use the machine is outlined. Lastly, multiple samples are produced, measured and then one of those sample is used to print experimental model.

Klíčová slova: extrudér, vytlačování, 3D tisk, FDM, filament

Key words: extruder, extrusion, 3D printing, FDM, filament

Obsah

Obsah	6
1 Úvod	8
2 Technologie FDM	9
3 Materiály pro FDM tisk.....	12
3.1 PLA	12
3.2 ABS	12
3.3 PETG.....	13
3.4 ASA.....	14
3.5 PC.....	14
3.6 PC Carbon Fiber.....	14
3.7 PVB.....	15
4 Technologie vytlačování	17
4.1 Dávkovací mechanismus.....	17
4.2 Vytlačovací stroj	19
4.2.1 Jednošnekový vytlačovací stroj	20
4.2.2 Dvoušnekový vytlačovací stroj.....	23
4.3 Vytlačovací hlavy.....	24
4.3.1 Přímé vytlačovací hlavy.....	25
4.3.2 Nepřímé vytlačovací hlavy	25
4.4 Kalibrace	26
4.5 Defekty výtlačků	27
4.5.1 Narůstání profilu za vytlačovací hlavou	27
4.5.2 Porucha toku	28
4.5.3 Smršťování a deformace při chlazení	28
5 Extrudéry na trhu	29
6 Návrh	36
7 Volba součástí a konstrukce	38
7.1 Šnek.....	38
7.2 Vytlačovací válec	38
7.3 Hnací ústrojí.....	39
7.3.1 Spojka	40

7.3.2	Motor a převodovka.....	41
7.4	Topná tělesa	43
7.5	Termočlánky	44
7.6	Regulátor teploty.....	45
7.7	Vytlačovací hlava.....	46
7.8	Držák na motor, ložisko a vytlačovací válec	47
7.9	Násypka.....	48
7.10	Podstava extrudéru	48
8	Hodnocení funkce extrudéru	50
8.1	Ovládání a používání stroje.....	50
8.2	Vytlačování filamentu	51
8.3	Hodnocení filamentu	57
9	Závěr.....	59
10	Citovaná literatura.....	61
11	Seznam obrázků.....	64

1 Úvod

Od roku 1984, kdy si nechal Charles W. Hull patentovat stereolitografii (1), ušly aditivní technologie dlouhou cestu. 3D tisk zanechal své otisky v mnoha odvětvích - lékařství (kloubní náhrady, měkké tkáně), potravinářství a jiné. Široké využití si žádá také široké spektrum materiálů, ze kterých je možné tisknout. V současnosti lze tisknout z plastů, kovů (korozivzdorné a vysokopevnostní oceli, slitiny hliníku, mědi, titanu, ...), ze stavebních hmot se tisknou prototypy obydlí a díky tomu nachází využití jak v průmyslu tak mezi nadšenci (2).

V poslední době cena filamentu do FDM tiskáren roste. Je proto záhodné přicházet s možnostmi snižování nákladů na filament. Kromě toho pro jednu z poboček Mubea spol. s r.o. vznikla potřeba recyklovat plastový odpad z 3D tiskáren. Jako logické řešení těchto dvou problémů se nabízí z odpadu vyrábět nový filament. Práce proto pojednává o vývoji vytlačovacího stroje, který má za cíl naplnit tuto potřebu.

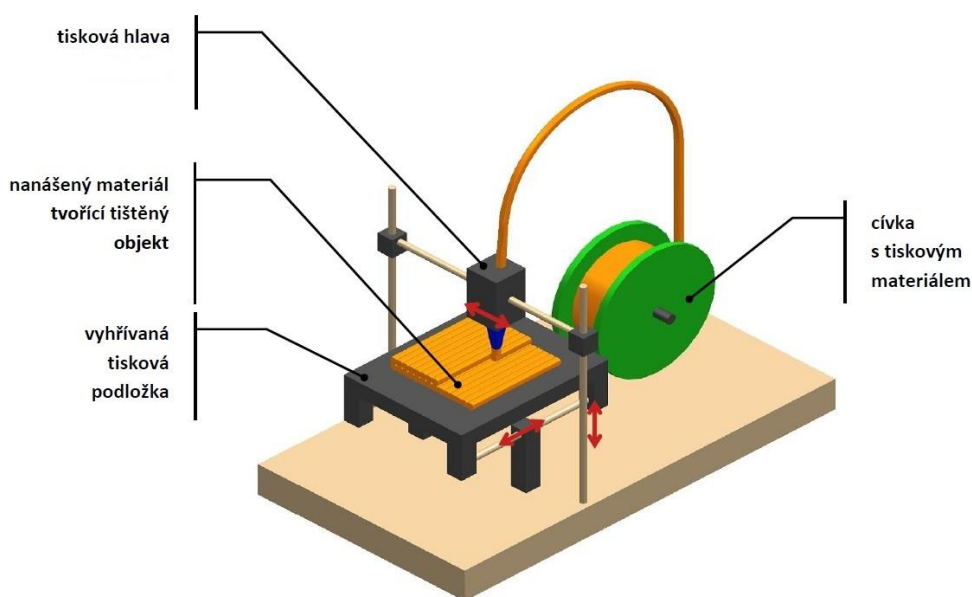
Cílem této práce je shrnout základy FDM 3D tisku a materiálů běžně používaných touto technologií. Následně je popsána technologie vytlačování, podstatné součásti vytlačovacích strojů a defekty, se kterými se lze u výtlačků setkat. Dále je vysvětlen myšlenkový postup, podle kterého byly zvoleny jednotlivé součásti přístroje. Je zdokumentován proces sestavování a uvádění stroje do provozu.

K výrobě filamentu se může v budoucnu využít odpadu z výroby komponent z uhlíkových vláken, kterou se zabývá sesterská firma. Vylepšování vlastností filamentu uhlíkovými vlákny však nebude předmětem této diplomové práce.

2 Technologie FDM

Zkratka FDM pochází z anglického fused deposition modeling. V literatuře se stejný proces může označovat také FFF (fused filament fabrication). Tiskovým materiálem je obecně termoplast. Ten je postupně nanášen na sebe vrstvu po vrstvě. Tiskový materiál musí být v podobě tiskové struny (filament). Manipulace s filamentem je mnohem jednodušší a bezpečnější než s pryskyřicí či práškem, které se využívají v jiných typech tiskáren.

Požizovací cena tiskáren se pohybuje v širokém rozmezí. Nejlevnější modely začínají na 2 500 Kč a ty profesionální mohou stát jednotky milionů korun. Mnoho lidí z praxe potvrdí, že kvalita výtisků se výrazně nezvyšuje po nákupu FDM tiskárny v cenové relaci 25 000 Kč. Z těchto důvodů je tato metoda tisku velmi oblíbená mezi širokou veřejností. Základní princip tiskárny lze vidět na Obrázku 1.



Obrázek 1: Schéma technologie FDM (3)

FDM tiskárny se dělí podle způsobu, kterým se v 3D prostoru pohybují.

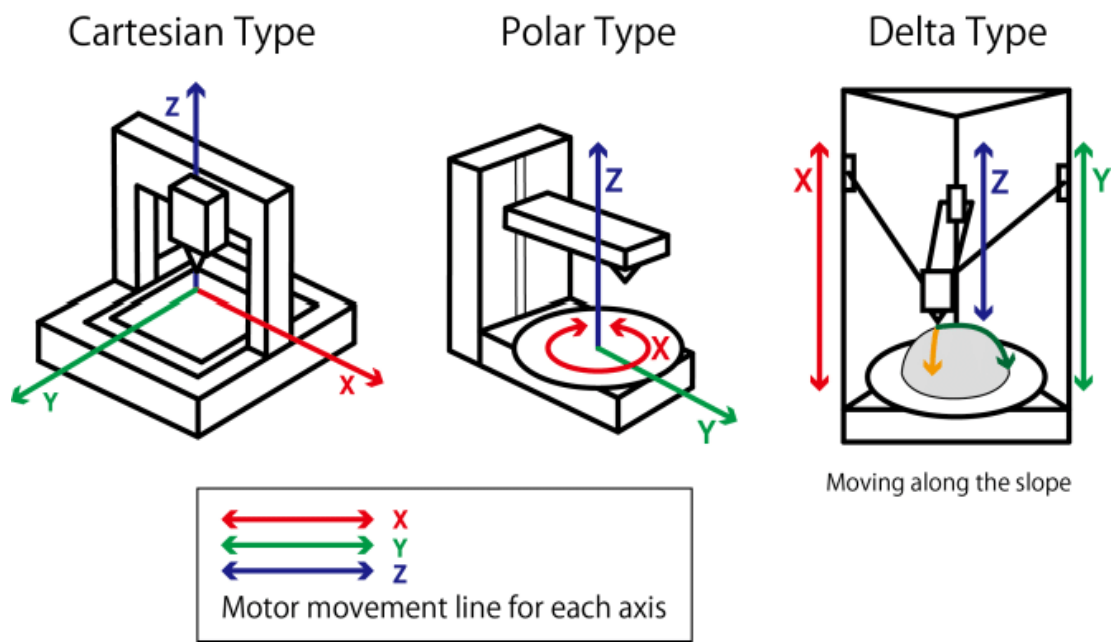
Kartézská tiskárna je založena na principu pohybu po třech lineárních osách, přičemž tisková hlava vytlačující materiál (extrudér) se pohybuje ve dvou osách (X, Z) a podložka po jedné (Y).

Tisková podložka je proto u většiny tiskáren pravoúhlého tvaru. Pohyb tiskové hlavy je v obou z os X i Y zprostředkováván vždy jedním krokovým motorem. U osy Z je tomu jinak. Ta může být ovládána jak jedním motorem, jako je tomu třeba u tiskáren řady Ender od Creality (4), tak dvěma motory. Tím druhým způsobem je řešen například model MK3S+ od Prusa Research (5). Obě řešení mají svá opodstatnění. To s jedním motorem bude levnější a u toho se dvěma je lépe vyřešen problém tuhosti příčky.

Delta tiskárna využívá zavěšeného extrudéru na třech ramenech, která jsou spolu spojená právě v místě extrudéru. Výhodou jsou rychlé pohyby a velký tiskový prostor především v ose Z. Naopak tiskárna vyžaduje vysokou přesnost při stavbě a následné kalibraci. Složitá geometrie vyžaduje náročné výpočty pro pohyby krokových motorů jednotlivých ramen. Zástupci této kategorie tiskáren jsou Predator a Kossel Linear Plus od firmy Anycubic (6).

Polar tiskárna je méně používaný systém založený na polárním pohybu tiskové hlavy po dvou osách a rotační podložce. Tento systém je konstrukčně velmi jednoduchý, ale převedení a příprava modelu pro tisk je naopak v tomto případě poměrně komplikovaná (2) (7).

Obrázek 2 výstižně ukazuje rozdíly mezi těmito druhy uzpůsobení tiskáren.



Obrázek 2: Různá provedení FDM 3D tiskáren (8)

3 Materiály pro FDM tisk

Filament používaný v FDM tiskárnách se prodává po špulcích/cívkách o běžných hmotnostech 0,75 kg, 1 kg nebo 2 kg. Průměry vyráběných filamentů jsou 1,75 mm, 2,85 mm a výjimečně i 3 mm. Průměr filamentu se u většiny výrobců pohybuje v toleranci $\pm 0,05$ mm.

Po vybrání těchto parametrů závisících na typu tiskárny a velikosti výrobku je nutné vybrat materiál, ze kterého budeme vyrábět. Dále jsou popsány materiály běžně užívané v FDM tiskárnách. Aby byl výběr něčím omezen, jsou uvedeny materiály firmy Prusament. K těm bude přidán ještě ABS, kterým se firma Prusament nezabývá, ale je taktéž hojně využívaný. Jako kritéria pro srovnání jednotlivých materiálů jsou zvoleny jejich fyzikální vlastnosti, jednoduchost použití, pracovní teplota, cena a případné speciální vlastnosti.

3.1 PLA

Zkratka PLA v sobě skrývá název polylactic acid, tedy kyselina polymléčná. Jedná se o biologicky rozložitelný polyester vyráběný z rostlinných materiálů. Kompostovat se však dá pouze v průmyslových kompostárnách, ve kterých teploty přesahují 80 °C. Na běžných kompostech se zcela nerozloží a půdu kontaminuje mikročásticemi plastu. Teplota tání a teplota skelného přechodu jsou relativně nízké, což má za následek nízkou teplotu tisku (175 °C), ale i nízkou teplotní odolnost (začíná měknout už při 60 °C). Relativně nízká teplotní roztažnost umožňuje tisk rozměrných objektů bez kroucení. Dobře se jím tisknou díly s vysokou mírou detailu. Není vhodný na technické a venkovní použití kvůli zmíněné teplotní odolnosti, degradaci při vystavení UV záření a křehkosti. Výrobky z PLA lze následně brousit smirkovým papírem (9).

Kombinace nízké teploty tání, teplotní roztažnosti a ceny dělá z PLA širokou veřejností oblíbený materiál.

3.2 ABS

Acrylonitrile butadiene styrene se používá k výrobě mechanicky odolných a levných dílů. Setkáme se s ním u dílů do aut, krytů na mobily, kostkách LEGO atd. Je houževnatý a teplotně odolný, což z něj dělá materiál vhodný pro tvorbu dílů ve strojírenství. Pokud je výtisk z ABS vystaven dlouhodobě UV záření, zžehne a zežloutne.

Velká nevýhoda tohoto materiálu je poměrně velká teplotní roztažnost. Ta se projevuje kroucením rozměrných tisků a v případě, že se tisk nezkroutí, musíme počítat se smrštěním o 1-2 %. S tímto problémem se budeme potýkat, pokud chceme spasovat ABS výtisk s jiným dílem. Doporučuje se nejdříve vytisknout zkušební díl (pro ušetření materiálu a času třeba jen tu část, která musí být vyrobena přesně), přeměřit, o kolik se smrští při použití daného filamentu a nastavení tiskárny, a před následujícím tiskem upravit měřítko modelu ve sliceru na odpovídající hodnotu. Pokud chceme předejít kroucení, měla by být tiskárna uvnitř boxu, který udržuje teplo vydávané podložkou v blízkosti tisku po delší dobu (9).

Dalším problémem jsou látky uvolňované během tisku. Většina plastových materiálů se potýká se stejným problémem, ale ABS se opakovaně ve studiích zmiňuje jako největší viník. Při tisku do vzduchu vypouští množství karcinogenního styrenu a jemných částic. Dlouhodobé vystavení výparům může způsobovat nevolnost a bolesti hlavy. Množství škodlivých látek se však řádově mění v závislosti na výrobcí filamentu. Obrovský vliv má také to, jak moc nebo jestli vůbec je místnost s tiskárnou/tiskárnami větraná. Doporučuje se proto tiskárny provozovat ve ventilovaných místnostech a pokud možno při jejich chodu nebýt přítomen (10).

Materiál ABS se občas používá z toho důvodu, že je možné vyhladit povrch pomocí acetonových par. Výsledný povrch je lesklý a po určité době vyhlazování zaniká pro FDM typická vrstvená struktura na povrchu tisku. Při této technice však zanikají drobné detaily a ostré hrany se zaoblují. Proto se používá spíše pro okrasné předměty (9).

3.3 PETG

Materiál PETG se od běžného PET (polyethylene terephthalate) liší tím, že je modifikovaný glykolem. Tento přídavek snižuje jeho křehkost. PETG se používá v případech, že je potřeba vyrobit levné, technické díly. Díky nízké tepelné roztažností se nebudou při tisku kroutit. Je teplotně odolný (do 80 °C), takže pokud si chceme vytisknout držák do auta, který vydrží letní teploty bez toho, aby se zdeformoval, PETG je správná volba. Dobré propojení vrstev umožňuje tisk vodotěsných dílů, jako jsou vázy či misky. Důsledkem této vlastnosti je však to, že podpory lze hůře oddělovat od tištěného dílu. Pokud se tento problém vyskytuje i při použití výrobcem doporučených podmínek tisku, lze v nastavení sliceru dále zvýšit vzdálenost podpor od dílu (9).

3.4 ASA

Acrylic Styrene Acrylonitrile je pro schopnost být vyhlazován acetonem srovnáván s ABS. Oproti tomuto materiálu je však odolnější vůči UV záření a je teplotně odolný až do 93 °C, což z něj dělá plast vhodný pro dlouhodobé venkovní použití.

Vyskytují se u něj silné problémy s kroucením, kterým je radno předcházet vhodnou úpravou součástky a oplátováním tiskového prostoru. Zápach při tisku není tak intenzivní jako u ABS, ale výpary, které jej způsobují, jsou potenciálně nebezpečné. Proto je dobré s tím počítat a zařídit se podle toho (9).

3.5 PC

Polykarbonát má mezi běžně používanými materiály nejlepší technické vlastnosti. Vyznačuje se odolností vůči vysokým teplotám, pevností v tahu a dobrou houževnatostí. V porovnání s PLA nebo PETG se však obtížněji tiskne (což může odradit úplné začátečníky od použití tohoto materiálu). To různí výrobci kompenzují přidáváním aditiv pro ovlivnění teplotní roztažnosti a hygroskopie materiálu. Zmíněné pohlcování vlhkosti sužuje zejména čistý polykarbonát. Filament by se tedy měl uchovávat ve vzduchotěsných materiálech s vysoušedly, případně umístit před použitím do vysoušecí trouby (9).

3.6 PC Carbon Fiber

Již z názvu materiálu plyne, že se jedná o polykarbonát bohatý o uhlíková vlákna. Tato vlákna mají průměr mezi 5 a 10 mikrometry a v případě filamentů nejsou delší než 1 mm. Oproti standardnímu PC se tiskne ještě hůř, neboť se objevují problémy s ucpáváním trysky a jejím rychlejším opotřebením. Proto je doporučováno použití trysky ocelové. Při určitém poměru vláken v materiálu dochází ke zhoršení vzhledu povrchu. PCCF se tiskne za poměrně vysokých teplot (tryska 240-275 °C, podložka 75-110 °C), nabízí však výbornou teplotní odolnost – 114 °C po vytisknutí a dokonce 130 °C ve vyžíhaném stavu. Vysoká pevnost a houževnatost ho předurčuje k tisku mechanicky namáhaných dílů, viz Obrázek 3 (9)



Obrázek 3: Příklad použití PCCF (9)

3.7 PVB

Polyvinyl butyral je materiál nevhodný na výrobu mechanicky namáhaných součástí. Své využití najde díky svým vlastnostem hlavně v designu. Je průsvitný a po chemickém vyhlazení v isopropyl alkoholu se dá vzhledem připodobnit ke sklu. Nabízí se proto na výrobu váz, šperků, lustrů nebo stínidel na lampy. Výsledný vzhled těchto objektů lze výrazně ovlivnit změnou tiskového nastavení – tloušťka vrstvy, počet perimetrů a procento výplně. Mezi jeho pozitiva patří skvělá přilnavost k podložce, malá smrštitivost (menší než u PLA) a jeho tiskové vlastnosti umožňují použití trysky 0,8 mm. Záporům je u PVB špatná soudržnost vrstev (horší než u PLA) a schopnost materiálu pohlcovat vzdušnou vlhkost. Z tohoto důvodu se doporučuje skladovat filament v původním obalu se sáčky silicagelu, případně jej před tiskem sušit po dobu 4 h při teplotě 60 °C (6).

V závěru této kapitoly jsou v Tabulce 1 uvedeny vybrané vlastnosti popisovaných materiálů. V prvním sloupci lze najít jejich názvy, druhý a třetí sloupec obsahuje obecné doporučení nastavení teplot tiskárny. Čtvrtý sloupec s názvem rázová houževnatost ukazuje energii potřebnou k přelomení testovacího vzorku Charpyho kyvadlem dle normy ISO 179-1. Odolnost v tahu byla určena dle normy ISO 527-1 a je to napětí potřebné k přetržení nebo nevratné deformaci testovacích vzorků. Hodnoty pro materiál ABS platí pro filament od firmy Filamentum, ostatní pro filament od firmy Prusament.

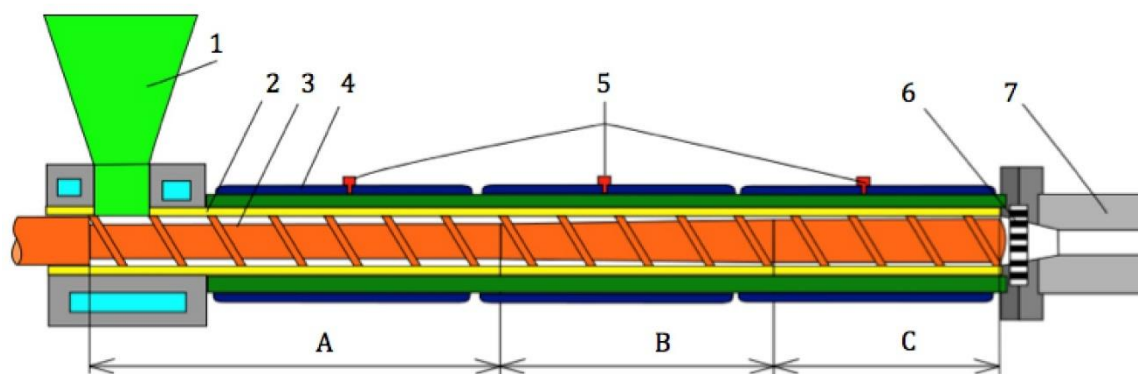
Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti vybraných materiálů (9)

	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Teplotní odolnost [°C]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]	Odolnost v tahu [MPa]
PLA	210-215	60	55	12	57
ABS	240-255	110	81	32	39
PETG	230-270	90	68	42	46
ASA	260-265	95-110	86	25	42
PC	270-275	115	113	74	59
PCCF	285	115	114	35	65
PVB	215	75	55	55	50

4 Technologie vytačování

Vytačováním je možné vyrobit široké spektrum polotovarů, nejčastěji se jedná o desky, dráty, trubky, tyče, profily L, U a jiné komplikovanější profily. Je jím možné vyrábět trubky až do průměru 1600 mm s tím, že tloušťka stěny nepřesahuje 60 mm. Tloušťka desek se pohybuje v rozmezí od 1 do 60 mm a její šířka může být až 2000 mm (11).

Tento proces se provádí na vytačovacích strojích neboli extrudérech. Základem stroje je šnek, který se otáčí v ocelovém válci (plastikační komoře). Na začátku válce je násypka (případně jiný způsob přísunu materiálu), která do něj přivádí granulát. Ten je ohříván topnými tělesy, která jsou rozmístěna na vnější straně válce. Šnek posouvá granulát plastikační komorou směrem k vytačovací hlavě. Před ní se u některých extrudérů nachází ještě lamač, který společně se sítem homogenizuje taveninu a zachycuje neroztavený granulát a případné nečistoty (11). Schéma extrudéru lze najít na Obrázku 4.

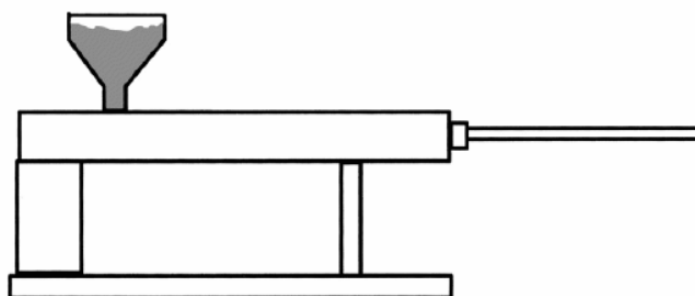


Obrázek 4: Vytačovací stroj (extrudér) v řezu: A – plnicí zóna, B – plastikační zóna, C – vytačovací zóna, 1 – násypka, 2 – válec, 3 – šnek, 4 – elektrické odporové topení, 5 – termočlánek, 6 – lamač, 7 – vytačovací hlava

4.1 Dávkovací mechanismus

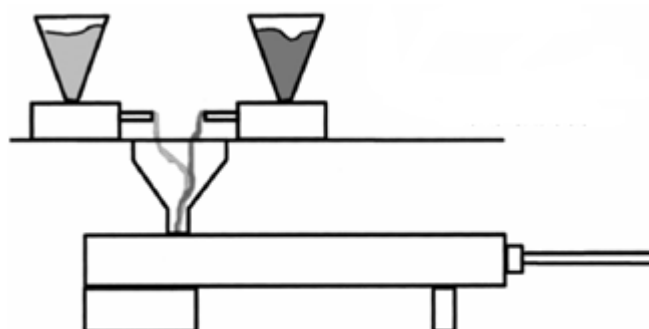
Dávkovací mechanismus obstarává přísun materiálu nejčastěji v podobě plastového granulátu do vstupní části plastikační komory.

Záplavové plnění je nejběžnější způsob dávkování. Materiál je umístěn v zásobníku nad otvorem do vytačovací komory a vlivem gravitace do ní vstupuje. Množství materiálu, které projde extrudérem, je přímo úměrné otáčkám šneku (12).



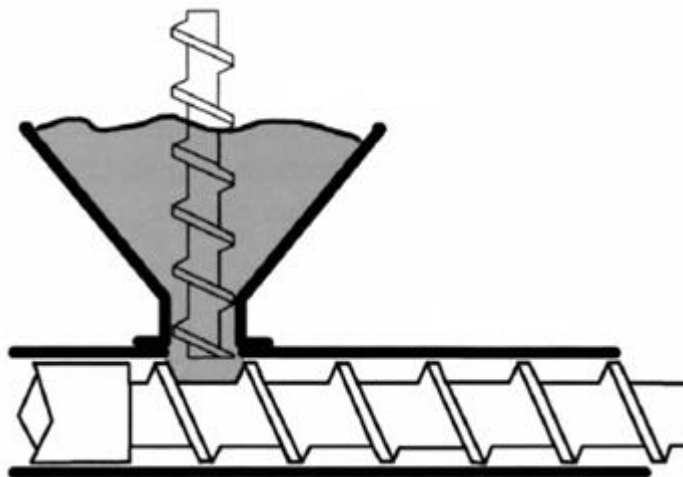
Obrázek 5: Záplavové krmení (12)

Hladověcí plnění probíhá tak, že podavače zásobují plastikační komoru materiálem určitou rychlostí a šnek ho odebírá vyšším tempem. V hrdle vytlačovacího stroje proto nevzniká nadbytek materiálu. Výhodou tohoto způsobu dávkování je možnost nastavení přesného poměru míchaných přísad a k zasekávání v hrdle kvůli včasnému odběru materiálu téměř nedochází. Na Obrázku 6 je zobrazeno typické schéma hladověcího plnění (12).



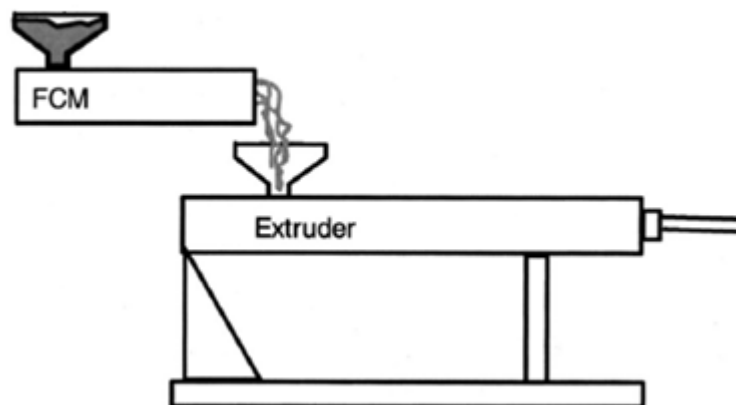
Obrázek 6: Hladovějící krmení (12)

Nucené plnění, jež lze vidět na Obrázku 7, se používá v případech, kdy se materiál obtížně dostává přes hrdlo násypky sám od sebe a u materiálů s nízkou bulkovou hustotou. Šroubový mechanismus uvnitř násypky předává materiál přímo do vytlačovacího stroje. Je nutné nastavit odpovídající množství podávaného materiálu, aby nedocházelo k přeplňování, které by mohlo vést k poškození šneku ve vytlačovacím stroji. Musí se tedy dbát zvýšené opatrnosti zvláště v zabíhací fázi procesu (12).



Obrázek 7: Nucené plnění (12)

Tavné plnění se využívá pro takové aplikace, kde je nutné materiál tepelně předpřipravit. Příkladem je Farrel Continuous Mixer (FCM), viz Obrázek 8. Ten materiál tepelně zpracuje a dodá do vytlačovacího stroje. Bývá obvykle kratší, protože v této fázi není nutné polymer zcela roztavit, dokonale promíchat a homogenizovat (12).



Obrázek 8: Tavné plnění (12)

4.2 Vytlačovací stroj

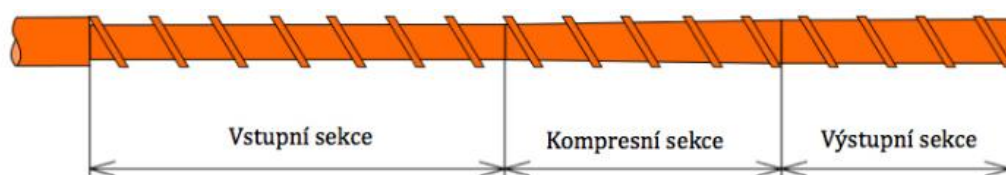
Vytlačovací stroj musí zajistit především rovnoměrnou dopravu taveniny do vytlačovací hlavy bez pulzace (před čelem šneku) a bez orientace makromolekul (případně plniva),

rovnoměrné prohřátí taveniny s homogenním rozmícháním všech aditiv a vysoký vytlačovací výkon.

Vytlačovací stroje se dělí podle několika hledisek. Jedním z nich je konstrukční uspořádání extrudéru. Mohou být jednošnekové, vícešnekové, pístové nebo diskové. Dalším příkladem dělení zejména u šnekového uspořádání je to, jestli se jedná o rychloběžný nebo pomaloběžný stroj. U rychloběžných strojů dosahuje šnek otáček 250 až 1500 za minutu). Vzhledem k velmi intenzivnímu tření není nutné vytápět plastikační jednotku v celé délce, ale pouze na jejím začátku. Délka šneku zde není rovněž tak velká jako u strojů pomaloběžných, pouze 15-násobek až 17-násobek průměru. Pomaloběžné stroje mají plastikační jednotku vyhřívanou v celé délce a délka šneku je až do 30-násobku průměru (13).

4.2.1 Jednošnekový vytlačovací stroj

Základním prvkem šnekového vytlačovacího stroje je šroubovice, která posouvá materiál vyhřívanou komorou podél své osy do vytlačovací hlavy. Tato šroubovice má standardně tři oddělené segmenty, které lze vidět na Obrázku 9.

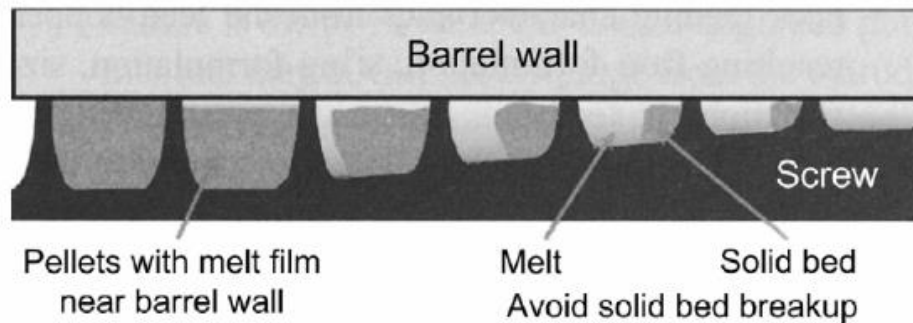


Obrázek 9: Schéma vytlačovacího šneku (11)

Plnicí zóna (vstupní) přijímá z násypky plastový granulát a šroubovice ho plynule posouvá do dalších částí šneku. Hloubka drážky šneku je právě v této fázi největší. Funkce této zóny je pouze dopravní a lze připodobnit k Archimédovu šroubu.

Plastifikační zóna (kompresní) je prostřední část šneku, ve které dochází k přeměně granulí polymeru v tuhém stavu na taveninu. Toho je dosaženo především teplem přivedeným přes stěny válce od topných těles, třením polymeru o stěny válce a o šnek a smykovým namáháním polymeru. Podíl těchto složek záleží na nastavení vytlačovacího stroje, geometrii šneku a na vytlačovaném materiálu. Tavení polymeru začíná na stěně

válce, odkud je tavenina stírána čelem závitu a klouže po něm a pak po další části drážky, viz Obrázek 10.



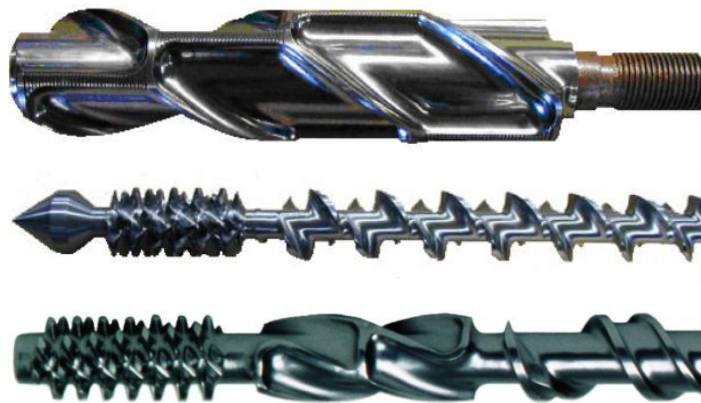
Obrázek 10: Schéma postupného tavení polymeru v jednošnekovém vytlačovacím stroji (12)

Dávkovací zóna (výstupní) je poslední částí šneku. Tavenina v ní dosahuje potřebného tlaku k vytlačení a probíhá zde dokončování procesu plastifikace a homogenizace. Je zde největší průměr jádra, tudíž hloubka drážky nejmenší a to udržuje dostatečně vysoký tlak taveniny. Oproti šnekům pro vstříkovací stroje, kde šnek funguje zároveň jako píst, nemá špička šneku specifickou funkci a nemusí tedy mít speciální tvar (11).

Šroub může mít kromě těchto zón ještě samostatné míchací elementy. Jejich volba závisí na materiálu, který je vytlačován. Je 5 hlavních požadavků na míchací elementy, které by měly být splněny nebo alespoň brány v potaz:

- měly by zapříčinit minimální ztrátu tlaku taveniny,
- měly by být snadno čistitelné,
- míchací sekce by měla stírat celý povrch vytlačovací komory,
- míchací sekce by neměla bránit rozložení a složení stroje,
- míchací sekce by neměly neúměrně zvýšit cenu šroubu (12).

Na Obrázku 11 je vidět několik příkladů míchacích elementů.



Obrázek 11: Mísicí a torpédové sekce šneku (11)

U vytlačovacích strojů je důležitá otázka množství vyprodukovaného materiálu. Pokud bereme v potaz celou výrobní linku, je zde mnoho omezujících faktorů. Omezujícími faktory jsou kapacita extrudéru (tu můžeme rozdělit na kapacitu tavení polymeru a výkonu pohonné jednotky), kalibrace, kapacita chladicí jednotky (limitovaná výměnnou tepla mezi produktem a chladicím médiem), kapacita manipulace s výtlačkem a dalšího zpracování (řezání, navíjení,...), reologické vlastnosti polymeru a délka celé linky (např. kvůli stísněnému prostoru se nemůže do prostoru vejít dostatečné množství chladicích van). V ideálním případě by měl být omezující faktor nejdražší stroj v celé lince. Jinými slovy výkonnost linky by neměla být omezena nedostatečně velkou chladicí lázní, nýbrž vytlačovacím strojem.

Množství vytlačeného materiálu se spočítá jako:

$$\text{výkon } (Q) = \text{odporový tok } (Q_D) - \text{tlakový tok } (Q_P) - \text{ztrátový tok } (Q_{LF}) \quad (12)$$

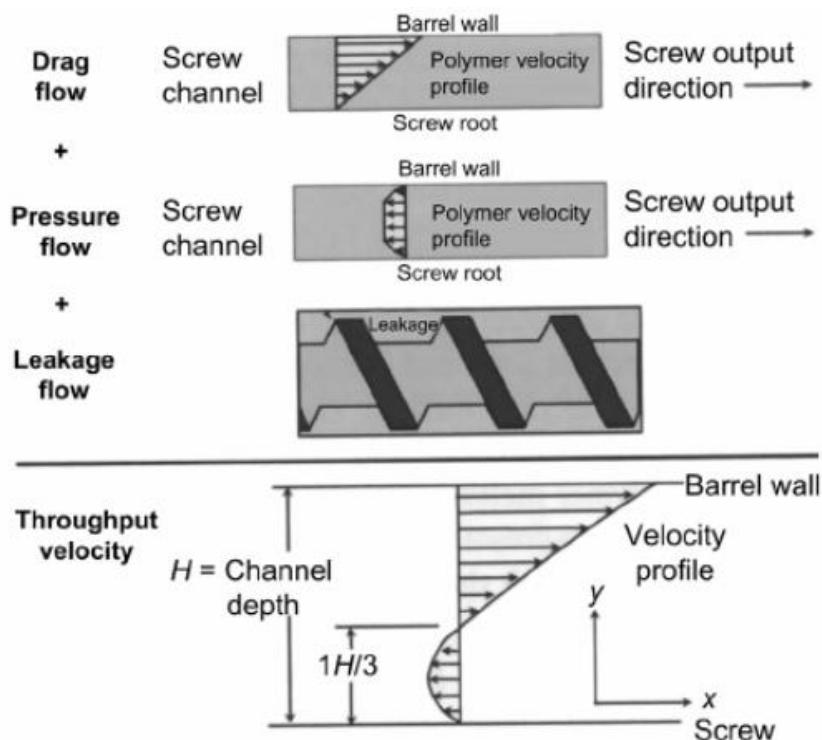
Odporový tok je vytvářen otáčením šneku ve vytlačovací komoře. Profil rychlosti tohoto toku je takový, že u stěny komory má polymer nejvyšší rychlost a ta se lineárně snižuje až k nule u jádra šneku.

Tlakový tok je zpětný tok polymeru směřující od výstupu z extrudéru k jeho vstupu. Profil rychlosti je obdobný tomu v trubce – nulový na stěně válce a na jádru a největší rychlost je uprostřed.

Aby se mohl šnek volně otáčet v barelu, musí mít nutně menší průměr než je průměr daného barelu. To však umožňuje vznik **ztrátovému toku**. Malé množství polymeru se touto mezerou mezi šroubovicí a vnitřní stěnou vytlačovací komory dostane zpět směrem

ke vstupu pro materiál. Pro nové, neopotřebované šneky lze tento tok zanedbat, avšak s postupujícím opotřebením se vliv ztrátového toku zvyšuje (12).

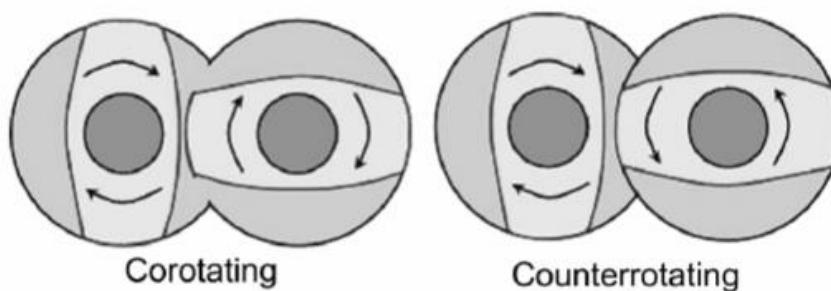
Výsledný rychlostní profil v drážce šneku je vidět na Obrázku 12.



Obrázek 12: Rychlostní profil taveniny v drážce šneku (12)

4.2.2 Dvoušnekový vytlačovací stroj

Významným typem konstrukce je dvoušnekový extrudér. Ten má, jak z názvu vyplývá, dva šneky. Mohou se točit jak souhlasným směrem (anglicky corotating), tak i protiběžným (anglicky counterrotating), jak lze vidět na Obrázku 13. Plastikační komora nemá tvar kruhu, ale ležaté osmičky.



Obrázek 13: Naznačení otáčení v souhlasném a nesouhlasném směru (12)

Další způsob, kterým je možné tyto stroje rozlišovat je podle toho, jestli do sebe šroubovice zasahují (anglicky intermeshing) nebo nezasahují (non-intermeshing). Daleko častěji se lze v praxi setkat s do sebe zasahujícím uspořádáním. Jsou pro to dva důvody:

- objevuje se zde samočistící efekt - šneky se vzájemně stírají,
- materiál se nuceně posouvá směrem k vytlačovací hlavě – to znamená nižší dobu zadržení polymeru a vyšší kvalitu výrobku.

Příklad lze vidět na Obrázku 14.

Tento typ vytlačovacího stroje má logicky lepší míchací účinek než jeho jednošnekový ekvivalent, což přijde vhod, zejména pokud se vytlačuje materiál z několika složek. Míchací účinek se silně odvíjí od toho, jestli se šneky točí souhlasně nebo nesouhlasně a do jaké míry do sebe zasahují. Na Obrázku 14 jsou nesouhlasně se otáčející šneky, jejichž šroubovice do sebe zasahují a vytlačovací komora s typickým otvorem ve tvaru osm.

Nevýhodou této konstrukce je vyšší pořizovací cena. Z tohoto důvodu není dvoušnekový mechanismus v této práci dále uvažován.



Obrázek 14: Vytlačovací komora a šneky dvoušnekového vytlačovacího stroje (14)

4.3 Vytlačovací hlavy

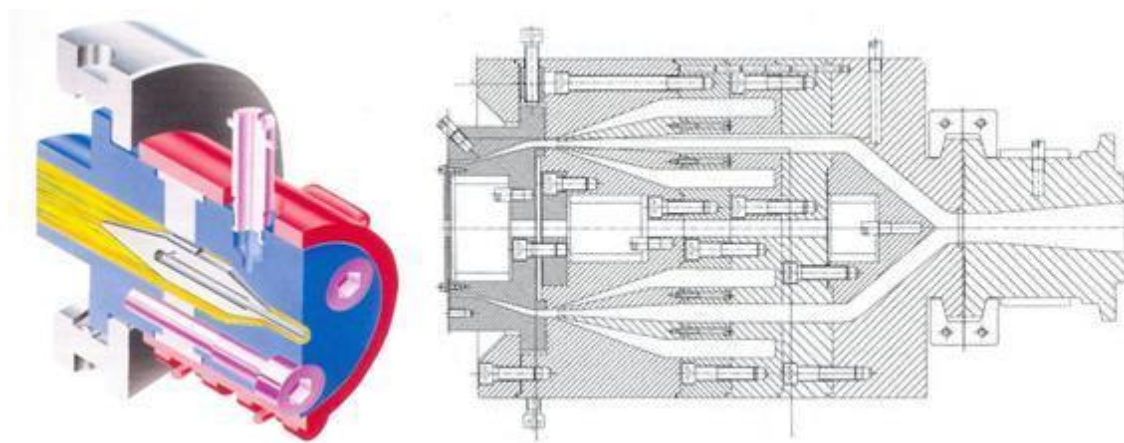
Vytlačovací hlava je část stroje, ve které materiál dopravovaný šnekovým mechanismem získává finální tvar. Hlava musí mít takový profil, aby zaručovala pravidelný a trvalý

proud taveniny. Nesmí v ní existovat tzv. mrtvé prostory, ve kterých by materiál zůstával v dlouhém kontaktu s její vyhřívanou částí. Kdyby se tak stalo, docházelo by k degradaci vytlačovaného materiálu. Hlava bývá připojena k válci šnekového vytlačovacího stroje několika způsoby. U menších strojů se někdy šroubuje na konec válce, jinak se používá bajonetové, objímkové nebo přírubové uchycení sklápěcími šrouby.

Vytlačovací hlavy se dělí nejčastěji podle jejich konstrukce a funkce. V následujících podkapitolách jsou jednotlivé případy přiblíženy.

4.3.1 Přímé vytlačovací hlavy

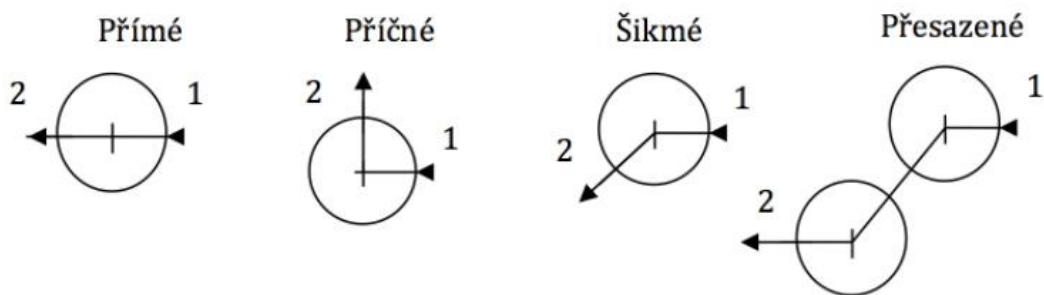
Přímé vytlačovací hlavy (viz Obrázek 15) jsou určeny především k výrobě uzavřených profilů, symetrických (trubky, hadice) i nesymetrických (okenní profily). Konstrukce hlavy pro uzavřené profily by měla zabezpečit volný přívod vzduchu do dutin profilu obzvláště u navíjených profilů. Dále se přímé hlavy používají k vytlačování otevřených profilů, jako je např. okapový žlab, apod. Hlavy pro vytlačování profilů jsou konstrukčně mnohem složitější. Hubice i trn jsou výrazně delší kvůli relaxaci napětí v tavenině. Při konstrukci a návrhu hlavy se musí počítat s narůstáním taveniny za hubicí, smrštěním při chlazení a se změnou rozměrů vlivem protažení (15).



Obrázek 15: Schéma přímé vytlačovací hlavy pro výrobu trubek (15)

4.3.2 Nepřímé vytlačovací hlavy

Hlavy nepřímé můžeme dále dělit na šikmé, příčné a přesazené, viz Obrázek 16. U šikmých hlav svírá směr toku materiálu s osou šneku úhel mezi 30 až 60°, u příčných hlav je tento úhel 90°. V případě přesazené hlavy je směr toku s osou šneku rovnoběžný.



Obrázek 16: Typy vytlačovacích hlav (16)

Používají se na opláštění vodičů, kabelů, nebo kovových profilů, vyfukování fólií nebo dutých předmětů. Důvodem k tomuto konstrukčnímu uspořádání je ten, že kabel nebo drát určený k opláštění nemusí být veden skrz šnek (takové uspořádání by bylo velmi složité). Příklad opláštění kabelu je na Obrázku 17.



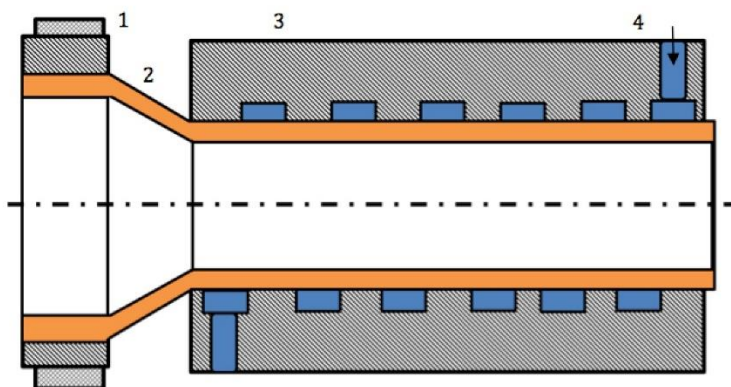
Obrázek 17: Příčná vytlačovací hlava při opláštění drátu (17)

Čím větší je úhel odklonu, tím větší jsou problémy nerovnoměrnosti toku taveniny. V ohybu taveniny dochází k deformacím, které je nutné řešit. Jedním ze způsobů je vyrobit lamač, který v sobě má díry různých průměrů. Na vnitřní straně ohybu jsou díry menší, což způsobuje větší odpor proti tečení a na vnější straně to je naopak.

4.4 Kalibrace

Cílem kalibrace je ochladit vytlačovaný profil natolik, aby získal požadovaný tvar a stabilní rozměr. V praxi se používají 3 různé způsoby kalibrace: přetlaková, vakuová a průvlastková. První dva zmíněné způsoby se používají pouze na výrobu dutých profilů a trubek. Pro výrobu tlustostěnných trubek, otevřených profilů a plných profilů (filament) se používá průvlastková kalibrace, která se konstrukčně řeší tak, že kalibrační pouzdro je

opatřeno šroubovou drážkou, kterou protiproudě prochází chladicí voda a ta ochladí povrch profilu natolik, že si uchová požadovaný tvar a rozměr. Místo pouzdra se šroubovitým kanálkem lze ke kalibraci použít sadu průvlaků s odstupňovanými rozměry (15). Na Obrázku 18 je vidět princip průvlakové kalibrace.



Obrázek 18: Schéma průvlakové kalibrace, 1 – vytlačovací hlava, 2 – kalibrovaná trubka, 3 – kalibrační pouzdro, 4 – chladicí kapalina (11)

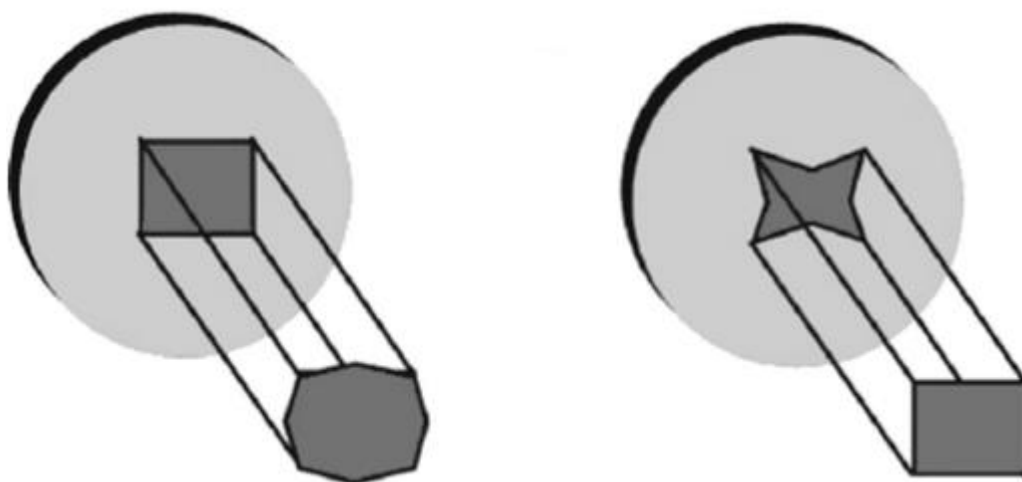
4.5 Defekty výtlačků

4.5.1 Narůstání profilu za vytlačovací hlavou

Při vytlačování se často stává, že vytlačovaný profil má větší průřez, než je průřez ústí vytlačovací hlavy. Toto narůstání je způsobeno normálovým napětím, kdy polymerní řetězce orientované ve směru toku taveniny zrelaxují (smrští se) a řetězce se mezi sebou částečně zesítují. Výrobek se tak v podélném směru smršťuje (zkracuje) a v příčném směru narůstá. Narůstání výtlačku se řídí těmito závislostmi:

- s rostoucí smykovou rychlostí je narůstání výtlačku výraznější,
- při konstantní smykové rychlosti narůstání za hubicí klesá s klesající teplotou, ale maximum poměru narůstání s rostoucí teplotou vzrůstá,
- při konstantní smykové rychlosti narůstání klesá se zvětšující se délkou hubice,
- čím delší je doba průchodu taveniny hubicí, tím menší je narůstání za hubicí (12).

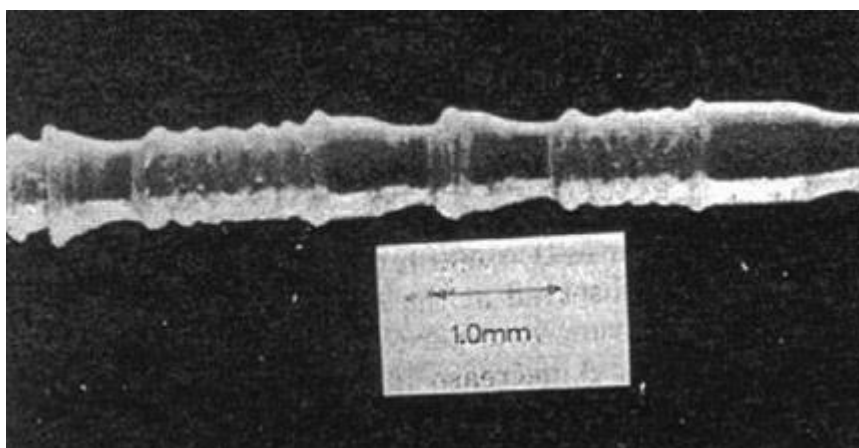
Obrázek 19 názorně ukazuje, jak se koriguje tvar výtlačku změnou tvaru otvoru z vytlačovací hlavy.



Obrázek 19: Při navrhování otvoru vytlačovací hlavy se musí počítat s narůstáním profilu (12)

4.5.2 Porucha toku

Porucha toku nastává v případě, že polymer je vytlačován tak, že smyková napětí nebo smyková rychlost se dostane nad kritickou mez. Tato mez je ovlivněna teplotou, typem polymeru a jeho relativní molekulovou hmotností. Porucha toku se projevuje jeho zvlněným povrchem, což je vidět na Obrázku 20. Tomuto jevu se někdy říká „shark skin“ (18).

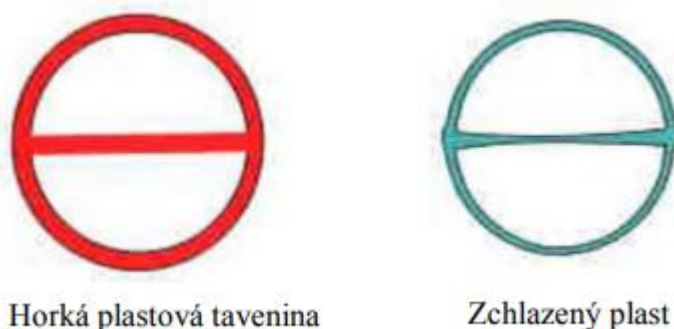


Obrázek 20: Porucha toku (shark skin) (18)

4.5.3 Smršťování a deformace při chlazení

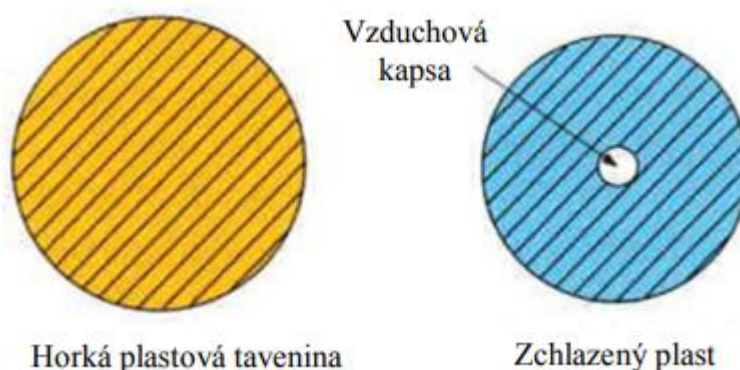
Po vytlačení plastu se na vzduchu nebo v chladicí lázni snižuje jeho teplota a dochází tak ke smršťování. Semikrystalické plasty se obecně smršťují při ochlazování více než amorfní, protože krystalická mřížka má větší hustotu oproti amorfní struktuře. Zvláště

v případě profilů s rozdílnou tloušťkou stěn (žebra, výstupky,...) může docházet k nerovnoměrnému ochlazení, viz Obrázek 21.



Obrázek 21: Deformace dutého profilu při chlazení (19)

U profilů s tlustými stěnami mohou vznikat vzduchové kapsy uvnitř tělesa. Je to z toho důvodu, že vnější část profilu se ochlazuje rychleji, ztuhne jako první a uzavírá stále tekuté jádro. Poté začne chladnout i jádro, to je však omezeno ztuhlou vnější stěnou a uvnitř profilu se vytvoří bublina, viz Obrázek 22.



Obrázek 22: Tvorba vzduchové kapsy vlivem chlazení (19)

Závažnost těchto jevů se odvíjí hlavně od rychlosti ochlazování výrobků po výstupu z vytlačovací hlavy. Používají se speciální chladicí nádrže s poustupným ochlazování, které zaručují pomalejší chladnutí výrobku. Jde o technologicky a cenově náročnější řešení (19).

5 Extrudéry na trhu

Na trhu již existují extrudéry od různých výrobců, které se liší v mnoha ohledech. Složitost konstrukce, stav sestavení (prodávají se jak složené, tak v rozloženém stavu),

uživatelská přívětivost, množství vyrobeného filamentu za hodinu a cena jsou považovány za důležité parametry. V této kapitole je představeno několik extrudérů, které jsou kvůli své velikosti vhodné pro provoz v domácnosti nebo kanceláři.

Filabot EX2

Filabot je výrobce produktů týkajících se výroby filamentu, tedy extrudérů a navíječů filamentu. Vstupním modelem mezi extrudéry od Filabotu je model EX2 (viz Obrázek 23), který stojí 2 750 dolarů, což je o mnoho méně než jeho sofistikovanější verze v ceně 11 000 dolarů.

Přístroj má schopnost vyvinout teplotu až 450 °C, což umožňuje produkci filamentu z polymerů s vysokou teplotou tání (skelného přechodu) jako je polykarbonát nebo polyetheretherketon. U materiálů s běžnou teplotou tání jako je PLA nebo ABS to znamená možnost rychlejší výroby oproti méně výkonným ekvivalentům.

Výrobce udává, že stroj je schopen vyrábět 1 kg filamentu za hodinu a to v toleranci ± 0.05 mm (20).



Obrázek 23: Filabot EX2 (20)

Wellzoom Pellet Extruder

Čínský výrobce zabývající se 3D tiskem a příslušenstvím k němu prodává svůj model B2 za 600 dolarů, viz Obrázek 24.

Je schopen vyvinout teplotu 300 °C a udržovat ji v rozpětí jednoho stupně. I přes slibovanou stabilitu teploty trysky se od uživatelů objevují recenze, že kvůli problémům s ohřevem má výsledný filament nestálý průměr. Uživatelé se dále shodují na tom, že

stroj je schopen vyprodukovat kolem 415 mm filemantu za minutu, přičemž výrobce hlásí, že toto číslo se může být až 615 mm/min (21).



Obrázek 24: Wellzoom Pellet Extruder (21)

3devo Precision

Firma 3devo nabízí přístroje, které dohromady tvoří řetězec umožňující zpracování starých plastových výtisků a jejich opětovného použití. Níže popsany extrudér zahrnuje drtičku, sušičku na granulát či drť a také extrudér.

3devo nabízí dvě řady vytlačovacích strojů - Composer a Precision (viz Obrázek 25). Composer má vytlačovací šroub, jehož tvar je vhodnější pro vytváření vlastních kombinací polymerů. Naproti tomu vytlačovací šroub stroje Precision umožňuje produktivní výrobu filamentu při zachování stejných rozměrových tolerancí. Vytlačovací stroje mají jednošnekovou konstrukci se čtyřmi ohřevovými zónami a na rozdíl od ostatních firem má nepřímou vytlačovací hlavu, konkrétně příčnou. Jako důvod volby tohoto typu hlavy se nabízí pouze ten, že výrobce chtěl udržet kompaktní rozměry zařízení. Filament je hned u výstupu trysky chlazen dvěma malými, nastavitelnými větráky. Cena se pohybuje kolem 7 500 dolarů v závislosti na konkrétním typu stroje (22).



Obrázek 25: Vytlačovací stroje od firmy 3devo (22)

ReDeTec ProtoCycler+

ReDeTec nabízí vysoce kvalitní přístroje na vytlačování filamentu a zásobování materiálem na výrobu filamentu (granulát a aditiva).

Podle oficiálních stránek vyjde nový ProtoCycler+ na 4 000 dolarů. Za tuto částku však nabízí velmi zajímavé vlastnosti a uživatelskou přívětivost. Je schopen vyrábět filament v toleranci ± 0.05 mm, a to rychlostí 1 kilogram za hodinu. Má v sobě také zabudovanou drtičku, což umožňuje využití starých nebo nepovedených tisků k výrobě nových. Kromě drtičky má také navíjecí zařízení. Je schopen zpracovat PLA, ABS, nylon 12 a širokou škálu dalších materiálů. Je však nutno pamatovat, že maximální teplota, kterou je schopen vyvinout, je 250°C , takže materiály s vyššími teplotami tání, jako je třeba právě nylon, může vyrábět o něco pomaleji (23). ProtoCycler+ lze vidět na Obrázku 26.

ReDeTec vyrábí také verzi stroje bez drtičky, na které zákazník ušetří oproti plné verzi 1 000 dolarů.



Obrázek 26: ReDeTec ProtoCycler+ (23)

Noztek Pro

Noztek je firma zabývající se výrobou strojů souvisejících s výrobou a staráním se o filament. Nabízí extrudéry, sušičky, navijedče, měřicí zařízení i stroje ke granulaci plastů.

Produkt, kterým se zabývá rešerše, je Noztek Pro, viz Obrázek 27. Topná tělesa jsou schopna zahřát materiál až na 300 °C, což umožňuje vyrábět většinu běžných materiálů relativně vysokou rychlostí. Je možnost přiojednat nastavení násypky, díky čemuž je možné vyrobit několik špulek filamentu najednou. 1 kilogram plastových pelet je schopen přeměnit na využitelný materiál za 2 hodiny. Zákazník dostane 2 trysky – 1,75mm a 2,85mm. Podle výrobce stroj udržuje průměr filamentu v toleranci ± 0.04 mm. To je na papíru výtečná hodnota, ale dá se o ní pochybovat, neboť záleží na typu a nastavení odtahovacího zařízení, které však není součástí balení. Při nákupu je možné nastavit způsob napájení podle toho, zda bude stroj připojen využíván v evropské nebo americké síti.

Noztek Pro jako nejlevnější extrudér od tohoto výrobce bude stát zákazníka 1 195 dolarů, přičemž tato částka se zvedne na 1 739, pokud chce výhody vysokoteplotní verze (teplota až 450 °C) (24).



Obrázek 27: Noztek Pro (24)

Felfil Evo Kit

Evo Kit (viz Obrázek 28) od Felfilu je jeden ze dvou extrudérů představených v této práci, které je možné zakoupit v rozloženém stavu (jako stavebnici). Lze zakoupit pouze mechanické komponenty (šnek, vtlačovací komoru, trysku, převodovku, motor a kostru) za 330 euro a zákazníkovi je tak umožněno silně ovlivnit výsledný produkt. Kit obsahující všechny potřebné díly vyjde na 650 euro. Felfil prodává další příslušenství týkající se vytlačování filamentu, tedy navíjecí zařízení a drtičky.

Díky maximální přípustné teplotě 250 °C si je schopen poradit s většinou běžně tisknutých materiálů včetně ABS, PLA a PETG. Změnu průměru vytlačovaného filamentu lze docílit pouhou výměnou trysky (1,75 mm a 2,85 mm jsou obsaženy v balení). Extrudér vyprodukuje podle výrobce 1,15 metrů za minutu v případě menší z trysek, což odpovídá přibližně jednomu kilogramu filamentu za 5 hodin chodu (25).



Obrázek 28: Felfil Evo Kit (25)

Filastruder Kit

Filastruder Kit (viz Obrázek 29) zabírá podobné místo na trhu jako kit od Felfilu. Jedná se o nesestavený produkt a pojme stejné materiály díky maximální teplotě tavení 260 °C. Celou sestavu lze koupit za 300 dolarů, což z něj dělá nejlevnější extrudér vůbec. I přes tuto nízkou cenu umožňuje výrobu velmi přesného filamentu. Zákazníci často podávají zpětnou vazbu o velmi úzké toleranci filamentu, která jde nezřídka pod úroveň ± 0.05 mm. Sestavení extrudéru vyžaduje míru technické zručnosti, ale stejně jako u Felfil Kitu výrobce nabízí podrobný návod k sestavení (26).



Obrázek 29: Filastruder Kit (26)

6 Návrh

Jak lze vidět v předchozí kapitole, extrudéry mohou mít mnoho podob, konstrukčních řešení a provedení (co se týče úplnosti extruzní linky). Níže jsou uvedena omezení pro praktické zadání této práce.

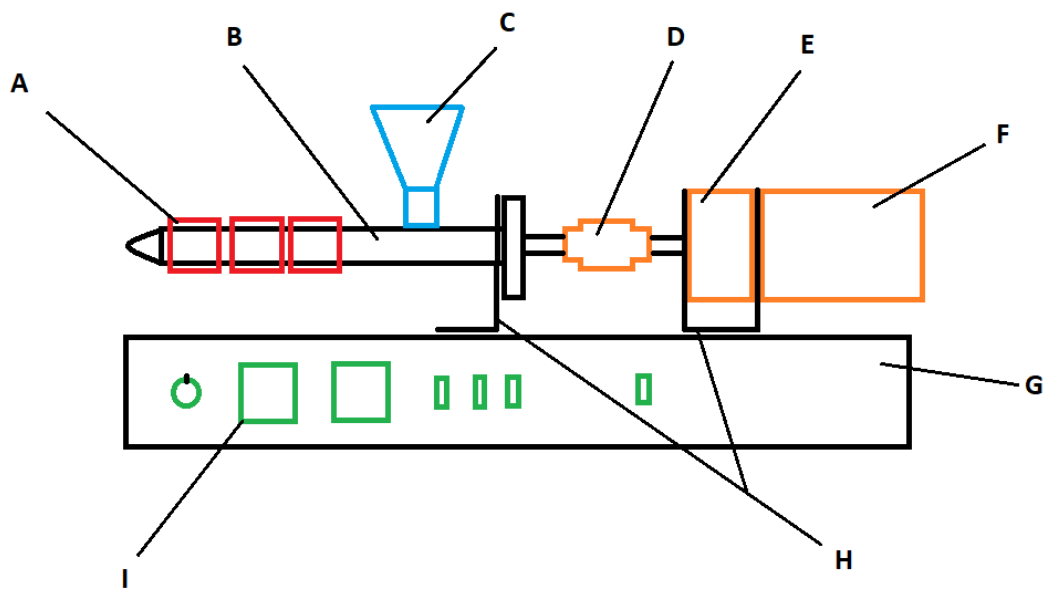
Prvním omezením je prostor, na kterém je extrudér umístěn. Firma Mubea spol. s r.o., se zaměřuje na vývoj a výrobu součástí v různých odvětvích automobilového průmyslu (napínáky pásu motoru, svorky pro stabilizátory, hlavové opěrky, sedadla, pružiny, karbonové součásti,...). Pražská pobočka nedisponuje výrobními stroji, ale je využívána zejména jako pracovní prostor pro konstruktéry, technology a výpočtáře. Jsou zde dvě tiskárny *Original Prusa i3 MK3S+* (5), na kterých se tisknou díly jak pro lepší vizualizaci konstrukčních problémů, tak díly určené pro testování a výrobu. Na polici určené pro tisk je kromě dvou tiskáren prostor o rozloze 63 x 170 cm, do kterého se musí vejít nejen vytlačovací stroj, ale i navíjecí zařízení na filament a drtička na odpadní materiál.

Druhé hledisko je množství vyprodukovaného filamentu. Stroj musí být schopen pokrýt spotřebu obou tiskáren za předpokladu, že jsou v neustálém provozu. Jedna tiskárna při běžném provozu spotřebuje 10 gramů materiálu za hodinu. Denní spotřeba tedy vychází 480 g/den. Tuto hodnotu nemají obtíž překonat i ty nejmenší stroje na trhu. Z tohoto důvodu je více omezující následující hledisko.

Cena. Ta nesmí přesáhnout 30 000 Kč. Nejdražší položky v seznamu jsou vytlačovací šnek, pohonná jednotka a převodovka.

Dále by se mělo přihlídnout na snadnou údržbu a jednoduché ovládání stroje. Údržbou je myšlena snadná výměna materiálu, který je vytlačován.

Na základě těchto omezení byla zvolena jednošneková konstrukce, přímá vytlačovací hlava a redukování otáček motoru pomocí převodovky na odpovídající otáčky a točivý moment. Jsou použita tři topná tělesa s tím, že první dvě materiál pouze předehtávají a vytváří tak pozvolnější teplotní profil. Společně jsou řízena jedním regulátorem. Třetí topné těleso (nejblíže k vytlačovací hlavě) je řízeno samostatně a také je nastaveno na vyšší teplotu. Na Obrázku 30 je vidět počáteční návrh extrudéru.

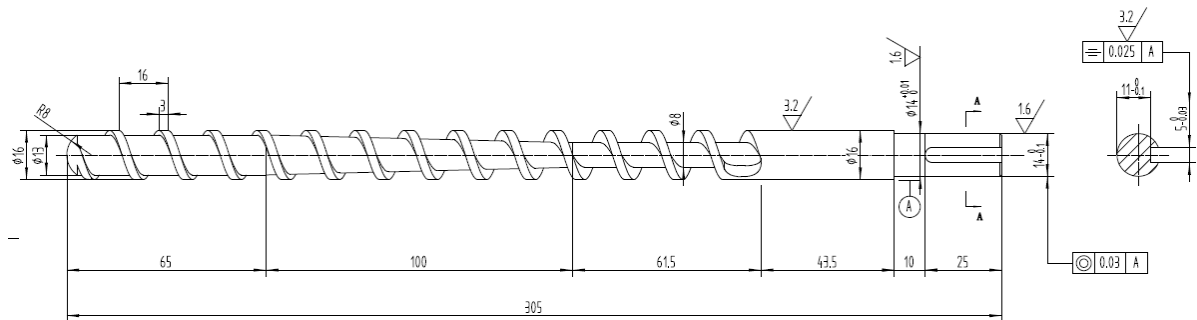


Obrázek 30: Počáteční schéma extrudéru. A – topná tělesa, B – vytlačovací komora, C – násypka, D – pružná spojka, E – převodovka, F – motor, G – podstava, H – konstrukční prvky, I – ovládací prvky

7 Volba součástí a konstrukce

7.1 Šnek

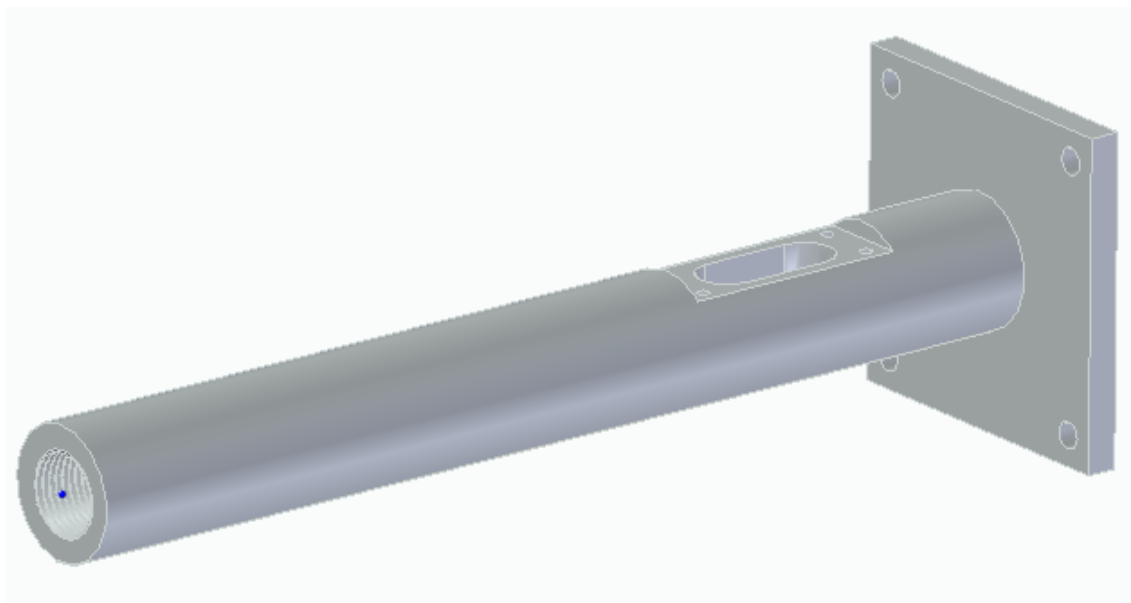
Toto je první součástka, od které se následně odvíjí navrhování zbytku stroje. Jedná se o šnek o průměru 16 mm se souhrnnou délkou šroubovice 226,5 mm (61,5 plnicí zóna, 100 plastifikační zóna, 65 dávkovací zóna). Jádru má u vstupu do vytlačovací komory 8 mm a u vstupu do vytlačovací hlavy 13 mm. Šnek prošel nejprve kalením a popouštěním, následovalo nitridování a poté byla přidána vrstva tvrdochromu. Výsledná úprava tvrdochromem má za cíl zlepšit adhezní vlastnosti povrchu. To vede ke značnému prodloužení intervalu čištění nástroje. Povrch šneku má podle výrobce drsnost Ra 0,4. Výkres této součásti lze vidět na Obrázku 31.



Obrázek 31: Výkres vytlačovacího šneku

7.2 Vytlačovací válec

Použitý vytlačovací válec je z materiálu DIN 1.8507. Vnější průměr, podle kterého se musí vybrat velikost topných těles, je 35 mm. Vnitřní průměr je 16 mm, což koresponduje s vytlačovacím šnekem. Na jednom konci je vytvořen závit M24x2 pro našroubování trysky a na druhém konci je přivařena příruba se čtyřmi průchozími dírami o průměru 7 mm. V místě vytlačovacího válce, kde je vstupní sekce šneku, je vyfrézovaný otvor pro granulát, dosedací místo pro násypku a zároveň 4 díry se závitem M4 pro její upevnění. Vytlačovací válec je znázorněn na Obrázku 32.



Obrázek 32: Vytlačovací válec

7.3 Hnací ústrojí

Hnací ústrojí se skládá z motoru, převodovky a spojky. Je koncipováno tak, aby v případě přetížení z libovolného důvodu (selhání topných těles, ucpání trysky,...) selhávaly od nejlevnější po nejdražší, tedy nejdříve spojka a až jako poslední motor.

První hodnota nutná pro zvolení parametrů hnacího ústrojí je potřebný točivý moment. Ta byla odvozena od parametrů ostatních vytlačovacích strojů – 30 Nm. Následně je nutné znát otáčky, při kterých je vhodné šnek používat. Ty byly určeny výrobcem šneku na 25 min^{-1} . Těmto otáčkám vyhovuje kombinace stejnosměrného motoru schopného dosáhnout $3\,000 \text{ ot/min}$ a převodovky s převodovým poměrem $i=120$ od firmy M B M Technik, spol. s r.o. Pro výpočet točivého motoru se musí výsledný točivý moment vydělit převodovým poměrem. Tímto postupem bylo zjištěno, že minimální točivý moment motoru musí být $0,25 \text{ Nm}$. Motor, který byl nakonec zvolen, má logicky vyšší točivý moment.

Pro přenos momentu na šnek je od výrobce připravena drážka pro těsné pero DIN 6885A 5x5. Při použití ocelového pera je doporučený dovolený tlak $p_d=100\div 120 \text{ MPa}$. Ze vzorce pro tlak ve stykové ploše

$$p = \frac{4 * M_k}{h * l * d} \leq p_d,$$

kde M_k je točivý moment, t_1 je hloubka drážky v náboji, p_d je dovolený tlak, a d je průměr hřídele, se vyjádří délka pera l a dosadí se:

$$l = \frac{4 * M_k}{h * p_d * d} = \frac{4 * 30\,000}{5 * 110 * 11,1} = \mathbf{19,83\ mm} .$$

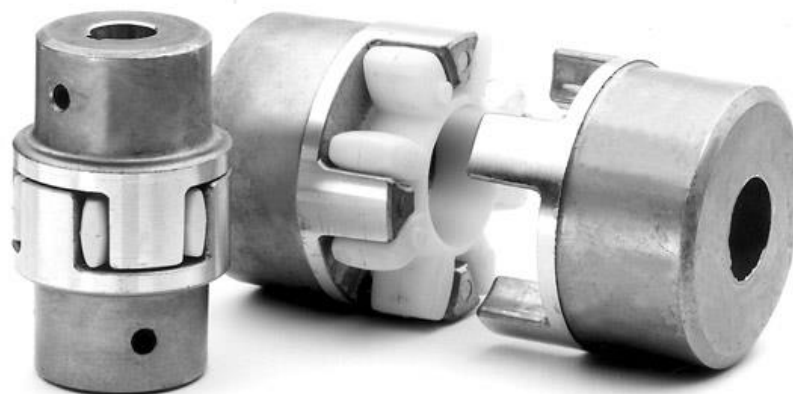
Tomu odpovídá pero DIN 6885A 5x5x25.

Pro přenos momentu z převodovky na spojku bylo použito stejné pero. Vzhledem k tomu, že průměr hřídele je v tomto případě vyšší, není třeba dělat výpočet (27).

7.3.1 Spojka

Pružná spojka je významnou součástí v případě, že je potřeba spojit dvě souosé hřídele. Jsou schopné částečně kompenzovat nesouosost a radiální vůli, čímž tlumí rezonance a přenos vibrací. Tím prodlužují životnost okolních součástí. Spojka se skládá ze dvou nábojů a pružného středu. Náboje jsou ze slitiny hliníku a věnec spojky je z termoplastu s tvrdostí 94° Shore, v případě nedostatečné tvrdosti věnce je k dispozici tvrdost 98° Shore.

Krouticí moment se bude z motoru na spojku a ze spojky na šnek převádět pomocí těsných per. U výrobce T.E.A. Technik lze při objednání kromě typu spojky navolit i požadovaný průměr nábojů a odpovídající velikost drážky pro pero. Možnost úpravy na míru, kompenzace nesouososti a nízká cena byly hlavní důvody, proč jsem zvolil právě tuto spojku. Pružnou spojku lze vidět na Obrázku 33.



Obrázek 33: Pružná spojka (28)

7.3.2 Motor a převodovka

Jako pohonnou jednotku jsem zvolil stejnosměrný kartáčový motor (často označovaný jako DC motor) od firmy GCM. Konkrétní motor má výkon 200 W, jmenovité otáčky 3000 ot/min, jmenovitý moment 0,65 Nm, viz Obrázek 34. Je napájen stejnosměrným napětím 24V.

Stejnoseměrné kartáčové motory se vyznačují jednoduchostí ovládání. Otáčky se ovládají snížením napětí a otočením polarity se obrátí chod motoru. Poskytují vysoký kroučící moment při rozběhu. DC motory obsahují kartáčky, které se při chodu opotřebovávají a tím limitují životnost zařízení. Existují i bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC), které mají životnost mnohem delší a mají vyšší účinnost. Tyto výhody jsou však kompenzovány vyšší cenou.

Motor je připojen k čelní převodovce (viz obrázek 35), která má převodový poměr $i=120$ a přípustný výstupní moment 30 Nm. Pro takové a vyšší kroučící momenty se nabízí

možnost využít převodovky planetové. S tím, kolik by musela tato převodovka mít stupňů, by byla rozměrná a poměrně drahá.



Obrázek 34: Stejnsměrný kartáčový motor (29)



Obrázek 35: Čelní převodovka (29)

7.4 Topná tělesa

Ohřev je v naprosté většině jiných extrudů filamentu zajištěn pomocí topných těles pracujících na principu elektrického odporu.

Byly pořízeny 3 topná páska od firmy Hotset, viz Obrázek 36. Jedná se o topné páska typu DG, které se vyznačují mosazným opláštěním (to znemožňuje používání na zpracování PVC) a maximální provozní teplotou 320 °C. Nastavení dalších volitelných parametrů je následující: axiální odbočení kabelu o 45 ° a výkon páska 170 W s průměrem 35 mm (tak, aby průměr odpovídal vnějšímu průměru vytlačovacího válce). Tomu dle katalogu výrobce odpovídá šířka páska 35 mm.

Topná tělesa nabízel již výrobce vytlačovacího šneku. Ta měla výkon 135 W a stejnou maximální teplotu, jako ta od firmy Hotset. Objevil se však problém dlouhé dodací doby, a tak byl zvolen Český výrobce, který i v případě poruchy může rychle dodat náhradu. Hlavní důvod, proč byla vybrána topná tělesa s výkonem o 35 W vyšším, než doporučoval výrobce šneku, je ten, že v budoucnu je v plánu vyzkoušet ovlivnění procesu použitím pouze dvou z nich. Dále se díky vyššímu výkonu proces dostane rychleji ze záběhové fáze do ustálené.

Vnější povrch vytlačovacího válce, kam byly připevněna topná tělesa, je poměrně hrubý. Aby se zajistil správný přenos tepla, musela být mezi tyto součásti aplikována tepelně vodivá pasta.



Obrázek 36: Topný pásek (30)

7.5 Termočlánky

Termočlánek je nejběžnější snímač pro měření teploty. Tento snímač tvoří dva rozdílné dráty, které jsou na jednom konci spojené a na druhém konci připojené k termočlánkovému měřiči teploty nebo jinému obdobnému přístroji. Je-li termočlánek správně konfigurován, poskytuje teplotní měření v širokém rozsahu teplot. Je také všeobecně známý pro svou všestrannost a víceúčelovost. Jako snímač teploty se běžně používá v širokém spektru aplikací - od průmyslově používaného termočlátku po běžný termočlánek, který se nachází v zařízeních a běžných spotřebičích (31).

Pro aplikaci na vytlačovacím stroji byl vybrán termočlánek typu K, který je schopný dle výrobce snést teploty až do 1000 °C. Jeho tolerance se pohybuje v rozmezí $\pm 1,5$ °C. Dále muselo být bráno v potaz, jakým způsobem bude termočlánek připevněný k válci. Byl vybrán plochý typ, který se jednoduše nasune pod topný pásek, viz Obrázek 37.



Obrázek 37: Plochý termočlánek typu K

7.6 Regulátor teploty

Výběr regulátoru se řídí několika kritérii. Musí být kompatibilní s typem termočlátku, mít odpovídající rozsah teplot a umožňovat zapojení zátěže odpovídající topným tělesům.

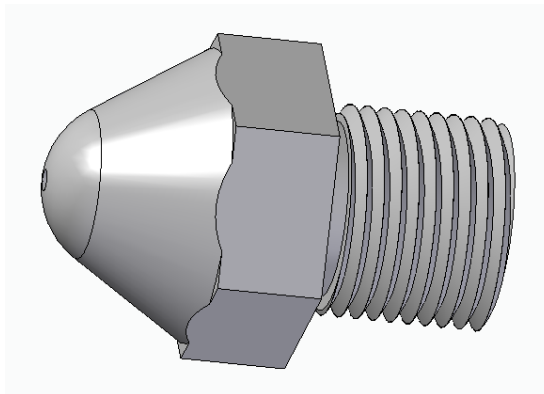
Byl vybrán digitální termostat typu REX-C100FK02-M*AN, který splňuje všechna výše zmíněná kritéria. Je kompatibilní mimo jiné s termočlátkem typu K, je schopný řídit teplotu od 0 °C do 999 °C. Kromě toho má v sobě již zabudované relé, čímž se ušetří místo uvnitř podstavy extrudéru a zjednoduší se tím zapojování. Vnější rozměry regulátoru byly hlavním kritériem při volbě výšky bočních stěn podstavy. Vybraný regulátor lze vidět na Obrázku 38.



Obrázek 38: Regulátor teploty REX-C100FK02-M*AN (32)

7.7 Vytlačovací hlava

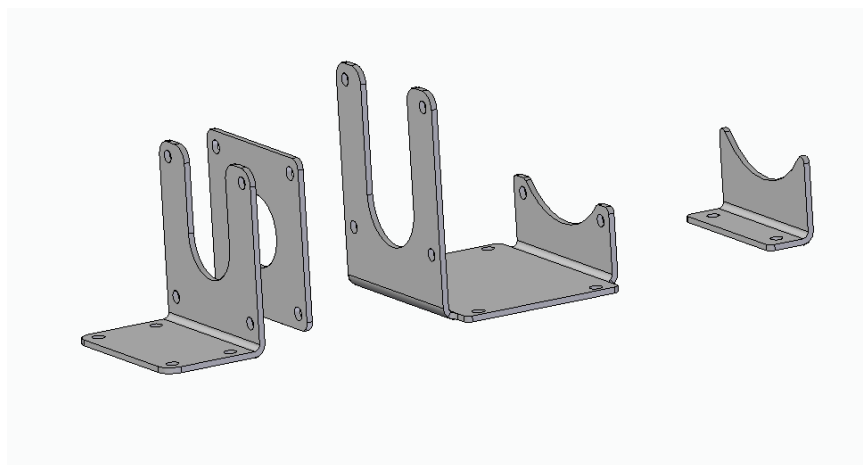
Vytlačovací hlava není nutná vzhledem k tomu, že výtlaček má plný kruhový průřez. Byla nahrazena pouze ocelovou tryskou (viz Obrázek 39), čímž se výrazně zjednodušila konstrukce a snížila výsledná cena stroje. V případě, že budeme chtít získat filament jiného průměru, lze jednoduše nainstalovat trysku s jiným průměrem otvoru. Vnější tvar trysky je ve tvaru šestihranu, díky čemuž lze utahovat trysku maticovým klíčem 30 mm. S vytlačovací komorou je tryska spojena jemným závitem M24 x 2.



Obrázek 39: Tryska

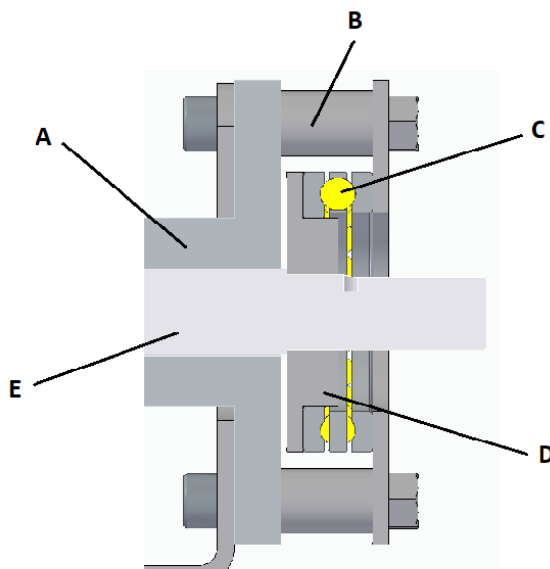
7.8 Držák na motor, ložisko a vytlačovací válec

Pro připevnění motoru a vytlačovacího válce k podstavě byl použit ocelový plech o tloušťce 3 mm. Požadovaného tvaru bylo dosaženo vyřiznutím na laseru a následným ohnutím. Na Obrázku 40 jsou tyto plechy vyobrazeny v konfiguraci, ve které byly připevněny k podstavě.



Obrázek 40: Plechy k zajištění motoru a vytlačovací komory

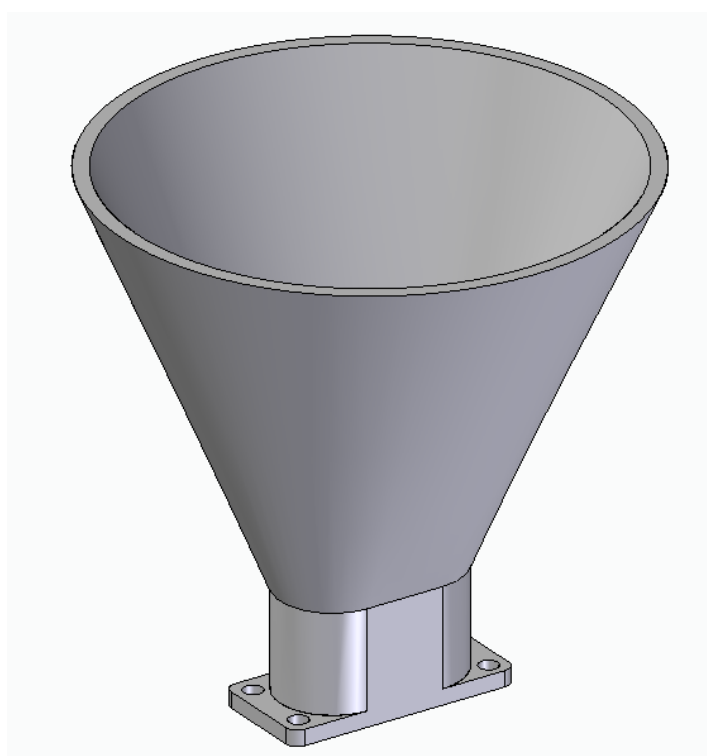
Jeden z plechů byl použit ve spolupráci s ložiskem na zajištění šneku v axiálním směru, viz Obrázek 41. Žádné axiální síly se tak nepřenášejí do podstavě nebo hnacích prvků.



Obrázek 41: Axiální zajištění šneku. A – vytlačovací komora, B – distanční sloupek, C – axiální ložisko, D – redukce, E – šnek

7.9 Násypka

Násypka, viz Obrázek 42, je vytvořena na 3D tiskárně z materiálu PLA. K dopravě granulátu napomáhá pouze gravitace, takže se jedná o záplavové plnění. K tělu vytlačovacího válce je připevněna pomocí 4 šroubů M4. Mezi dosedací plochou a násypkou je vrstva tepelně izolačního materiálu, aby se eliminovala hrozba poškození násypky vlivem tepla. Násypka pojme 0,5 kg granulí PLA, ze kterého vytlačovací stroj vytvoří 260 m filamentu o průměru 1,75 mm.



Obrázek 42: Násypka

7.10 Podstava extrudéru

V případech mnoha jiných extrudérů je podstava vyhotovena z plechu (většinou 2 mm), který se zohybá a v příslušných místech se svaří, viz Obrázek 43.



Obrázek 43: FilaFab Pro EX 350 s plechovou konstrukcí (33)

Nevýhoda této metody je její cena. Za materiál samotný pro výrobu takové skříně je kolem 2 500 Kč a k tomu by se musela přičíst částka za práci na laserové řezačce a za práci svářeče. Proto jsem zvolil možnost vytvořit podstavu z pertinaxových desek, které jsem spojil pomocí šroubů M3 se zapuštěnou hlavou. Tato podstava stojí 1 300 Kč. Pertinax (jinak také kartit nebo tvrzený papír) je vrstvený materiál ve tvaru desek, vyrobený ze sulfátového papíru jako výztuže a fenolformaldehydové pryskyřice jako pojiva. Může se opracovávat řezáním, soustružením, frézováním, vrtáním. Při manipulaci a úpravách se však musí pamatovat na vlastnosti typické pro kompozity (např. delaminace) (34) (35).

Druhou výhodou této cesty je možnost snadných následných úprav. V případě, že v budoucnu bude potřeba vyříznout další čtvercovou díru (pro budík nebo vypínač), svařenou plechovou krabicí již nelze znovu dát na laserovou řezačku. Po rozebrání pertinaxové krabice lze na frézce požadovanou díru vyrobit.

8 Hodnocení funkce extrudéru

8.1 Ovládání a používání stroje

Vytlačovací stroj, viz Obrázek 44, se musí nejdříve připojit do sítě pomocí síťového kabelu. Před zapnutím sítě je dobré se ujistit, že extrudér stojí stabilně na pevné podložce a není bráněno přívodu a odvodu vzduchu z levé a pravé strany v místech, kde jsou na stroji plastové mřížky. Stroj se následně zapne červeným kolébkovým spínačem. Tím se zapne ventilátor a oba regulátory. Následně se na regulátorech nastaví požadovaná teplota topných těles. Topné těleso nejbližší trysce se ovládá pomocí levého regulátoru a zbylá dvě tělesa jsou ovládána regulátorem pravým. Poté se může násypka naplnit libovolným materiálem. Na řadu přichází zapnutí motoru a nastavení otáček pomocí potenciometru s aretací v levé části přední desky. Po malém pootočení podle směru hodinových ručiček se motor zapne a dalším otáčením potenciometru se zvyšují otáčky.



Obrázek 44: extrudér

Aby se předešlo zraněním a poškozením stroje, operátor:

- nesmí strkat prsty a jiné části těla do násypky za chodu stroje,
- nesmí sahat na vytlačovací komoru za chodu stroje,
- smí manipulovat s vytlačovací komorou, s topnými tělesy a termočlánky až po jejich vychladnutí (teplota pro bezpečnou manipulaci je 45 °C)

- musí zamezit pádu cizích předmětů do násypky
- nesmí vypnout všechna topná tělesa najednou za chodu motoru

Pro vypnutí stroje se nechá stroj spotřebovat veškerý materiál, který je v násypce. Motor se nechá běžet do té doby, dokud se nevytlačí převážná většina materiálu, který zůstal ve vytlačovací komoře. Tento krok usnadní případné vyjímání šneku z vytlačovací komory.

8.2 Vytlačování filamentu

Při prvním spuštění extrudéru s granulemi plastu byla snaha začít s co nejmenším zatížením motoru. To obnáší nastavení nízkých otáček motoru a vysokých teplot.

Jako první byl použitý granulát PLA od firmy Smartfil. Byly nastaveny otáčky 5 min⁻¹, na dvou tělesech určených k předehřevu teplota 130 °C a teplota na trysce 205 °C. V zahřívací fázi, ještě než byly nasypány granule plastu do stroje, se začal v okolí trysky vytvářet bílý kouř. Bylo zjištěno, že to bylo způsobeno zahříváním oleje, který byl po výrobě špatně očištěn ze závitů trysky. Po řádném očištění se pokračovalo v testování.

Při zmíněných podmínkách se už pár milimetrů za výstupem z trysky stácel gravitací dolů, kde vytvářel beztvaré hroudy, viz Obrázek 45. Po jejich vychladnutí bylo zřejmé, že kvůli jejich křehkosti by byl vyrobený filament nepoužitelný – při odvíjení z cívky by se lámal. Dále měl vytlačovaný materiál nádech žluté nebo béžové barvy, přestože použitý granulát PLA byl čistě bílý. Tyto symptomy naznačují degradaci materiálu. Existuje několik důvodů, proč k tomu mohlo dojít:

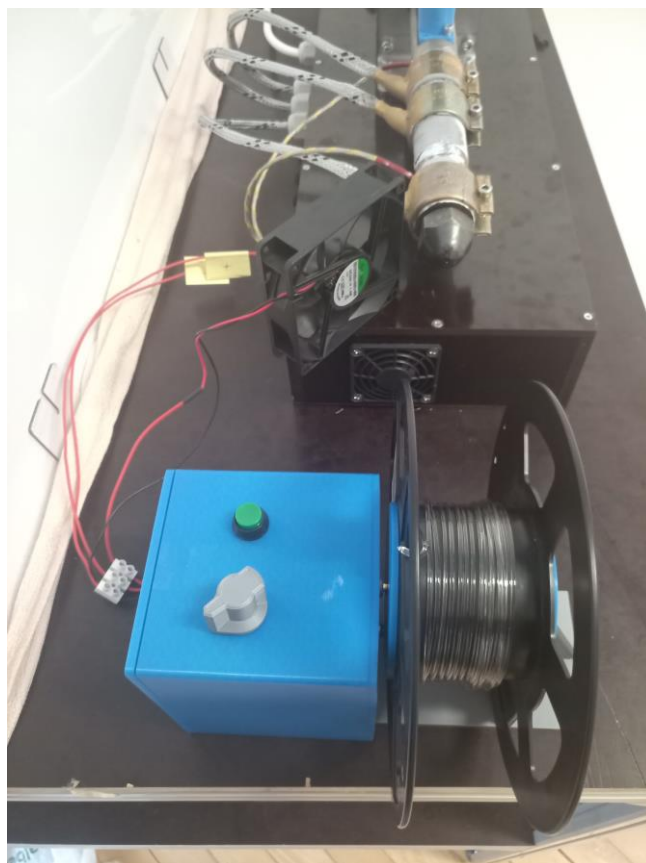
- příliš vysoká teplota plastu,
- dlouhá doba, po kterou plast zůstává ve vyhřívaných částech extrudéru,
- polymer reaguje se zbytky jiných plastů nebo s nevhodně zvolenými aditivami,
- znečištěné útroby extrudéru,
- použitý materiál je mnohokrát recyklovaný (12).



Obrázek 45: výsledek prvního testu extrudéru

Několik z těchto možných příčin lze hned vyloučit. Při prvním zapnutí stroje není možné, aby byl materiál kontaminován zbytky jiných druhů plastů a nebyla použita ani žádná aditiva. Útroby extrudéru byly vyčištěny. Granule polymeru, se kterými byl prováděn první test, jsou z nerecyklovaného materiálu. Případná dlouhá výdrž materiálu v různých částech extrudéru je způsobena mrtvými prostory. Jedná se o místa, kde materiál kvůli nevhodně zvolené geometrii součástky nebo ostrým přechodům mezi součástkami stagnuje. Vzhledem k tomu, že jednotlivé součásti stroje se nebudou v nejbližší budoucnosti měnit, má smysl se zabývat pouze posledním důvodem degradace materiálu – příliš vysokou teplotou.

PLA má teplotu tání mezi 170 a 180 °C. Prvotní teplota 205 °C, která byla na začátku zvolena pro co nejmenší zatížení motoru, byla při druhém pokusu snížena na 190 °C (předehřev byl ponechán na 130 °C). Za extrudér bylo připojeno navíjecí zařízení a ventilátor na chlazení výtlačku za tryskou, viz Obrázek 46. V záběhové fázi (dokud se vytlačovací válec zcela nezaplnil taveninou) vycházelo z trysky společně s polymerem velké množství vzduchových bublin. Ve chvíli, kdy se v proudu taveniny přestaly objevovat bubliny, byl proud ustřižen a jeho konec připevněn k cívce navíjecího zařízení. Otáčky navíjecího zařízení byly zvoleny tak, aby nedocházelo k velkému prověšení filamentu mezi tryskou a cívkou (36).



Obrázek 46: navíjecí zařízení a ventilátor

Cílem tohoto testu bylo zjistit, v jaké toleranci je schopen extrudér (v kombinaci s navíjecím zařízením) produkovat filament. Test probíhal po dobu dvaceti minut. Po prvních deseti minutách byla zvýšena rychlost navíjení. Hodnoty uvedené v Tabulce 2 byly měřeny mikrometrem na náhodných místech na filamentu vyrobeného za konstantních hodnot nastavení celého zařízení.

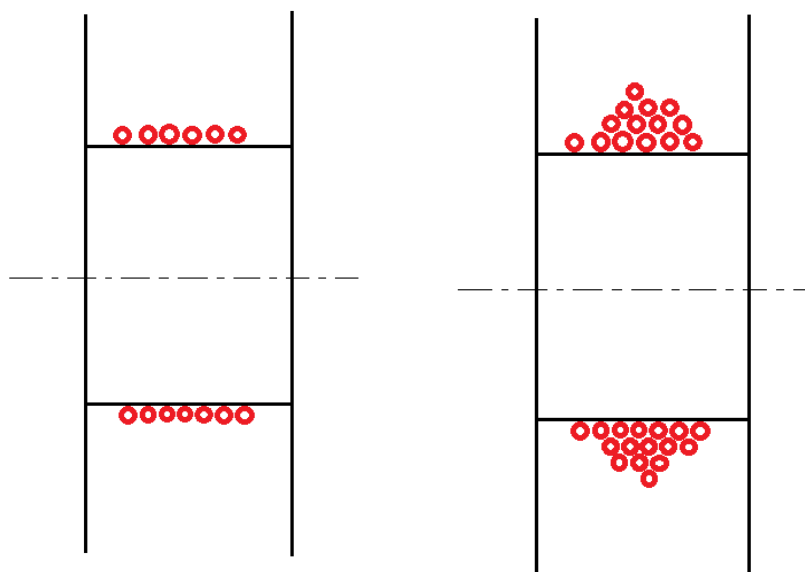
Tabulka 2: naměřené hodnoty průměrů v 2. testu

	Průměr filamentu v 1. úseku [mm]	Průměr filamentu v 2. úseku [mm]
1	2,05	1,80
2	2,08	1,60
3	2,04	1,79
4	2,08	1,81
5	2,07	1,82
6	2,04	1,83
7	2,07	1,70

8	2,11	1,71
9	2,05	1,78
10	2,04	1,65

V prvním úseku je rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší naměřenou hodnotou 0,07 mm. Filament v takové toleranci lze bez problémů použít v FDM tiskárnách. U druhého úseku je rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou 0,23 mm, což v praxi povede v lepším případě ke zhoršení kvality výtisku, v horším případě k selhání. Náhlé snížení průměru filamentu může totiž zapříčinit proklouznutí v podávacím mechanismu 3D tiskárny.

Důvod velkého rozptylu hodnoty bude postupné vrstvení filamentu na cívce, viz Obrázek 47.



Obrázek 47: Postupné vrstvení filamentu na cívce

Úhlová rychlost navíjecího zařízení zůstává konstantní, ale s každou další vrstvou se zvětšuje efektivní průměr cívky a tím i obvodová rychlost. Pokud z trysky vychází konstantní množství materiálu v čase (v 1. úseku tomu tak zřejmě je), vede to k změně průměru filamentu. V rovnicích níže je vypočtena změna průměru filamentu na jednu vrstvu. Vychází se přitom s dokonale uspořádaným filamentem na cívce a následně na první vrstvě, viz Obrázek 48, s průměrem filamentu 1,7 mm a konstantním přísunem polymeru z trysky extruderu. Byla sestavena rovnice

$$V = \pi * \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 * \pi * D_1,$$

kde V je objem materiálu v jednom závitě filament, d_1 je průměr filamentu v první vrstvě a D_1 je průměr navíjení. Dosazením hodnot do rovnice je zjištěn V:

$$V = \pi * \left(\frac{1,7}{2}\right)^2 * \pi * 79,7 \text{ mm}^3 = \mathbf{568,3 \text{ mm}^3}$$

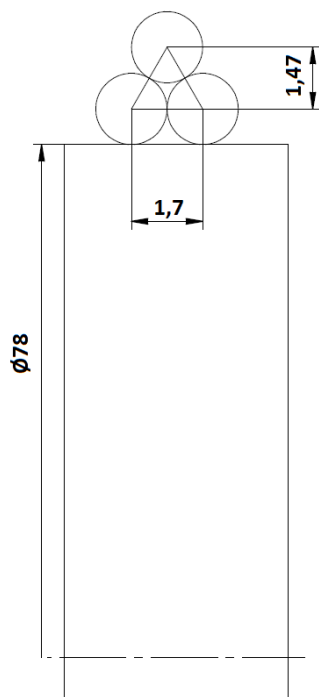
Toto množství materiálu musí být i v následující vrstvě. Proto platí

$$V = \pi * \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 * \pi * D_2,$$

kde d_2 je hledaný průměr filamentu v druhé vrstvě a D_2 je průměr navíjení v druhé vrstvě. Následně se vyjádří d_2 a dosadí se:

$$d_2 = 2 * \sqrt{\frac{V}{\pi * D_2 * \pi}} = 2 * \sqrt{\frac{568,3}{\pi * 82,64 * \pi}} = \mathbf{1,67 \text{ mm}}.$$

Z výpočtů vychází, že se v tomto teoretickém případě změní průměr o 0,03 mm.

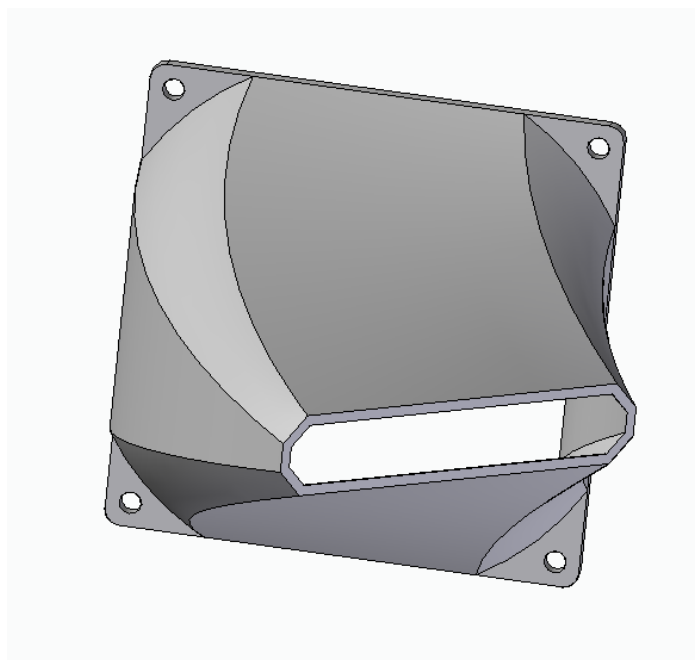


Obrázek 48: Schéma dokonale uspořádaného filamentu

Tento fakt je umocněn tím, že ventilátor pro chlazení výtlačku za tryskou nestíhá dostatečně vychladit filament. Ten se proto ještě na cívce sám na sebe lepí a hůře se rozprostírá (navíjí) v jedné vrstvě. Toto nalepování nijak nebrání následnému odebrání filamentu z cívky.

Problém změny průměru v závislosti na vrstvě je vyvolán tím, že navíjecí zařízení plní zároveň funkci odtahování. U kompletních extrusních linek bývá zvykem, že odtahování a navíjení je plněno dvěma samostatnými stroji, aby se zúžila tolerance filamentu.

U dalšího testu bylo cílem vytvořit filament v toleranci $\pm 0,05$ mm. Pro lepší chlazení byl vytvořen nástavec na ventilátor chlazení, který usměrňuje proud vzduchu, viz Obrázek 49.



Obrázek 49: nástavec na usměrnění proudu vzduchu

Teplota předehřevu byla opět ponechána na 130 °C, teplota trysky byla zvolena 185 °C. Navíjecí zařízení se otáčelo rychlostí 4 ot/min, což znamená, že filament byl produkován rychlostí 1 m/min. Po vyrobení dostatečného množství filamentu se stroj zastavil a vyrobený produkt byl mikrometrem změřen na náhodných místech. Výsledky jsou zaneseny v Tabulce 3.

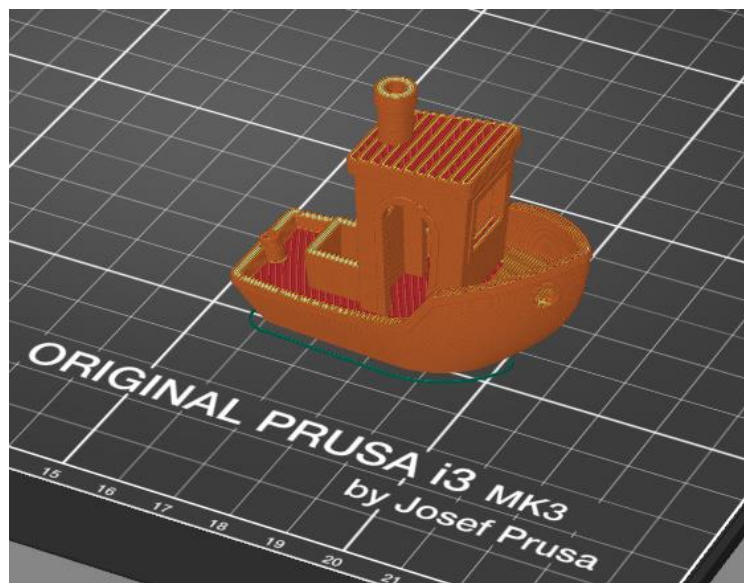
Tabulka 3: naměřené hodnoty v 3. testu

	Průměr filamentu [mm]
1	1,48
2	1,52
3	1,52
4	1,53
5	1,55
6	1,49
7	1,47
8	1,50
9	1,46
10	1,47

8.3 Hodnocení filamentu

Ačkoliv nemá filament standardní rozměr 1,75 mm, pohybuje se v požadované toleranci $\pm 0,05$ mm. Pro použití v tiskárnách je nejdůležitějším faktorem právě stálost rozměru. Odlišný průměr se dá vyřešit pouhou změnou nastavení tisku ve sliceru. To bylo v daném případě provedeno v programu PrusaSlicer-2.3.3 Na testovací tisk byla použita tryska s otvorem 0,4 mm, tloušťka vrstvy byla 0,2 mm, teplota trysky byla 215 °C a byla zvolena 15 % gyroidní výplň. Bylo použito 5,7 m filamentu a tisk trval 1 hodinu a 33 minut. Na Obrázku 50 je vidět testovací model, který má množství pro tisk nepříznivých charakteristik – převisy, přemostění, přejezdy, pozvolná stoupání a volná místa v první tiskové vrstvě v podobě textu.

Na modelu se objevilo pouze zanedbatelné stringování, nápis v první vrstvě tisku je dobře čitelný, což svědčí o správném přisednutí k podložce. Převisy nečinily při tisku potíže. Přemostění bez podpor činila největší problém, což je pro technologii FDM typické. To lze v následujících pokusech o tisk zlepšit snížením teploty trysky. Všechny dosud zmíněné charakteristiky indikují především vhodnost nastavení tisku a to, že byly vytištěny kvalitně, úzce souvicí se zvoleným materiálem (PLA), jenž je oblíbený pro jednoduchost tisku.



Obrázek 50: testovací model ve sliceru

Byla ovšem pozorována další chyba, a to přebývání materiálu v některých vrstvách, které je viditelné zejména na ostrých, svislých hranách, viz obrázek 51. Je to pravděpodobně způsobeno rozdílným průměrem filamentu v určitých místech.



Obrázek 51: chyba tisku

Při vytlačování filamentu je tedy dosahováno dostatečně úzké tolerance k tomu, aby se tisk dokončil bez selhání, ale zároveň je vidět, že pro vyšší kvalitu vytisknutých modelů je nutné stále zdokonalovat přesnost vytlačování.

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat princip 3D tiskáren využívajících technologie FDM a shrnout běžně používané materiály. Dále bylo vysvětleno fungování vytlačovacích strojů a byly popsány jejich důležité součásti. Následně byla provedena rešerše extrudérů na trhu s tím, že byly brány v potaz zejména stroje v podobné cenové relaci.

V praktické části byla nejdříve uvedena omezení, kterými se musela konstrukce extrudéru řídit. Poté byly popsány jednotlivé součásti, které byly na výrobu stroje použity, a byl odůvodněn jejich výběr. Následně bylo vysvětleno ovládání extrudéru a jeho bezpečné používání. Bylo popsáno spouštění stroje. Při tom se objevily problémy, které byly následně vyřešeny nebo byly alespoň popsány jejich důvody a návrhy k jejich řešení.

Extrudérem bylo vyrobeno několik vzorků filamentu, na nichž se provedlo měření. U finálních vzorků byla naměřena tolerance průměru $\pm 0,05$ mm. Takový filament lze bez problémů použít, což bylo vyzkoušeno na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+.

Návratnost extrudéru se odvíjí od původu plastu, který bude na výrobu filamentu použit. Pokud se bude vyrábět z kupovaného granulátu, vrátí se investice při výrobě 100 kg materiálu. V případě, že alespoň část vstupního materiálu bude pocházet z plastového odpadu, nastane bod zvratu ještě dříve. Do toho není započítán přínos možnosti modifikace filamentu aditivou dle vlastních potřeb a snižování ekologické zátěže.

Přestože bylo testování provedeno pouze s materiálem PLA, stroj umožňuje zpracovávat materiály až do teploty 300 °C. Za hodinu projde tryskou 0,8 kg materiálu. Doba potřebná k zahřátí stroje na teplotu vytlačování PLA je 15 minut. Po ukončení vytlačování trvá téměř hodinu, než stroje vychladne na okolní teplotu.

Pro úspěšnou výrobu filamentu bylo nutné vyrobit (oproti zadání) ještě navíjecí zařízení s nastavitelnými otáčkami, které zároveň sloužilo k odtahování polymeru od trysky. Chlazení bylo řešeno pouze proudem vzduchu. Pro optimalizaci výroby bude v budoucnu zapotřebí od sebe oddělit navíjecí a odtahovací zařízení a zautomatizovat rychlost navíjení v závislosti na otáčkách extrudéru a aktuálním množství navinutého filamentu na cívce. Kvalitu výtlačku lze zlepšit chlazením pomocí vodní lázně. Pro lepší kontrolu procesu se po doplnění alespoň některých z výše popsaných vylepšení nabízí využít

optického senzoru pro průběžné měření tolerance filamentu. Cena implementace všech těchto vylepšení se pohybuje v řádu jednotek tisíc korun.

10 Citovaná literatura

1. APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREO LITHOGRAPHY.
2. The Free Beginner's Guide. 3D printing industry [online]. California: 3D printing industry, 2017 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#05-materials>. [Online]
3. Přehled technologií 3D tisku. Dk metal prominent [online]. Libhošť: dk metal prominent, 2018 [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/onas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>.
4. FDM 3D Printers. Creality [online]. Shenzhen: Creality3D, 2022 [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://www.creality.shop/collections/fdm-3d-printer>.
5. Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S+. Prusa3D [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s-3/?gclid=Cj0KCQjwof6WBhD4ARIsAOi65ajINc38KSJhQd_A.
6. Kossel Plus. Anycubic [online]. Hongkong: HONGKONG ANYCUBIC TECHNOLOGY, 2022 [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://www.anycubic.com/products/anycubic-kossel-3d-printer>.
7. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. [Online]
8. WAKIMOTO, Tomomasa, Ryoma TAKAMORI, Soya EGUCHI a Hiroya TANAKA. Growable Robot with 'Additive-Additive-Manufacturing'. Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM, 2018, 2018-04-20, 18(-), 1.
9. Prusa knowledge base. Prusa knowledge base: Průvodce materiály [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/category/pruvodce-materialy_220. [Online]
10. AZIMI, Parham, Dan ZHAO, Claire POUZET, Neil E. CRAIN a Brent STEPHENS. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. Environmental science and techno.
11. Technologie zpracování plastu [online]. Code Creator, s.r.o.: Code Creator, 2016 [cit. 2022-06-07]. ISBN 978-80-88058-75-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>.
12. Extrusion : The Definitive Processing Guide and Handbook [online]. 2. California: Elsevier Science & Technology Books, 2013 [cit. 2022-06-17]. ISBN 9780815517115. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/reader.action?docID=1418367>.

13. SEIDL, Martin. Stroje pro zpracování polymerních materiálů [online]. Code Creator, s.r.o.: Code Creator, 2015 [cit. 2022-06-07]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>.
14. Conical twin screw barrel. JT Machine [online]. Jintang: Jinteng Machinery Manufacturing Co., 2015 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: http://www.zsjtjx.com/a/Product/Conical_twin_screw_barrel/20200715/65.html. [Online]
15. Vytlačování [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec, 2010 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm. [Online]
16. Návrh a realizace vytlačovací hlavy na profily. Zlín, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
17. Building wire sheathing line. Expometals.net [online]. Bontivoglio: expometals.net, 2022 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <https://www.expometals.net/en-gb/product-detail-samp-spa-sampsistemi-division/building-wire-sheathing-line-the-sz-process>.
18. Elongational Viscosity & Impact Testing Case Studies. Fleming PTC [online]. Bradford: Fleming PTC, 2017 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <http://www.flemingptc.co.uk/case-studies/>.
19. Návrh a realizace vytlačovací hlavy a návazných členů pro vytlačování kruhových plastových profilů. Brno, 2013. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně.
20. Filabot [online]. Barre, New Hampshire: filabot, 2022 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/products/filabot-original-ex2>.
21. Wellzoom desktop filament extruder B [online]. Shenzhen: Wellzoom, 2022 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <http://wellzoomextruder.com/product/wellzoom-desktop-filament-extruder-b/>.
22. 3devo [online]. Utrecht: 3devo B. V, 2022 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.3devo.com/filament-makers>.
23. ProtoCycler+ [online]. Toronto: ReDeTec, 2022 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://redetec.com/>.
24. Noztek Pro & Pro HT. Noztek [online]. Shoreham-By-Sea: Noztek, 2022 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://noztek.com/product/noztek-pro/>.
25. FELFIL EVO ASSEMBLED. Felfil [online]. Torino: Felfil, 2022 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://felfil.com/shop/felfil-evo-assembled/?v=5ea34fa833a1>.
26. Filastruder Kit. Filastruder [online]. Snellville: Filastruder, 2022 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit?variant=323882043>.
27. Spojení hřídele a náboje prostřednictvím pera. Části a mechanismy strojů I ČMS1 [online]. Praha: Ústav konstruování a částí strojů, 2012 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z:

https://media0.717.cz/files/media0:5c8297f343f55.pdf.upl/05C_U3A_Spojen%C3%AD%20n%C3%A1.

28. PRUŽNÉ SPOJKY SE STŘEDÍCÍM DŮLKEM. T.E.A. technik [online]. Brno: T.E.A. technik, 2022 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/pruzne-spojky/>.

29. MBM Technik [online]. Brno: M B M Technik, 2022 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.mbmtechnik.cz/elektromotory/dc-motory/standardni-dc-motory-6-az-40-w>.

30. Topný pásek DG do 320°C. Hotset [online]. Plzeň: Hotset ČR, 2022 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://hotset.cz/produkt/topny-pasek-typ-dg/>.

31. Termočlánek - termoelektrický snímač teploty. Jakar Electronics [online]. Karviná: Jakar Electronics, 2022 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz/advisor/co-je-termoclanek>.

32. Ovladač regulace teploty RKT REX C100 230V AC. Pajtech [online]. Międzyzwieć: Pajtech, 2022 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://pajtech.cz/ovlada-regulace-teploty-rkt-rex-c100-230v-ac-p-4683.html>.

33. FilaFab PRO 350 EX. FilaFab [online]. United Kingdom: FilaFab, 2022 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <http://d3dinnovations.com/filafab/product/filafab-ex-350/>.

34. Textit, Sklotextit, Kartit. Kajman K [online]. Přelouč: Kajman K, 2019 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://kajmank.cz/textit-sklotextit-kartit-pertinax/>.

35. Informace o materiálech. Elektroizolanty [online]. Praha: Elektroizolanty, 2022 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.elektroizolanty.cz/https/www-elektroizolanty-cz/elektroizonlanty/0/0/2/76>.

36. VOUYIOUKA, S.N. a C.D. PAPASPYRIDES. Mechanistic Aspects of Solid-State Polycondensation. Polymer Science: A Comprehensive Reference [online]. Elsevier, 2012, 2012, 2012(4), 857-874 [cit. 2022-08-09]. ISBN 9780080878621. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444.

37. Návrh a realizace vytlačovací hlavy a návazných členů pro vytlačování kruhových plastových profilů. Brno, 2013. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

11 Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: SCHÉMA TECHNOLOGIE FDM (3)	9
OBRÁZEK 2: RŮZNÁ PROVEDENÍ FDM 3D TISKÁREN (8)	11
OBRÁZEK 3: PŘÍKLAD POUŽITÍ PCCF (9)	15
OBRÁZEK 4: VYTLAČOVACÍ STROJ (EXTRUDÉR) V ŘEZU	17
OBRÁZEK 5: ZÁPLAVOVÉ KRMENÍ (12)	18
OBRÁZEK 6: HLADOVĚJÍCÍ KRMENÍ (12)	18
OBRÁZEK 7: NUCENÉ PLNĚNÍ (12)	19
OBRÁZEK 8: TAVNÉ PLNĚNÍ (12)	19
OBRÁZEK 9: SCHÉMA VYTLAČOVACÍHO ŠNEKU (11)	20
OBRÁZEK 10: SCHÉMA POSTUPNÉHO TAVENÍ POLYMERU V JEDNOŠNEKOVÉM VYTLAČOVACÍM STROJI (12)	21
OBRÁZEK 11: MÍSICÍ A TORPÉDOVÉ SEKCE ŠNEKU (11)	22
OBRÁZEK 12: RYCHLOSTNÍ PROFIL TAVENINY V DRÁŽCE ŠNEKU (12)	23
OBRÁZEK 13: NAZNAČENÍ OTÁČENÍ V SOUHLASNÉM A NESOUHLASNÉM SMĚRU (12)	23
OBRÁZEK 14: VYTLAČOVACÍ KOMORA A ŠNEKY DVOUŠNEKOVÉHO VYTLAČOVACÍHO STROJE (14)	24
OBRÁZEK 15: SCHÉMA PŘÍMÉ VYTLAČOVACÍ HLAVY PRO VÝROBU TRUBEK (15)	25
OBRÁZEK 16: TYPY VYTLAČOVACÍCH HLAV (16)	26
OBRÁZEK 17: PŘÍČNÁ VYTLAČOVACÍ HLAVA PŘI OPLÁŠŤOVÁNÍ DRÁTU (17)	26
OBRÁZEK 18: SCHÉMA PRŮVLAKOVÉ KALIBRACE (11)	27
OBRÁZEK 19: PŘI NAVRHOVÁNÍ OTVORU VYTLAČOVACÍ HLAVY SE MUSÍ POČÍTAT S NARŮSTÁNÍM PROFILU (12)	28
OBRÁZEK 20: PORUCHA TOKU (SHARK SKIN) (18)	28
OBRÁZEK 21: DEFORMACE DUTÉHO PROFILU PŘI CHLAZENÍ (19)	29
OBRÁZEK 22: TVORBA VZDUCHOVÉ KAPSY VLIVEM CHLAZENÍ (19)	29
OBRÁZEK 23: FILABOT EX2 (20)	30
OBRÁZEK 24: WELLZOOM PELLET EXTRUDER (21)	31

OBRÁZEK 25: VYTLAČOVACÍ STROJE OD FIRMY 3DEVO (22)	32
OBRÁZEK 26: REDETEC PROTOCYCLER+ (23)	33
OBRÁZEK 27: NOZTEK PRO (24)	34
OBRÁZEK 28: FELFIL EVO KIT (25)	35
OBRÁZEK 29: FILASTRUDER KIT (26)	35
OBRÁZEK 30: POČÁTEČNÍ SCHÉMA EXTRUDÉRU	37
OBRÁZEK 31: VÝKRES VYTLAČOVACÍHO ŠNEKU	38
OBRÁZEK 32: VYTLAČOVACÍ VÁLEC	39
OBRÁZEK 33: PRUŽNÁ SPOJKA (28)	41
OBRÁZEK 34: STEJNOSMĚRNÝ KARTÁČOVÝ MOTOR (29)	42
OBRÁZEK 35: ČELNÍ PŘEVODOVKA (29)	42
OBRÁZEK 36: TOPNÝ PÁSEK (30)	44
OBRÁZEK 37: PLOCHÝ TERMOČLÁNEK TYPU K	45
OBRÁZEK 38: REGULÁTOR TEPLoty REX-C100FK02-M*AN (32)	46
OBRÁZEK 39: TRYSKA	46
OBRÁZEK 40: PLECHY K ZAJIŠTĚNÍ MOTORU A VYTLAČOVACÍ KOMORY	47
OBRÁZEK 41: AXIÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ ŠNEKU	47
OBRÁZEK 42: NÁSYPKA	48
OBRÁZEK 43: FILAFAB PRO EX 350 S PLECHOVOU KONSTRUKCÍ (33)	49
OBRÁZEK 44: EXTRUDÉR	50
OBRÁZEK 45: VÝSLEDEK PRVNÍHO TESTU EXTRUDÉRU	52
OBRÁZEK 46: NAVÍJECÍ ZAŘÍZENÍ A VENTILÁTOR	53
OBRÁZEK 47: POSTUPNÉ VRSTVENÍ FILAMENTU NA CÍVCE	54
OBRÁZEK 48: SCHÉMA DOKONALE USPOŘÁDANÉHO FILAMENTU	55
OBRÁZEK 49: NÁSTAVEC NA USMĚRNĚNÍ PROUDU VZDUCHU	56
OBRÁZEK 50: TESTOVACÍ MODEL VE SLICERU	58
OBRÁZEK 51: CHYBA TISKU	58