



Diplomová práce

Návrh extrudéru pro 3D tisk z hmoty na křemičité bázi

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Adolf Živný

Vedoucí práce:

Ing. Michal Starý, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2022



Zadání diplomové práce

Návrh extrudéru pro 3D tisk z hmoty na křemičité bázi

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Adolf Živný
<i>Osobní číslo:</i>	S21000249
<i>Studijní program:</i>	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra sklářských strojů a robotiky
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

3D tisk představuje moderní progresivní technologii, která se postupně prosazuje v řadě odvětví a aplikací. Jedním z vývojových směrů je materiálová extruze různých hmot. V rámci základního výzkumu se na pracovišti podařilo vyvinout a otestovat nadějnou viskozitně variabilní směs na bázi SiO_2 , která vykazuje vhodné vlastnosti pro nanášení ve vrstvách. Cílem diplomové práce je, na základě zevrubné rešerše podobných zařízení ve světě, zvolit princip a mechanismus vytlačování hmoty s ohledem na její specifické vlastnosti (přílnavost, formovatelnost atp.). Dále vybrat optimální variantu řešení a tu konstrukčně zpracovat a otestovat s ohledem na reálné nasazení při 3D tisku.

Úkolem Vaší DP bude:

1. Provést rešerši současných extrudérů především pro keramické a příbuzné hmoty.
2. Zpracovat koncepční návrh extrudéru pro testování vhodných principů vytlačování dané hmoty ve variantách a vybrat optimální variantu.
3. Provést konstrukční řešení funkčního vzorku vybrané varianty, včetně případných výpočtů a výkresové dokumentace.
4. Zhotovený funkční vzorek otestovat a navrhnout úpravy pro efektivní extruzi při zachování kompaktnosti a vhodných vlastností vytlačované hmoty.
5. Zhodnotit výhody a nevýhody extrudéru a možnosti uplatnění principu v praxi.

Rozsah grafických prací: výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40 – 50 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] HOTAŘ V., M. STARÁ, V. MAKOVÁ. Present state of 3D printing from glass. Připravovaný text rešerše 3D tisku ze skla k vydání.
- [2] HEN Z., Z. LI, J. LI, CH. LIU, CH. LAO, Y. FU, CH. LIU, Y. LI, P. WANG a Y. HE. 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2019, 39(4), 661–687.
- [3] HALUŠKA J. Návrh konstrukčního řešení 3D tiskárny pro tisk bio gelu. Liberec: Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. 2019.
- [4] GIBSON I., D. ROSEN, B. STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer. 2014.
- [5] RŮŽIČKA V. Návrh konstrukce 3D tiskárny pro uplatnění v oblasti gastronomie. Liberec: Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. 2016.
- [6] Složení hmoty pro extruzi a její parametry.

Vedoucí práce: Ing. Michal Starý, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Datum zadání práce: 4. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 4. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 4. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Michalovi Starému, Ph.D., který mi byl po celou dobu tvorby této práce oporou a rádčem. Současně bych rád poděkoval celé Katedře sklářských strojů a robotiky, zvláště panu vedoucímu doc. Ing. Vlastimilu Hotařovi, Ph.D., za možnost podílet se na tak perspektivním projektu. Rád bych zde poděkoval také Ing. Ondřejovi Matúškovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D., kteří se podíleli na dokončení této práce.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem extrudéru pro hmotu na křemičité bázi, která je zkoumána v rámci Katedry sklářských strojů a robotiky. V prvním bodě je zpracovaná rešerše současného stavu 3D tisku, v oblasti extruze materiálu. Po prozkoumání již existujících extrudérů, další kapitola pojednává o výběru koncepčních návrhů a následném zvolení jednoho z nich. V dalším kroku je tento koncept konstrukčně navržen a zpracován s kompletní technickou dokumentací, potřebnou k výrobě zařízení. Na závěr je toto zařízení zhodnoceno z technickoekonomického hlediska, na základě kterého je diskutováno o případných optimalizacích.

Klíčová slova: 3D tisk, extruze materiálu, křemičitá hmota, experimentální zařízení

Anotation

The thesis is focused on a design of an extruder for the silicone-based material researched at the Department of Glass Producing Machines and Robotics. Initially, the present state of extrusion in 3D printing is presented. Current extruders have been searched and several concepts are prepared. The chosen concept is designed and necessary technical documentation prepared. Finally, the technical-economic aspects are evaluated and possible optimizations are discussed.

Key words: 3D printing, material extrusion, silicon based material, experimental device

Obsah

1.	Rešerše současných extrudérů ve 3D tisku	13
1.1.	3D tisk.....	13
1.2.	Materiálová extruze	15
1.3.	Přehled existujících extrudérů v závislosti na využitém materiálu	16
1.3.1	Základní konstrukční přístupy.....	17
1.3.2	Existující metody materiálové extruze.....	18
2.	Výběr koncepčního návrhu	23
2.1.	Výběr materiálu k výrobě.....	23
2.2.	Koncepční návrhy.....	24
2.2.1	Způsob dávkování materiálu do hlavice.....	25
2.2.2	Stav dávkované hmoty	26
2.2.3	Požadavek těsnosti	26
2.2.4	Zhodnocení koncepčních návrhů	27
3.	Konstrukční návrh	28
3.1.	Vstupní parametry pro konstrukční návrh	28
3.2.	Výpočtový návrh dopravníku, pohonu a uložení.....	28
3.2.1	Návrh šnekového dopravníku.....	28
3.2.2	Volba pohonu	29
3.2.3	Hřídelová spojka	30
3.2.4	Montážní příruba motoru	31
3.2.5	Uložení šneku.....	36
3.2.6	Výpočet ložiska	39
3.3.	Popis konstrukce.....	43
3.3.1	Nosná deska tiskové hlavy	43
3.3.2	Ustavovací tělo	44

3.3.3	Plášť šneku	45
4.	Zhodnocení zkonstruovaného zařízení	48
4.1.	Oblasti potenciální inovace	49

Seznam zkratek

Zkratka	Popis	Jednotka
FDM	Fused Deposition Modeling	[-]
FFF	Fused Filament Fabrication	[-]
CAD	Computer-Aided Design	[-]
SSE	Semi-Solid extrusion	[-]
DIW	Direct Ink Writing	[-]
LVE	Large Volume Extruder	[-]
CC	Contour Crafting	[-]
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	[-]
PA	Polyamid	[-]
PP	Polypropylen	[-]
d_t	Průměr výstupní trysky	[m]
v_v	Rychlost posuvu hlavice	[m·s ⁻¹]
l_v	Délka výtlačku	[m]
Q_v	Objemový průtok skrze trysku	[m ³ ·s ⁻¹]
c_H	Součinitel snižující dopravované množství vzhledem ke sklonu dopravníku	[-]
ψ	Součinitel plnění	[-]
D	Vnější průměr šneku	[m]
d	Mensší průměr šneku	[m]
n_2	Otáčky pohonu	[s ⁻¹]
p	Stoupání šneku	[m]
π	Ludolfovo číslo	[-]
P_n	Jmenovitý výkon	[W]
M_{kn}	Jmenovitý krouticí moment	[N·m]
i	Převodový poměr	[-]
ČSN	Československá státní norma	[-]
k_L	Součinitel vlivu namáhání	[-]
k_S	Součinitel velikosti	[-]
k_{sfr}	Součinitel jakosti povrchu pro krut	[-]
Rm	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$k_f (\beta)$	Součinitel vrubu	[-]

τ_c^*	Mez vrubové únosnosti	[MPa]
Re	Mez kluzu v tahu	[MPa]
r	Poloměr zápichu	[mm]
d_z	Průměr v místě zápichu	[mm]
D_p	Větší průměr příruby	[mm]
α	Součinitel tvaru vrubu	[-]
q	Součinitel vrubové citlivosti	[-]
k_{sf}	Součinitel jakosti povrchu	[-]
Ra	Drsnost povrchu	[μm]
τ_k	Napětí v krutu	[MPa]
τ_a	Amplituda napětí v krutu	[MPa]
τ_m	Střední hodnota napětí v krutu	[MPa]
τ_F	Fiktivní hodnota napětí v krutu	[MPa]
k	Bezpečnosti	[-]
E	Modul pružnosti materiálu	[MPa]
b	Vzdálenost od ložiska k místu zatížení	[mm]
a	Vzdálenost od spojky k ložisku	[mm]
R_A	Silová reakce v místě hřídelové spojky	[N]
R_B	Silová reakce v místě ložiska	[N]
F	Zatěžující síla nevyváhou	[N]
M_A	Momentová reakce v místě hřídelové spojky	[N·m]
T'_B	Silová reakce v místě kloubu náhradního nosníku	[N]
R'_C	Silová reakce v místě vetknutí náhradního nosníku	[N]
M'_C	Momentová reakce v místě vetknutí náhradního nosníku	[N·m]
w_{max}	Maximální hodnota průhybu	[mm]
J_y	Kvadratický moment průřezu šneku	[mm ⁴]
F_A	Celková axiální síla od materiálu působící na šnek	[N]
$F_{tš}$	Třecí síla způsobena třením mezi materiálem a šnekem	[N]
F_{to}	Síla způsobena od tření mezi materiálem a stěnou pláště	[N]
G	Síla způsobena tíhovým zrychlením	[N]
α_s	Úhel stoupání závitu šneku	[rad]
g	Tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
f_1	Tření mezi materiálem a pláštěm	[-]

f_2	Tření mezi materiálem a šnekem	[-]
r_ξ	Poloměr šneku	[m]
ρ_H	Hustota vytlačované hmoty	[kg·m ⁻³]
$d_{t_{max}}$	Maximální uvažovaný průměr trysky	[m]
m_ξ	Hmotnost šneku	[kg]
V_{max}	Maximální objem protlačovaný skrze trysku	[m ³]
G_ξ	Síla způsobena tíhovým zrychlením šneku	[N]
F_{AL}	Celková axiální síla	[-]
d_L	Vnitřní průměr ložiska	[mm]
D_L	Vnější průměr ložiska	[mm]
B	Šířka ložiska	[mm]
C	Základní dynamická únosnost	[kN]
C_0	Základní statická únosnost	[kN]
f_0	Výpočtový součinitel ložiska	[-]
X, Y	Koeficienty dynamického zatížení ložiska	[-]
P	Ekvivalentního dynamického zatížení	[-]
L_{h10}	Základní trvanlivost ložiska v hodinách	[h]

Úvod

Výzkumní pracovníci na katedře Sklářských strojů a robotiky vyvinuli hmotu na bázi SiO_2 , která vykazuje slibné vlastnosti pro případné praktické využití. Výzkum této hmoty je v počátcích, a tak, po ověření potenciálu této hmoty, se začalo pomýšlet nad jejím dávkováním a tvarováním s využitím aditivní technologie 3D tisku – materiálové extruze. Tímto tématem se diplomová práce zabývá.

V prvních krocích je provedena rešerše současného stavu extruzních zařízení, pro předem zvolené příbuzné materiály, k námi dávkované hmotě, kde je zjištěn určitý trend z pohledu způsobu extruze takovýchto hmot. V další kapitole jsou zpracovány vybrané koncepční návrhy a z nich je jeden vybrán, jako výchozí pro další kapitolu. V té je zpracován finální konstrukční návrh s kompletní technickou dokumentací, potřebnou pro samotnou výrobu extrudéru. V závěru práce je koncepční návrh z technickoekonomického hlediska zhodnocen, a následně je zde pojednáváno o možných oblastech inovace.

V této práci bylo nutné zvolit správný směr řešení a zvolení vhodných vstupních parametrů. Následně byly řešeny dílčí problematiky v konstrukční části práce, kterými byla například vhodná doprava materiálu do hlavičky extrudéru, vzhledem k údržbové náročnosti, zajištění jednoduché demontáže, nebo výběr vhodného přenosu krouticího momentu, mezi pohonem a akčním členem – šnekem.

1. Rešerše současných extrudérů ve 3D tisku

Pro následující práci bude vybíráno způsobu, kterým se bude provádět výroba z hmoty, která byla vyzkoumána na katedře školy.

1.1. 3D tisk

3D tisk, neboli v anglickém jazyce 3D printing, je technologií aditivní, při jejímž využití se materiál neodebírá, jak je tomu u většiny konvenčních a nekonvenčních způsobů výroby, ale naopak se materiál nanáší ve formě vrstev, které jsou předem určeny z modelu požadovaného dílu. Tato technologie přináší výhody v podobě větší flexibility vůči požadovanému tvaru a vlastnostem výrobku, za cenu nízké produktivity této technologie [1].

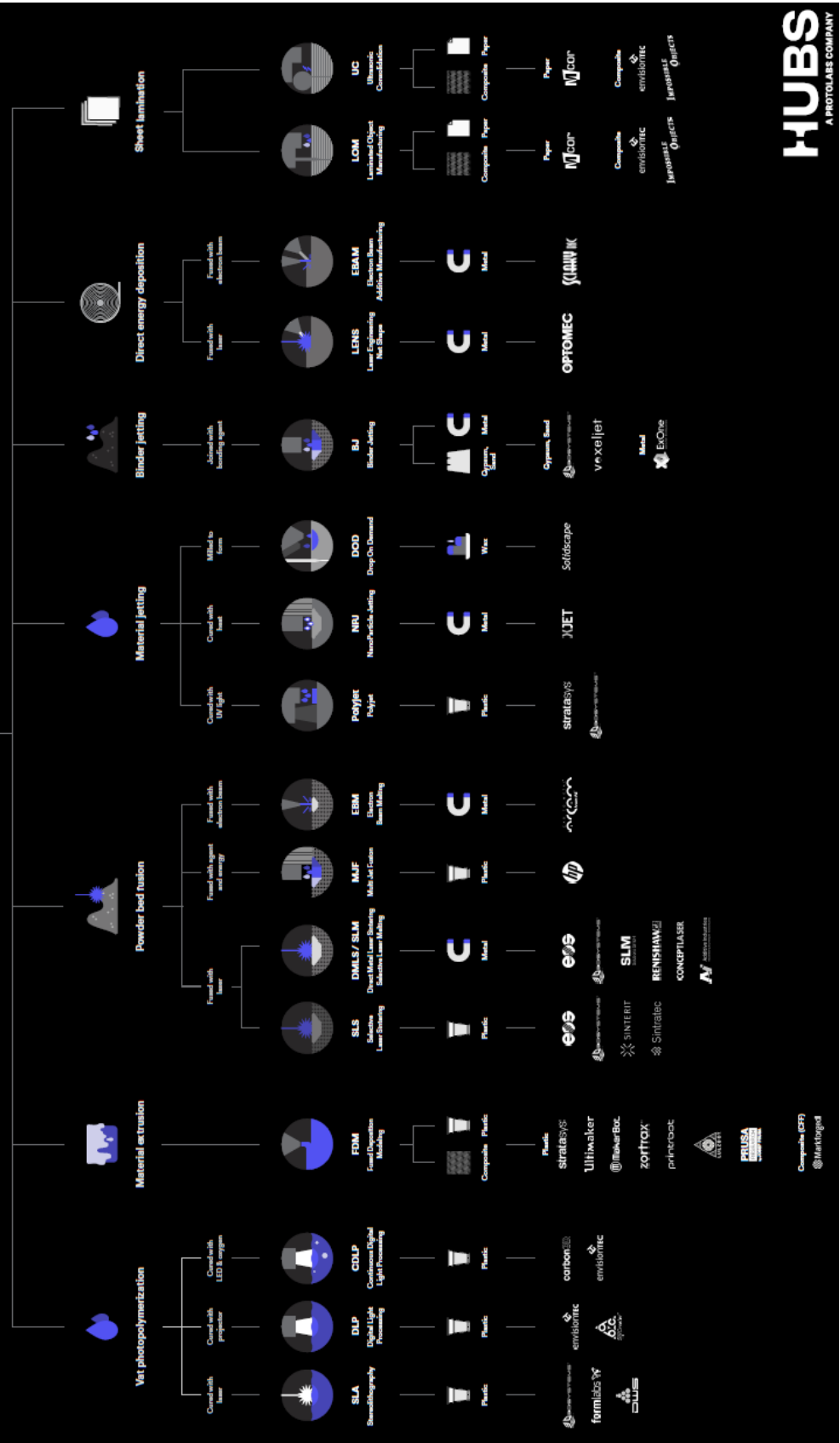
V tuto chvíli je 3D tisk velmi rozšířený pro výrobu z materiálů, jako jsou polymery, kovy, kompozity a keramika [1]. Keramika je podle Chena a spol. [2] posledním trendem a pochopitelně je to jedním z důvodů, proč se o nově vyzkoumané hmotě, která bude v této práci podrobněji popisována z pohledu technologie výroby, pomýšlí v kooperaci s 3D tiskem.

Podle Mezinárodní organizace pro standardizaci a její konkrétní normu ISO/ASTM 52900:2015(en) [3] by se dala tato technologie výroby rozdělit na:

1. Materiálovou extruzi (Material extrusion)
2. Materiálové vstřikování (Material jetting)
3. Fúzi s práškovou vrstvou (Powder bed fusion)
4. Laminaci (Sheet lamination)
5. Fotopolymerizaci (Vat Photopolimerization)
6. Tryskání pojiva (Binder jetting)
7. Řízenou depozici energie (Direct energyd deposition)

Na obr. 1 Obrázek 1 je podrobné rozdělení aditivní technologie společně se zástupci každé z nich. I když by možnostmi pro naše řešení mohli být i metody fotopolymerizace, laminace, nebo fúze s práškovou vrstvou, v této práci se zaměříme na metodu materiálové extruze.

ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

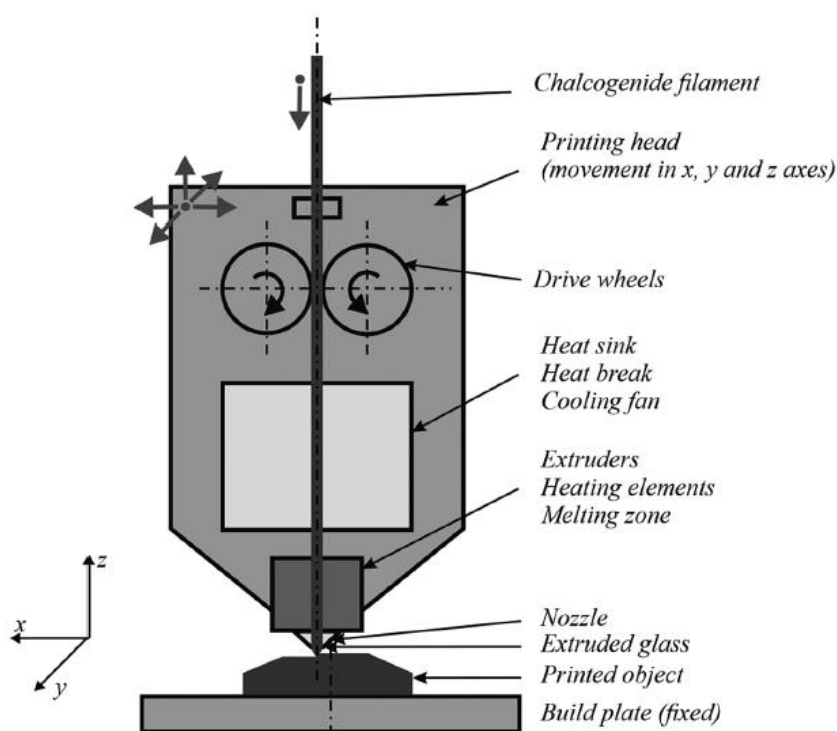


Obrázek 1: Jednotlivé aditivní technologie, spolu s jejich zástupci. [40]

1.2. Materiálová extruze

Charakterizujícím zástupcem materiálové extruze, je metoda Fused Deposition Modeling (FDM), neboli jiným názvem Fused Filament Fabrication (FFF), která je nejrozšířenější a nejjednodušší metodou na trhu 3D tisku. Tato metoda nese dva názvy, protože pro FDM vlastnila patent firma Stratasys od roku 2004 do roku 2021. [4] Jedná se o jednoduchý nenáročný způsob, kde je materiál, ze kterého bude finální díl vyroben, dopravován do tiskové hlavy ve formě filamentu (struny), nebo granulí, které jsou průchodem touto hlavicí tepelně upravovány před dávkovací tryskou, ze které se materiál dávkuje v potřebném tvaru a množství do vrstev. Na stroji je možné rozlišit dvě základní části, a to na tiskovou hlavici a základovou desku, na kterou se nanáší první vrstva materiálu. Aby bylo možné dosáhnout komplexních tvarů, z pravidla jedna z částí koná pohyb v rovině xy a druhá část koná posuv v ose z, jako inkrementy určující tloušťku jednotlivých vrstev. Tyto vrstvy, spolu s tvarem součásti jsou definované z 3D CAD modelu, který je rozdělen do jednotlivých vrstev a ve formátu „.stl“ importován do tiskacího zařízení – 3D tiskárny. [5]

Tato metoda má nevýhody, například v podobě dlouhé doby výroby požadovaného dílu, nutnosti tvorby podpěr, rozdílné přesnosti při tisku, náročnosti volby orientace tisku, atd. [5]



Obrázek 2: Funkční diagram způsobu materiálové extruze chalkogenidového skla formou 3D tisku [34]

Jak se dále v této práci dozvíme, některé z těchto nevýhod je možné zanedbat a některé pro nás budou představovat značné, a však řešitelné komplikace, při zachování největší výhody, kterou je relativně nízká cena. Způsob extruze materiálu metodou FFF, resp. FDM je vyobrazen na obr. 2, kde je naznačena funkčnost této metody v kombinaci s chalkogenidovým sklem.

U 3D tisku je možné využít několika přístupů k dávkování hmoty do místa vrstvení materiálu. Nejzákladnějším a současně nejstarším způsobem, je již zmiňovanou formou filamentu, neboli struny materiálu, nebo granulí. Tyto metody jsou využívány nejčastěji u metody FDM a FFF, viz obr. 2. [6]

V našem případě je nevhodné dopravovat materiál do tiskové hlavy formou filamentu, nebo granulí, jelikož by v těchto případech bylo nutné podstoupit výzkum. Obdobné materiály, jako jsou ty keramické, se pro dosažení tohoto stavu kombinují s termoplastickými pojivy, kde keramické částice mohou obsahovat okolo 60 vol%. [7] V této práci tak bude třeba využít odlišného systému tiskové hlavy.

Náš materiál má relativně nízkou teplotu tání, tudíž za pokojové teploty má dostatečně viskózní stav, aby reprezentovala, jedním názvem, polo-tuhou hmotu, která relativně optimálně drží svůj tvar, avšak je možné ji ideálně tvarovat, téměř jako modelínu. Takovou hmotu při dávkování nebude nutné tepelně upravovat, a tak tisková hlavice bude zajišťovat pouze dopravu a tvarování. Takové charakteristice odpovídá metoda Semi-Solid extrusion (SSE), kdy se dávkovaná hmota, jak už samotný název napovídá, nachází v polo-tuhém stavu. [8] K této metodě by se dala přidružit metoda Direct Ink Writing (DIW), která je jakousi podskupinou metody SSE, a je zde zajímavým a současně jednoduchým řešením využití injekční stříkačky, která je tvarově spojena s mechanismem vytlačování. [9]

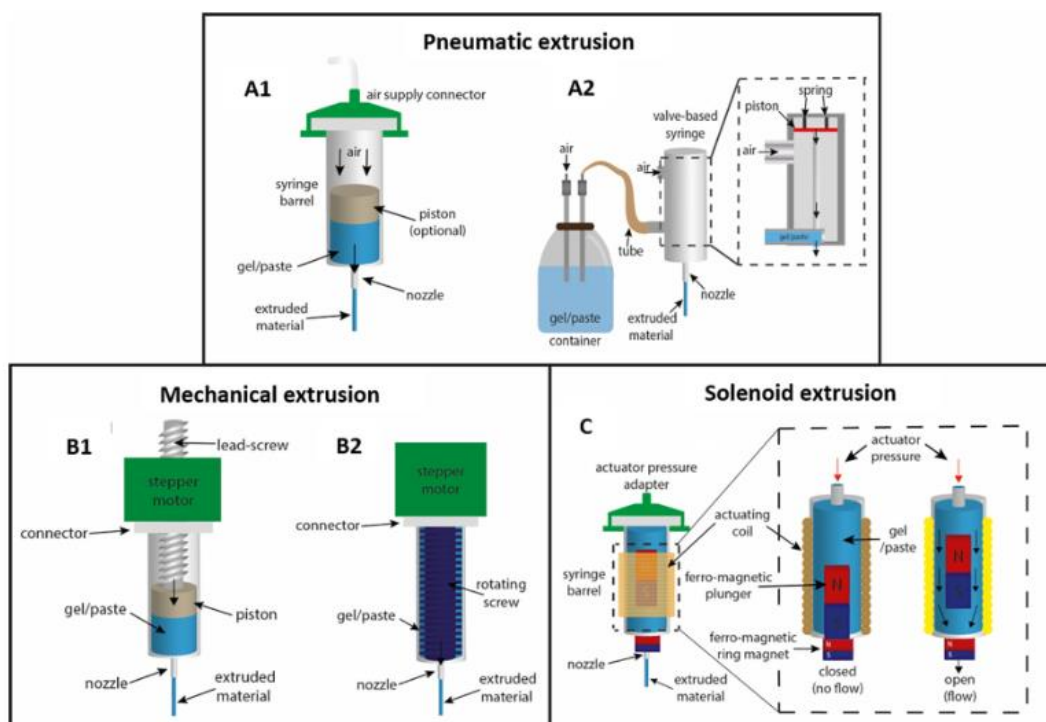
1.3. Přehled existujících extrudérů v závislosti na využitém materiálu

Pro zvolení vhodného způsobu dopravy si nejprve určíme materiály, které jsou svými vlastnostmi při tisku, příbuzné námi využívané hmotě. Takovým materiálem je především keramika, která je stejně jako naše hmota zpracovávána v dostatečně viskózní stavu, kdy drží svůj tvar a je tak vhodná pro tvarování. Podobným materiálem by také mohl být beton, který je využíván výhradně ve stavebnictví. Již v tomto odvětví našla metoda 3D tisku uplatnění, například při stavbě budov, a tak bude možné vycházet z koncepcí využitých v této oblasti. [10] Vhodnými zástupci mohou být materiály tisknuté v gastronomii, kde se metoda 3D tisku

rozvinula pro vyřešení aktuálních zdravotních problémů, nebo problémů spjatých se životním prostředím. Současně je také díky této metodě možné vyrábět nové potravinové výrobky s volitelným tvary, barvami, chutěmi texturou a dokonce i nutričními hodnotami. [11] Tento fakt nám reprezentuje flexibilitu metody 3D tisku, kde je možné variabilně kombinovat různé materiály, nebo jeho jednotlivé složky. V neposlední řadě, je inspirativním biologický materiál, neboli hmota zvaná bio inkoust, nebo také bio gel, se kterým pracoval Haluška, ve své diplomové práci. [12] Tento materiál je organický, tedy obsahuje život, ve formě buněk, nebo bakterií. Nejrozšířenější využití z počátku bylo ve tkáňovém inženýrství. Po jeho pochopení se ale možnosti využitelnosti značně rozšířili. [13]

1.3.1 Základní konstrukční přístupy

Jako výchozí rozdělení konstrukčních řešení lze využít pneumatickou, mechanickou a solenoidovou extruzi, viz obr. Obrázek 3. Při způsobu využití stlačeného vzduchu, je materiál přímo, nebo prostřednictvím pístu, vytlačován z tiskové hlavice. V případě, že využíváme méně viskózní hmoty, je vhodný systém s on-off přepínací klapkou, kdy při zastavení přísunu vzduchu dojde k uzavření oběhu. [14] Dalším řešením je mechanická extruze, která využívá závitové tyče, buď přímo k dávkování hmoty, nebo k přenosu rotačního pohybu motoru na přímočarý pohyb plunžru. Je možné také využít přímočarého motoru, který pohání plunžr přímo

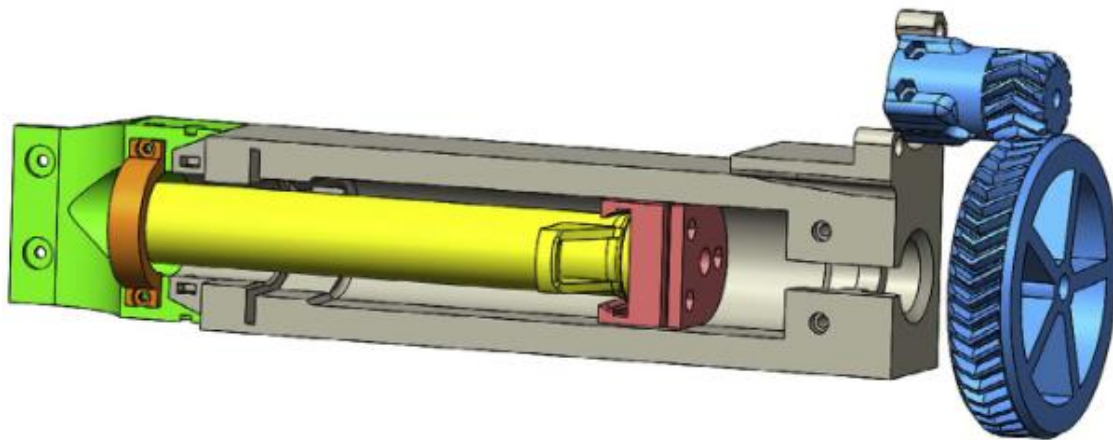


Obrázek 3: Základní konstrukční rozdělení pro využití technologie SSE v 3D tisku: A) Pneumatická extruze: A1) bez ventilu, A2) s ventilem, B) Mechanická extruze: B1) pístová, B2) s využitím závitové tyče, C) Solenoidová extruze [8]

v lineárním směru. [12] Metoda mechanické extruze je vhodná pro viskóznější hmoty, a tak je možné už v tuto chvíli předpovídat, že se jedná o nejvhodnější přístup pro naše řešení. [15] Poslední možností je využití solenoidu, kterým se ovládá ventil umístěný na základně tiskové hlavy. Pomocí elektrických impulzů se ruší magnetické pole mezi plovoucím feromagnetickým plunžrem a magnetem umístěným ve spodní části extruderu, a tak je umožněno průtoku materiálu. Setkáváme se tu s drobným problémem odezvy mezi elektrickým impulzem a uzavřením trysky. Zároveň je tento způsob vhodný pro nízko viskózní materiály. [14]

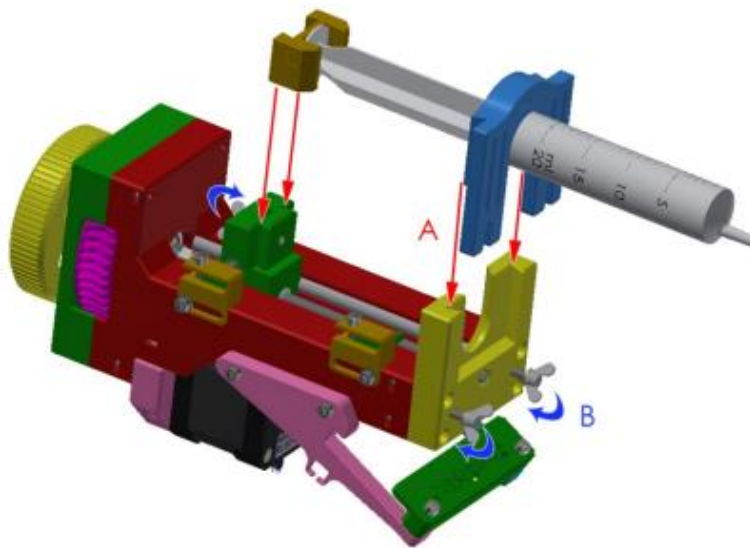
1.3.2 Existující metody materiálové extruze

Metoda Direct Ink Writing (DIW) v mechanické extruzi, je využita například u extruzní hlavice Large Volume Extruder (LVE), která zajišťuje tvarové ustavení injekční stříkačky do těla hlavy, kde pomocí závitové tyče, poháněné rotačním motorem s ozubenými koly, transformuje rotační pohyb na přímočarý pohyb plunžru, který je do injekční stříkačky vsunut. V tomto způsobu je současně možné vytlačování ve velkém zdvihu, a tak u malých průměrů (až 30 mm), kterými farmaceutické stříkačky disponují, je to značnou výhodou pro větší objemy vytlačovaných hmot. [16]



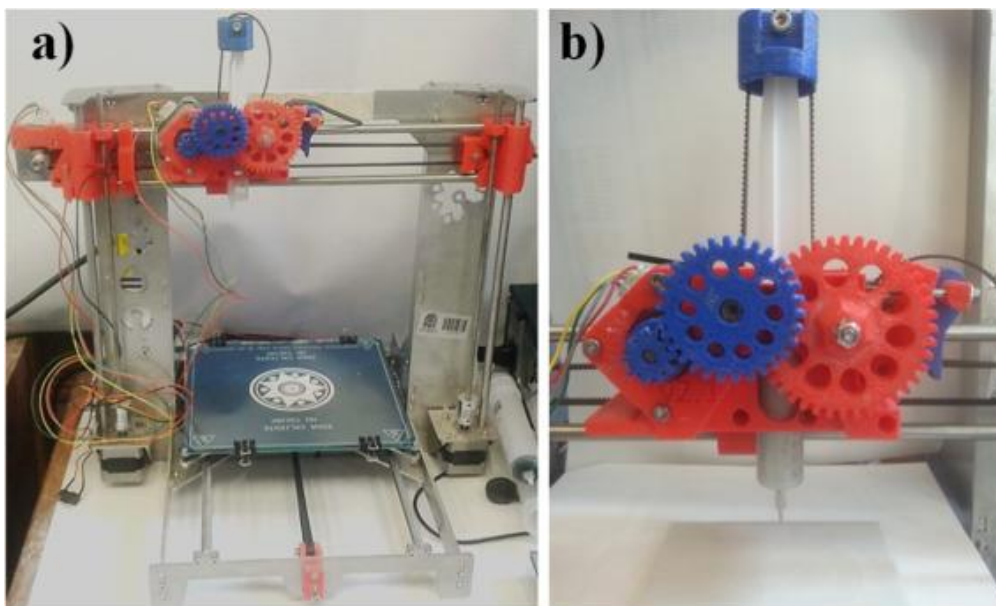
Obrázek 4: 3D CAD model tiskové hlavy LVE pro velké zdvihy, využívající mechanickou extruzi [17]

Obdobné řešení využil Haluška [12] ve své práci, pro tisk bio gelu, který následně využil také Svatý [17] pro tisk čokoládové hmoty, viz obr. 5.



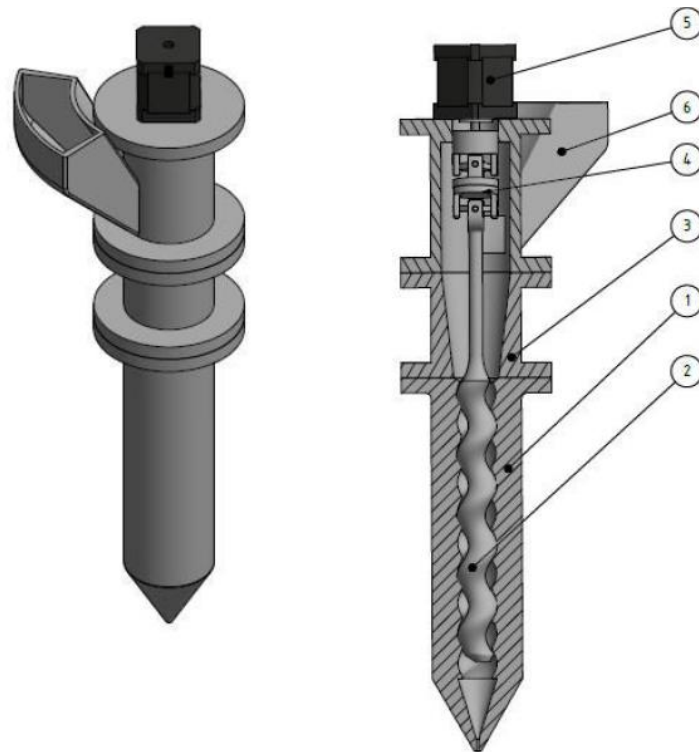
Obrázek 5: Model sestavy tiskové hlavy, s využitím závitové tyče jako pohonu plunžru [12]

Metody DIW bylo také využito ve spojení s velmi dostupnou surovinou, jak v Kolumbii, tak v podstatě na celém světě, kaolinitovým jílem. Tuto hmotu využívali C.F.Revelo a H.A.Colorado ve své práci, kdy zkoumali vlivy poměru vody a jílu na dávkování a tvarování. V tomto procesu bylo v tiskové hlavě využito ozubených kol, ozubeného řemenu a plunžru, který tlačí dávku skrze ústí trisky, viz obr 6. Ozubený řemen je v tomto řešení na jednom konci pevně uchycen a přes systém kladek je postupně zkracován. K regulaci dávkování je zde možné využít třech parametrů. Nejjednodušším z nich je změna průřez trisky. [9]



Obrázek 6: a) 3D tiskárna, b) detail vytlačovacího systému [9]

V potravinovém průmyslu se setkáváme s obdobnými variantami extrudérů, jako u biogelových materiálů, kdy lze využít přímočarého, nebo rotačního pohonu ve spojení s plunžrem, nebo závitovou tyčí. Pneumatické řešení ve spojení s plunžrem je ale pro toto odvětví také vhodné, viz obr. 3. [18] Jedním ze zajímavých řešení je využití vřetenového čerpadla s excentrickým šnekovým rotorem, viz obr. 7. Tento systém se skládá ze šroubovitého rotoru



Obrázek 7: Vřetenové čerpadlo s excentrickým šnekovým rotorem navrhnutém pro vytlačování čokoládové hmoty, 1) Pryžový stator, 2) Excentrický šnekový rotor, 3) Vyhřívávací komora, 4) Kloubový mechanismus, 5) Hřídelová spojka, 6) Násypka [41]

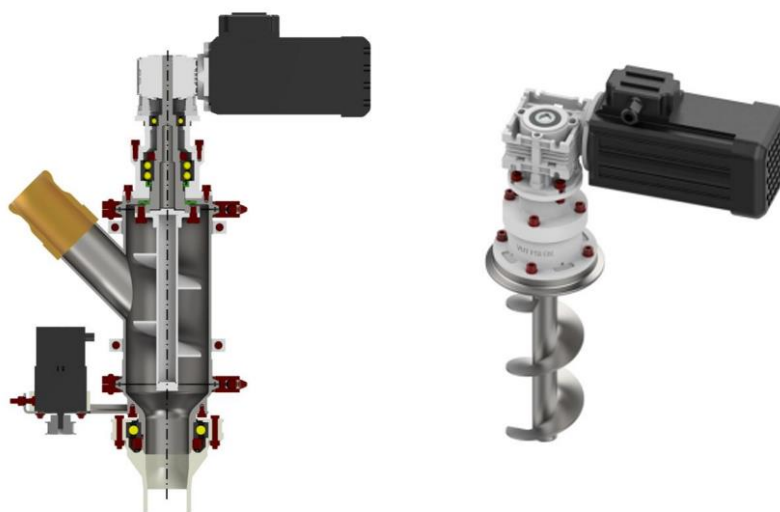
s dvojitou šroubovicí a statoru o dvoujnásobném stoupání. Při pohybu jsou obě části v určitých místech v dotyku. Mezi těmito dotyky se vytváří neměnné dutiny, které se s pohybem rotoru přesouvají směrem k výtokové části systému. Takové řešení obsahuje statický rotor vyrobený z poddajného přiřového materiálu, který je pro naše řešení, jak se později dozvíme, nevhodný. Zároveň je zde nutné zajistit uložení excentrického šnekového rotoru, aby byla zajištěna správná funkce. [19]

U cementových směsí se setkáváme s dalším rozdělením. Do tiskové hlavy lze směs, která je určena pro tvarování, dávkovat pomocí externího zařízení v případě, že je v hlavici řešená pouze funkce tvarování. Parametry dávkování jsou tak řízeny externím zařízením, kterým u betonových směsí, může být například pístové čerpadlo. Taková hlavice se nazývá pasivní tisková hlava, viz obr. 8 [20]. U těchto směsí se takové řešení nabízí, v závislosti na velkém objemu tisknuté hmoty a velkém rozměru tisknutých objektů, kterými mohou být například

obvodové zdi budov. Polohovací ústrojí mají z pravidla dané nostosti, na základě kterých je možné zajistit parametry přesnosti polohování, a tak je významnou součástí konstrukčního návrhu, minimalizovat hmotnosti tiskové hlavy. Naopak u aktivních hlavic je přítomen i dávkovací systém, kterým může být například šnek, viz obr. 9, nebo plunžr poháněn stlačeným vzduchem nebo mechanicky pomocí závitové tyče. Tyto hlavy jsou buď plněny předem daným objemem hmoty, před samotným tiskem, nebo jsou doplňovány externě, a však toto externí plnicí zařízení neovlivňuje parametry samotného tisku, tak jako u pasivních hlavic. [21]



Obrázek 8: Pasivní tisková hlavice s tryskou. V pravé části je přírodní dávkovací hadice [20]



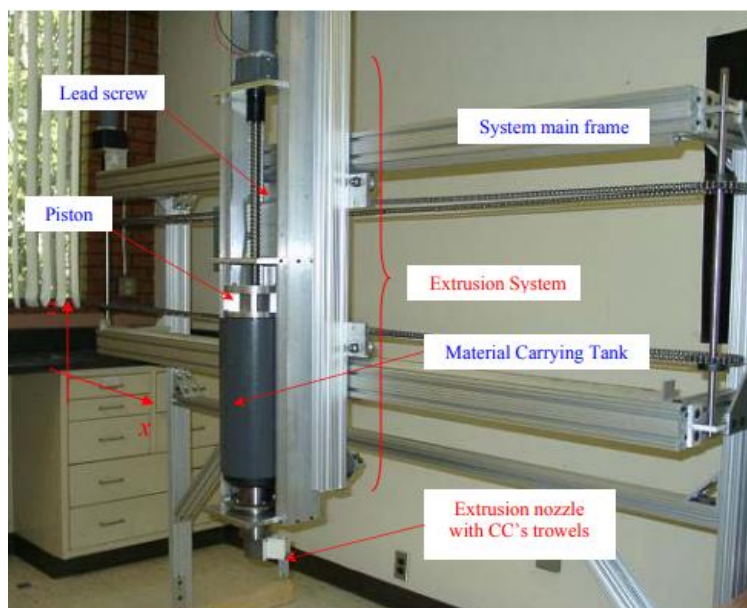
Obrázek 9: Aktivní tisková hlava s využitím šnekového podavače a rotační tryskou [22]

Ve chvíli, kdy je v tiskové hlavě přítomný dopravní člen (plunžr, šnek, atd.) je nastavování parametrů pro samotný tisk jednodušší. Na obr. 9 je ukázáno konstrukčního řešení aktivní hlavice využité Slavičkem [22] k tisku betonových a dalších stavebních směsí. U tohoto řešení je využito pohyblivé trysky, která pro hranatý průřez (nejčastěji obdélník) tlačенého materiálu opisuje v tečném směru trajektorii dráhy pohybu. Toto řešení je chráněno užitným vzorem, primárně kvůli otočné trysce. [23] Řešení otočné trysky je u cementových směsí, zejména u metody Contour Crafting (CC) často využívána. Hlavním důvodem je využití již zmíněného obdélníkového průřezu, a jeho kroucení při změně směru, viz obr. 10. [20]



Obrázek 10: Kroucení cementového filamentu bez využití otočné trysky [20]

Odlišným řešením pro obdobnou aplikaci je na obr. 11, kdy je využito závitové tyče, která následně pohání píst, který koná přímočarý pohyb a vytlačuje tak materiál, který je zde uložen ve finálním objemu, který je hraniční pro velikost tisknutého objektu. Stejně jako předchozí systém, je tento určen pro metodu CC, kdy jsou tisknuty kontury objektu, například obvodové zdi domu. [24]



Obrázek 11: Mechanismus pro tisk cementových směsí metodou Contour Crafting, za využití plunžru poháněného elektromotorem prostřednictvím závitové tyče [24]

2. Výběr koncepčního návrhu

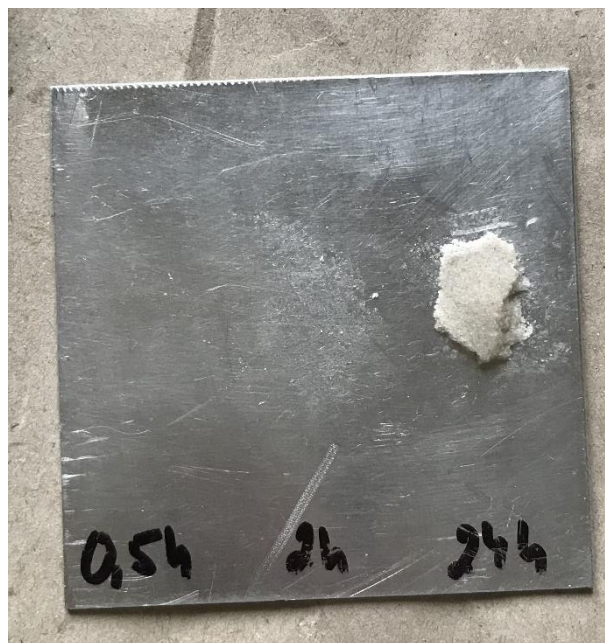
2.1. Výběr materiálu k výrobě

Při předešlých experimentech s vyzkoumanou hmotou byla zjištěna negativní reakce s kovovými materiály. Na základě této zkušenosti je přistoupeno k celé problematice skrze plastový, tisknutý materiál. Aby se tyto zjištěné jevy prokázaly, byl vytvořen experiment s náhodně vybranými materiály, kterými jsou, z plastů: Akrylonitrilbutadienstyren (ABS), Polyamid (PA), Polypropylen (PP) a z kovových materiálů: korozivzdorná ocel spolu se spékáním kovovým práškem.



Obrázek 12: Ukázka experimentu přilnavosti směsi k materiálu

Materiál, který se bude vytlačovat, byl v hručkách, tlakem prstu nanesený na jednotlivé vzorky materiálů. V časových intervalech, viz popisky na vzorcích na obr. 12, byl materiál od vzorku odjímán. Překvapivým výsledkem byla absolutní nepřilnavost k plastovým materiálům, ze kterých testovací hručky odpadávaly téměř samy. Na konci testu (72 hodin) dokonce působily dojmem, že se k testovací destičce vůbec nepřichytily. U kovových materiálů, zejména u korozivzdorného materiálu (nerezu), se známky přichycení objevili již od 2. hodiny a od 10. hodiny u spékaného kovového materiálu. V tuto chvíli se již hručky oddělovali komplikovaně. U korozivzdorného materiálu, dokonce na omak bylo cítit, že částičky hmoty ulpěly na povrchu a pomocí nehtu je bylo nemožné odstranit. Po 24 hodinách už větší část hručky nebylo možné

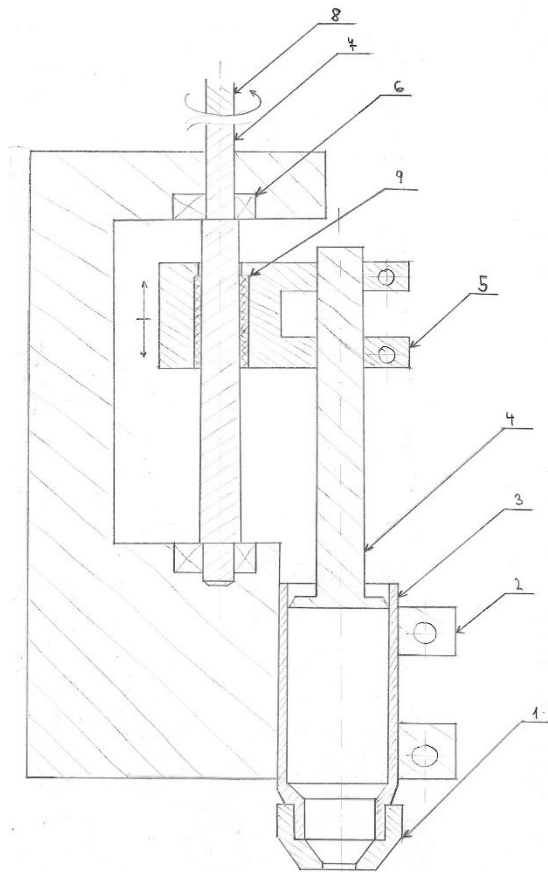


Obrázek 13: Vzorek korozivzdorné ocele

silou prstů odstranit, viz obr. 13, a tak lze z experimentu velmi snadno usoudit, že obecně kovové materiály jsou pro konstrukci, kde bude vytlačovaný materiál v kontaktu s tiskovou hlavou, nevhodné. V případě, že by na základě jiných požadavků bylo nezbytné využít kovový materiál, muselo by dojít k dalšímu, konkrétně stanovenému, experimentu.

2.2. Koncepční návrhy

Po zhodnocení současného stavu extrudérů jsem se rozhodl vybrat koncepční návrhy, ze kterých následně jeden využiji pro tuto diplomovou práci. Koncepčními návrhy jsou řešení s využitím závitové tyče, viz obr 14, řešení s excentricky uloženým šnekovým rotorem, viz obr. 7 a řešení se šnekovým podavačem, viz obr. 15.



Obrázek 14: Princip s využitím závitové tyče. 1) Vytlačovací tryska, 2) Základový rám s objímkami pro upnutí, 3) Vytlačovací hlava, 4) Vytlačovací plunžr, 5) Jezdec, 6) Ložisko uchycení závitové tyče, 7) Závitová tyč, 8) Hřídel od pohonu, 9) Matice

2.2.1 Způsob dávkování materiálu do hlavice

První problematikou je dávkování materiálu. Je možné dávkovat materiál do předem objemově omezené nádoby, nebo externě pomocí připojeného, teoreticky neomezeného, zdroje. Objemově omezenou nádobu je zjednodušeně možné připodobnit injekční stříkačce, která je ve vysunutém stavu plně naplněna. Po jejím úplném zmáčknutí dojde k vyprázdnění nádobky a musí se zajistit opětovné naplnění. Pro opětovné naplnění by v našem případě bylo nutné proces extruze přerušit a nádobu opět naplnit. Tím by se velikost tisknutého objektu omezila právě velikostí jedné nádoby. Takovýto způsob je využíván u systémů s využitím závitové tyče. Zde by současně bylo třeba zajistit úplnou demontáž, nebo dostatečné vyjetí plunžru pro vytvoření prostoru k naplnění.

Pro neomezené, tedy kontinuální vytlačování, by bylo možné využít ústí přímo do pracovní části tiskové hlavice, kam by bylo možné hmotu vkládat ručně, nebo pomocí externího zařízení, kterým by mohlo být například pístové čerpadlo, které se využívá s použitím betonových směsí.

U takového využití bychom nebyli omezeni objemem materiálu a mohlo by se pomýšlet i nad tiskem rozměrnějších objektů. Současně nám tento způsob plnění umožňují dva zvolené koncepční návrhy, které využívají šnekových podavačů.

2.2.2 Stav dávkované hmoty

Jelikož je křemičitého písku v extrudované směsi značná převaha oproti ostatním přísadám, zejména těm tekutým, hmota je velmi kompaktní, hutná. Vhodným a konstrukčně nejjednodušším způsobem bude dopravování hmoty do tiskové hlavy v již uhněteném stavu. I přes tento fakt, bude pro udržení dostatečné poddajnosti látky, vhodné zrealizovat drobné promíchání i v samotné tiskové hlavě. Takovou vlastnost nám ve větší míře umožní varianta se šnekovým podavačem. U řešení se závitovou tyčí, je jakýkoliv pohyb materiálu při dávkování téměř nemožný. U řešení s excentrickým šnekovým rotorem by materiál mohl rotovat díky tření mezi ním a stěnou statoru, ale pouze drobnou mírou. Při využití šnekového podavače by se hmota mohla nejen mírně promíchávat, ale současně také rozdělovat, díky hraně šroubovice šneku.

2.2.3 Požadavek těsnosti

U šnekového podavače se setkáváme s vlastností v podobě nedokonalé těsnosti šneku vůči stěně, kde je třeba zajistit alespoň minimální mezeru. Tato vlastnost pro nás může být zároveň výhodná, i nevýhodná. U ostatních dvou řešení (se závitovou tyčí a s excentrickým šnekovým rotorem) je řešena těsnost mezi plunžrem, resp. vřetenem, a tělem hlavice. Protože se tyto způsoby převážně využívají pro méně viskózní hmoty (bio gel, voda,...), využívá se pryžového těsnícího kroužku, resp. pryžového povrchu statoru, které současně dokonale těsní a zabraňují tak průniku dávkované hmoty do místa nad plunžrem, resp. do sousední dutiny. Současně také u viskózních hmot, zajišťují vznik drobného podtlaku, pro zamezení samovolného vytékání, ve větším množství, při pozastavení procesu extruze. Protože je naše hmota vysoce viskózní, takových výhod nelze využít. Současně z důvodu velmi abrazivní povahy hmoty, vzhledem ke složce křemičitého písku, by docházelo k vysokému opotřebením právě pryžových součástí. Těsnost by bylo tedy nutné zajistit jinými, méně poddajnými materiály, a tak by vzrostl nárok na přesnost výroby a s tím i její cena.

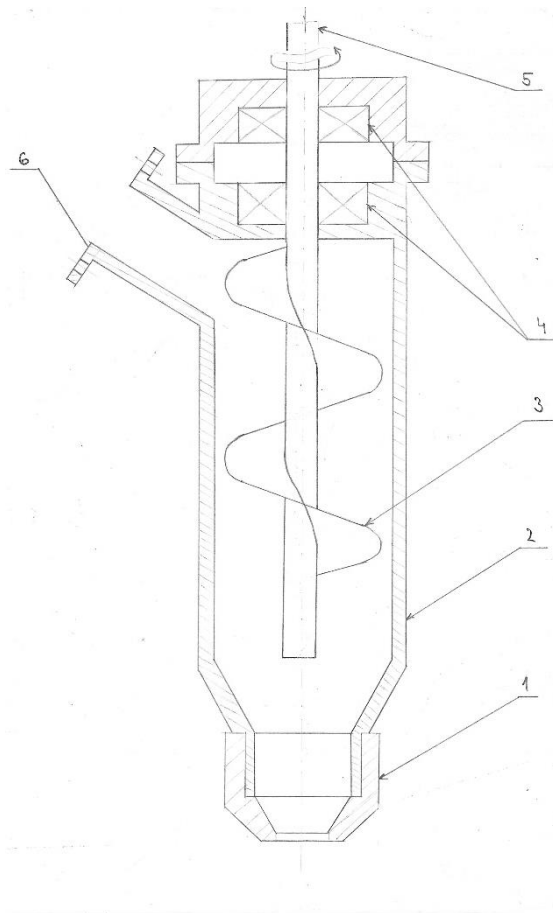
Ulpívání materiálu na stěnách bude jedním z problematik k řešení při samotném testování vybraného konstrukčního návrhu, a tak nebude v tuto chvíli brán v potaz.

2.2.4 Zhodnocení koncepčních návrhů

U řešení se závitovou tyčí jsou velkými nevýhodami přímočarý pohyb a s ním spojený dvounásobný zástavbový prostor v axiálním směru, kvůli požadavku na úplné vysunutí plunžru. Další nevýhodou je nárok na těsnost plunžru. Výhodou může být množství parametrů, kterými lze změnit vlastnosti extruze.

U řešení s excentricky uloženým šnekovým rotorem, je stejnou nevýhodou, jako u předchozího řešení, těsnost. Zároveň by takové řešení, bez využití pryžového materiálu, bylo náročné na přesnost výroby a bylo by téměř nemožné využít plastového materiálu, způsobem 3D tisku.

Jako poslední koncepční návrh, který je vybrán pro konstrukční část této práce, je extruder se šnekovým podavačem. U této možnosti bude možné využít technologie 3D tisku a plastového materiálu pro samotnou výrobu. V následující kapitole bude vytvořen koncepční návrh, který bude následně zhotoven a otestován. V průběhu konstrukce budou řešeny jednotlivé vzniklé problémy. Snahou této práce bude současně tyto problémy buď minimalizovat, nebo odstranit.



Obrázek 15: Princip s využitím šnekového podavače. 1) Vytlačovací tryska, 2) Tělo hlavičky, 3) Šnekový podavač (šnek), 4) Ložiska uložení šneku, 5) Hřídel pohonu, 6) Oblast plnění hlavičky

3. Konstrukční návrh

3.1. Vstupní parametry pro konstrukční návrh

Jako polohovací jednotky, je v této práci využito angulárního robotu KR 16 firmy Kuka, který je využíván v rámci katedry k obdobným experimentálním úlohám. Tento manipulátor vnáší do řešené úlohy omezení v podobě nosnosti a s tím i spojené parametry rychlostí a opakovatelné přesnosti.

Jak bylo již zmiňováno v předchozí kapitole, z plastových materiálů metodou 3D tisku budou zhotoveny díly, které jsou v kontaktu s dávkovanou hmotou.

Z pohledu dodávky materiálu do tiskové hlavičky, je koncepčně zamýšleno s využitím dopravní hadice, která se připojí k připravené přírubě na plášti hlavičky. Takové řešení by bylo vhodné řešit více podrobně, a tak v této práci bude uvažováno s provizorní násypkou, která bude plněna ručně.

3.2. Výpočtový návrh dopravníku, pohonu a uložení

3.2.1 Návrh šnekového dopravníku

Šnekový dopravník je na základě literatury o šnekových dopravnících [25] navrhován z výpočtu objemového průtoku, který prochází skrze trysku, volenou s průměrem d_t . Dalším vstupním parametrem do výpočtu průtoku, je volena rychlost tiskové hlavy při vytlačování v_v . Výpočet vychází z úvahy, že vytisknutý materiál na základové desce má stejný průřez, jako tlačенý materiál v místě trysky.

Tabulka 1: Volené vstupní parametry výpočtu

Délka výtlaku	l_v	1	m
Rychlost posuvu hlavičky	v_v	0,045	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Průměr výstupní trysky	d_t	0,015	m

Objemový průtok tryskou byl vypočítán dle vztahu:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot d_t^2 \cdot v_v}{4} \quad (1)$$

Z literatury o výpočtu šnekových dopravníků [25], lze spočítat vnější průměr šneku ze vztahu pro výpočet objemového průtoku, jako:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p \cdot C_H \cdot \psi \cdot n_2 \quad (2)$$

Kde součinitel plnění ψ , vypočítáme jako poměr plochy zaplnění žlabu a průřez šneku [25]:

$$\psi = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \quad (3)$$

Kde:

d ... menší průměr šneku

D ... vnější průměr šneku

Z toho odvodíme vztah pro výpočet vnějšího průměru šneku:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot C_H \cdot \psi \cdot n_2}} = 0,039m \quad (4)$$

Kde podle [25]:

Q_v ... objemový průtok skrze trysku

C_H ... součinitel snižující dopravované množství vzhledem ke sklonu dopravníku při dopravě vzhůru, pro náš případ volen jako 1/3 [26]

n_2 ... otáčky šneku, převzaté od zvoleného pohonu, viz kapitola: 3.2.2

p ... stoupání šneku, voleno shodné s vnějším průměrem $p = D$

3.2.2 Volba pohonu

Pohon je volen od firmy TG Drive s označením DS50. Tento pohon disponuje kompaktními rozměry, kdy přímo samotný produkt obsahuje převodový mechanismus. Dalšími kladnými vlastnostmi pro tuto práci, jsou dostupnost na trhu a možnosti variabilního pásma výkonu a otáček, které jsou snadno ovladatelné.

Protože je dopravní šnek zkonstruován z plastového materiálu, jakékoliv výpočty jsou pouze orientační a nelze k nim přihlížet jako ke stěžejním hodnotám. Současně se jedná o prototypové experimentální zařízení, kde je vhodné volit vyšší hodnoty parametrů pohonu. Takový pohon lze následně v dalších krocích optimalizace zredukovat a zvolit pohon bližší reálně otestovaným provozním parametrům.



Obrázek 16: Zvolený pohon extrudéru DS50 od firmy TG DRIVE [27]

Tabulka 2: Základní parametry pohonu DS50 [27]

Jmenovitý výkon	P_n	113	W
Jmenovitý krouticí moment	M_{kn}	18	N·m
Převodový poměr	i	63	-
Jmenovité výstupní otáčky	n_2	0,53	s^{-1}

3.2.3 Hřídelová spojka

Jako prevence proti poškození plastového šneku je zvolena třecí spojka, jako spojovací prvek pohonu a šneku, přenášející krouticí moment. Vybraná součást je od firmy Huco s označením 269P48.3535.RS. Tato součást umožňuje nastavení požadovaného krouticího momentu prokluzu v rozsahu 1 - 3 N·m, kdy je tento krouticí moment možné nastavit ručně, bez demontáže spojky. Z dostupných produktů je voleno řešení se svěrnou objímkou na jedné straně a objímkou se stavěcími šrouby na straně druhé. Celá spojka je vrtaná na průměr hřídele 12 mm.

Tabulka 3: Základní parametry hřídelové spojky 269.48.3535 [28]

Jmenovitý krouticí moment spojky	M_{kns}	3	N·m
Vrtání	B	12	mm
Maximální průměr těla	A	48	mm
Délka	Ls	102	mm



Obrázek 17: Třecí hřídelová spojka HUCO 269.48.3535 [28]

3.2.4 Montážní příruba motoru

Aby bylo možné spojit pohon s vybranou třecí spojkou, viz kapitola: 3.2.3, je třeba zkonstruovat spojovací součást, která bude šroubovým spojením připevněna k pohonu a jejím výstupem bude hřídel o průměru 12 mm. Vzhledem k upevnění spojky stavěcími šrouby na jednom z konců, je voleno kovového materiálu ČSN 11 500, s využitím plošky na menším průměru, pro dosednutí stavěcího šroubu. Z důvodu přiléhavosti čelních ploch obou sousedních dílů, je na montážní přírubě navržen zápich, který je následně vypočítán z pohledu vrubové únosnosti při míjivém způsobu namáhání. Je zvoleno zápichu tvaru G 2x0,1, viz obr. 22.

Pro výpočet je využito vzorce [29]:

$$\tau_c^* = \frac{k_L \cdot k_S \cdot k_{sf\tau} \cdot R_m}{k_f} = 78,6 \text{ MPa} \quad (5)$$

Kde:

k_L ... součinitel vlivu namáhání

k_S ... součinitel velikosti

$k_{sf\tau}$... součinitel jakosti povrchu pro krut

R_m ... mez pevnosti v tahu

k_f ... součinitel vrubu

Tabulka 4: Vstupní hodnoty pro výpočet vrubového napětí

Mez pevnosti v tahu	R _m	470	MPa
Mez kluzu v tahu	R _e	245	MPa
Poloměr zápichu	r	0,4	mm
Průměr v místě zápichu	d _z	11,6	mm
Větší průměr příruby	D _p	42	mm

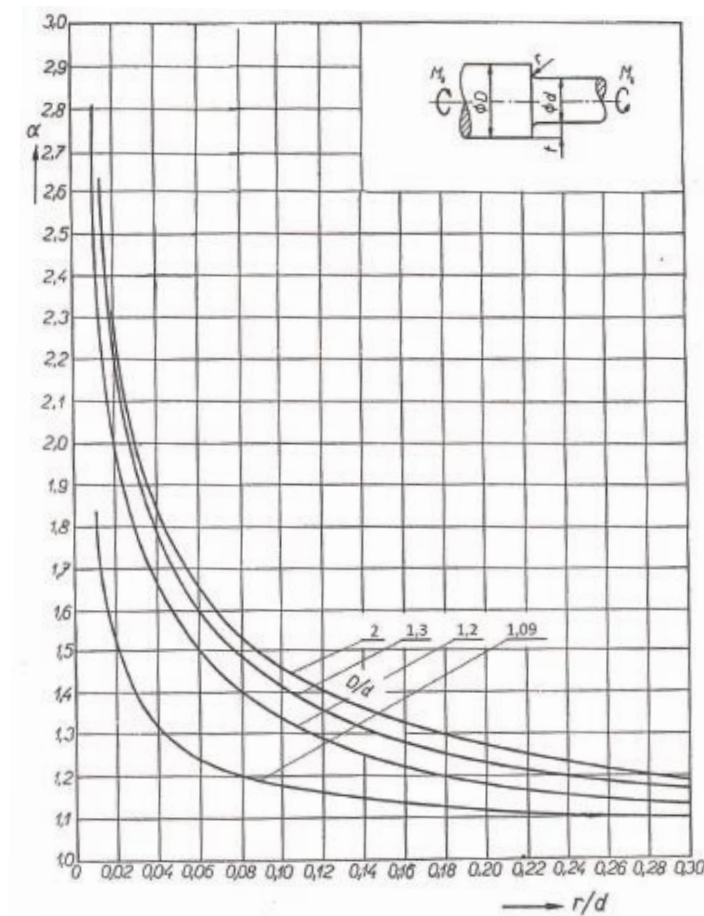
Součinitel vlivu namáhání je volen podle literatury [29], $k_L = 0,25$, který je definován pro namáhání krutem.

Součinitel tvaru vrubu je vypočítán následovně:

$$\frac{r}{d_z} = 0,034 \quad (6)$$

$$\frac{D_p}{d_z} = 3,62 \quad (7)$$

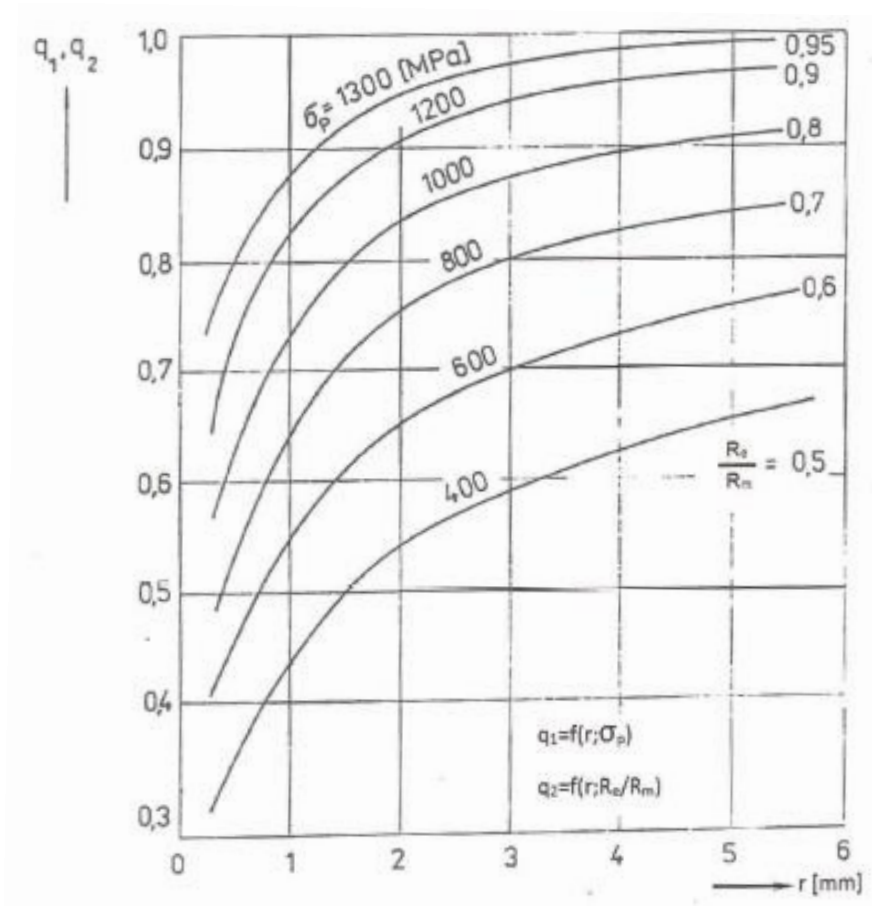
Z vypočítaných hodnot, po dosazení do grafu na obr. 18, $\alpha = 2$.



Obrázek 18: Součinitel tvaru vrubu [29]

Pro krut je podle grafu na obr. 19 $q = q_2$, a tak z grafu odečítáme hodnotu $q = 0,37$, po dosažení poloměru vrubu a poměru meze kluzu a meze pevnosti v tahu:

$$\frac{Re}{Rm} = 0,52 \quad (8)$$



Obrázek 19: Součinitel vrubové citlivosti [29]

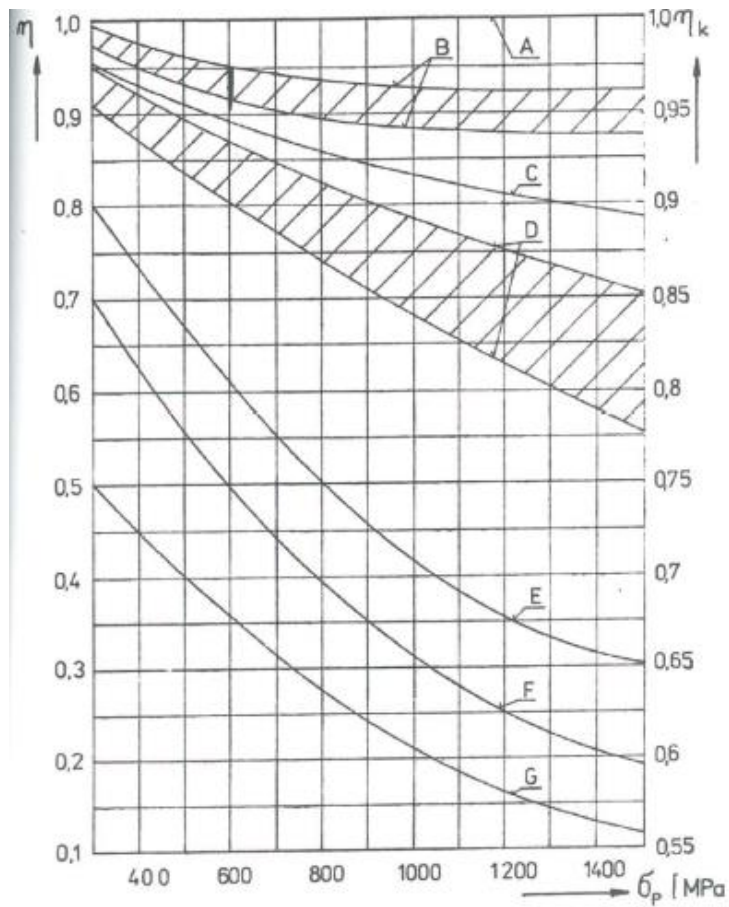
Součinitel vrubu k_f (β) je pak vypočítán podle vzorce:

$$k_f = 1 + (q \cdot (\alpha - 1)) = 1,37 \quad (9)$$

Součinitel vlivu jakosti povrchu pro krut se vypočítá podle vzorce:

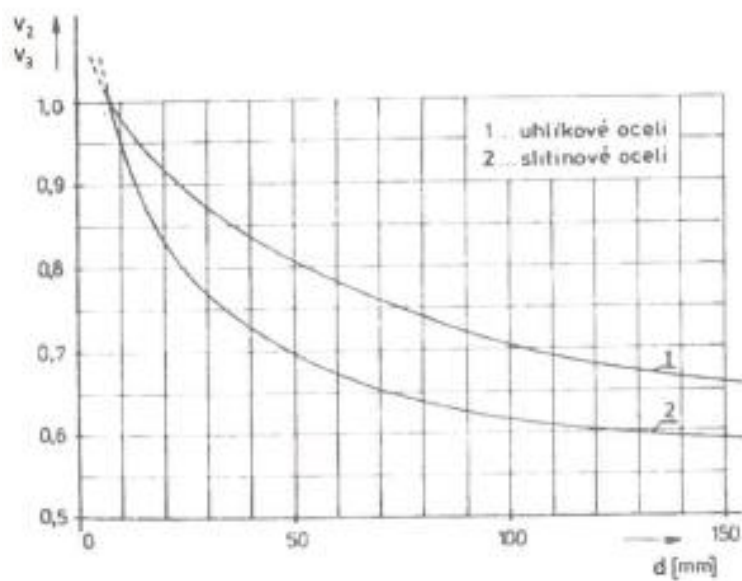
$$k_{sf\tau} = \frac{k_{sf} + 1}{2} = 0,94 \quad (10)$$

Kde součinitel $k_{sf} = 0,87$ odečteme z grafu na obr. 20, kdy je voleno hladkého opracování při $Ra = 3,2$.



Obrázek 20: Součinitel vlivu jakosti povrchu [29]

Součinitel velikosti je odečten z grafu na obr. 21, kde $k_s = 0,98$.



Obrázek 21: Součinitel velikosti [29]

Vypočtená hodnota vrubové meze únavy je následně porovnána s napětím od jmenovitého krouticího momentu motoru. Napětí v krutu se pak vypočítá následovně:

$$\tau_k = \frac{16 \cdot M_{kn}}{\pi \cdot d^3} = 92 \text{ MPa} \quad (11)$$

Protože se jedná o mívivé zatížení, rozsah napětí je od nuly do maxima, a tak je amplituda shodná se střední hodnotou napětí. Spočítají se s pomocí vztahu:

$$\tau_a = \tau_m = \frac{\tau_k}{2} = 46 \text{ MPa} \quad (12)$$

Složka fiktivního napětí je pak vypočtena podle vztahu:

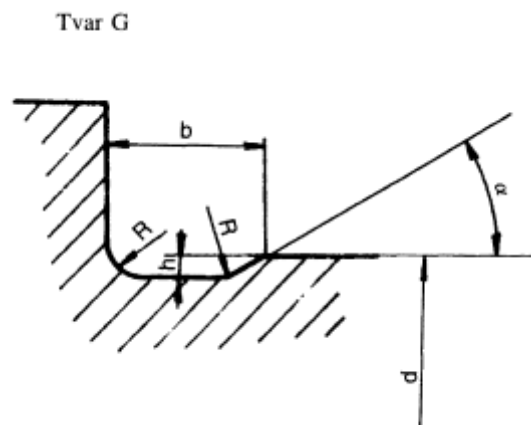
$$\tau_F = 0,7 \cdot R_m = 329 \text{ MPa} \quad (13)$$

Po dosazení všech spočítaných výsledku, zjistíme hodnotu bezpečnosti podle vztahu:

$$k = \left(\frac{\tau_a}{\tau_C^*} + \frac{\tau_m}{\tau_F} \right)^{-1} = 2,2 \quad (14)$$

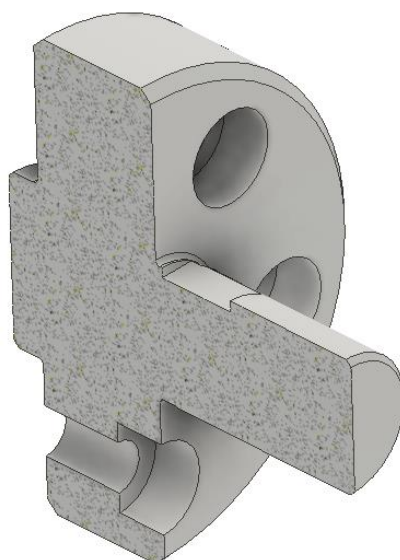
Vzhledem k uvažování provozních podmínek s maximální hodnotou krouticího momentu 3 N·m, je tento výpočet záměrně naddimenzován, vzhledem k výkonům motoru.

Zápich na součásti je vybrán z literatury [30], viz obr. 22.



Obrázek 22: Volený zápich pro přírubu motoru [30]

Výsledný díl je pak zkonstruován, viz obr. 23.

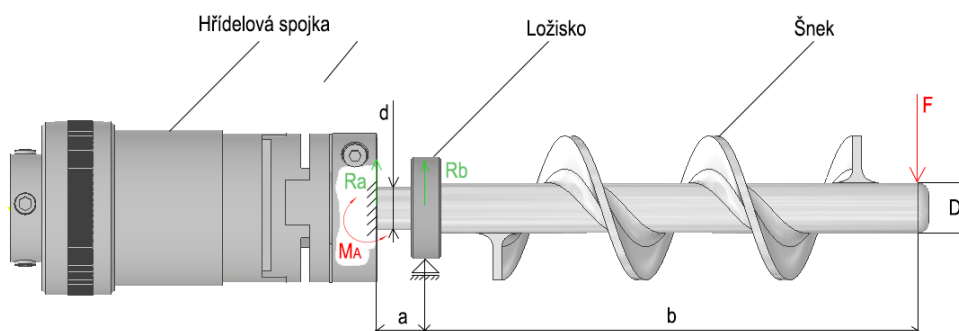


Obrázek 23: Příruba motoru

Tento díl současně zastává středící funkci, kdy ustavuje hřídelovou spojku do souososti s pohonem. Pro středění je využito tolerovaného otvoru montážního rozhraní pohonu.

3.2.5 Uložení šneku

Aby byl pracovní člen – šnek tužší, došlo k osazení hřídele ložiskem, které zachytává jak radiální, tak axiální zatížení. Ložisko je umístěno, kvůli nárokům na zástavbové prostory v bezprostřední blízkosti spojení s hřídelovou spojkou. Toto uložení bylo staticky vyhodnocováno pod ohybovým zatížením 1 N. Zatěžující síla, je odhadována z množství hmoty, způsobující nevyvážení v jeden čas v jedné části půdorysného průřezu pláště pracovního prostoru šneku. K takové situaci může dojít buď při prvotním plnění, nebo konečném vyprazdňování tiskové hlavy.



Obrázek 24: Sestava spojky, ložiska a šneku s vyobrazením nákresu nosníku

Tabulka 5: Vstupní parametry výpočtu

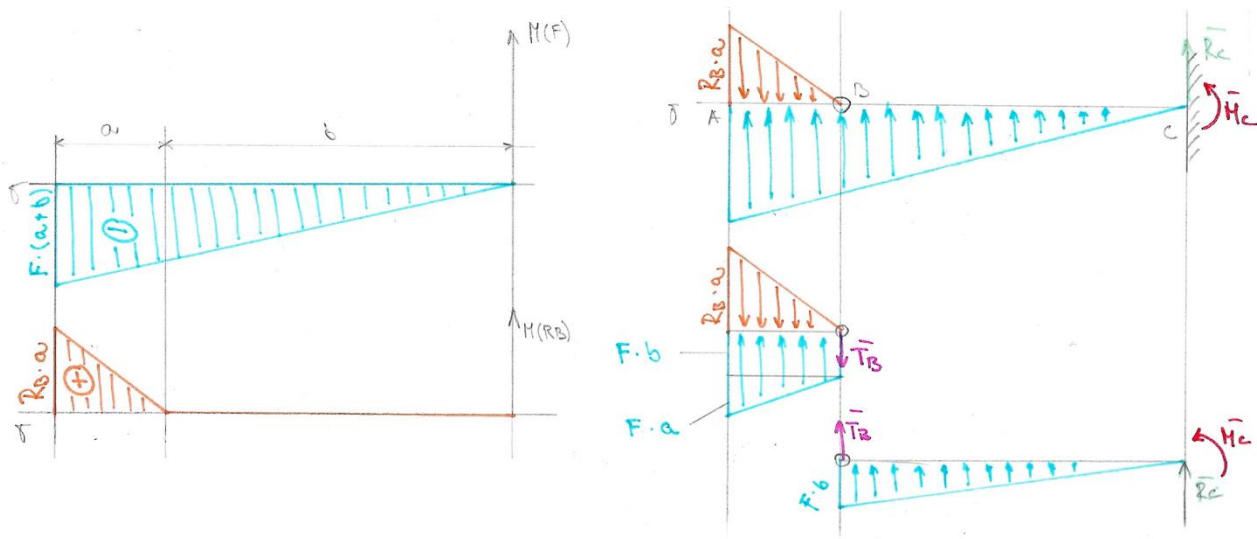
Modul pružnosti materiálu PLA [31]	E	24000	MPa
Vzdálenost od ložiska k místu zatížení	b	135	mm
Vzdálenost od spojky k ložisku	a	10	mm
Menší průměr šneku	d	10	mm

Rovnice rovnováhy pro skutečný nosník:

$$\uparrow: R_A + R_B - F = 0 \quad (15)$$

$$\curvearrowright A: M_A + F \cdot (a + b) - R_B \cdot a = 0 \quad (16)$$

Protože zde máme 3 neznámé veličiny a dvě rovnice, lze prohlásit, že tato soustava je 1x staticky neurčitá. Na obr. 25 vlevo je zobrazen průběh ohybových momentů od jednotlivých sil, způsobem superpozice. S využitím Mohrovy metody se tyto průběhy aplikují na náhradní nosník, jako jeho zatížení, viz obr. 25 vpravo.



Obrázek 25: Průběh momentu skutečného nosníku vlevo, náhradní nosník podle Mohrovy metody napravo

Rovnice rovnováhy pro náhradní nosník:

$$\uparrow: T_B' + R_C' + \frac{F \cdot b^2}{2} = 0 \quad (17)$$

$$\sim C: T_B' \cdot b + \frac{F \cdot b^3}{3} - M_C' = 0 \quad (18)$$

$$\uparrow: -T_B' - \frac{R_B \cdot a^2}{2} + F \cdot a \cdot b + \frac{F \cdot a^2}{2} = 0 \quad (19)$$

$$\sim B: F \cdot b + \frac{2}{3} \cdot F \cdot a - \frac{2}{3} \cdot R_B \cdot a = 0 \quad (20)$$

V tuto chvíli se již počet neznámých rovná počtu rovnic, a tak lze tuto soustavu početně řešit.

Z rovnice (20) lze vyjádřit reakci R_B :

$$R_B = \frac{3 \cdot F \cdot b + 2 \cdot F \cdot a}{2 \cdot a} = 21,25 \text{ N} \quad (21)$$

Z rovnice (19) lze vyjádřit reakci T_B' :

$$T_B' = -\frac{R_B \cdot a^2}{2} + F \cdot a \cdot b + \frac{F \cdot a^2}{2} = 337,5 \text{ N} \quad (22)$$

Z rovnice (18) lze vyjádřit reakční moment M_C' :

$$M_C' = T_B' \cdot b + \frac{F \cdot b^3}{3} = 865,7 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (23)$$

Tento moment, který působí na náhradním nosníku, je momentem, který lze dosadit do rovnice výpočtu průhybu, ze kterého dostaneme výsledek:

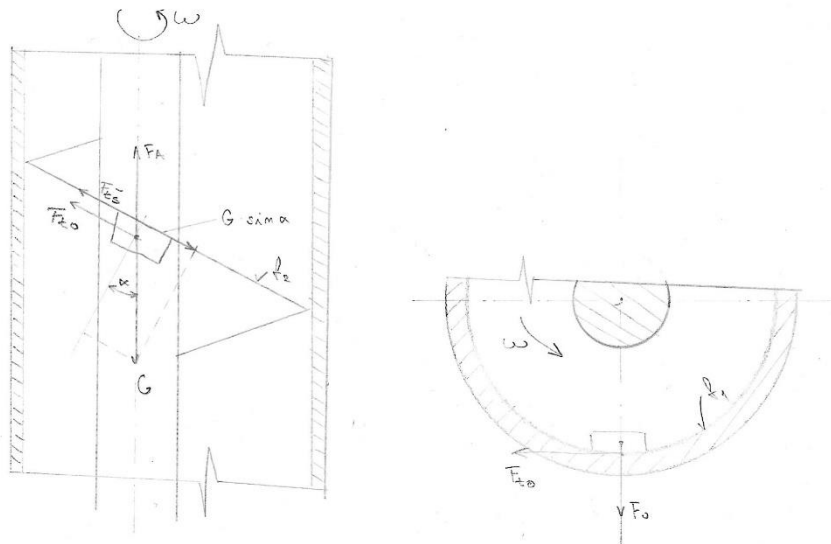
$$w_{max} = \frac{M_C'}{E \cdot J_y} = 0,035 \text{ mm} \quad (24)$$

Zde kvadratický moment průřezu je vypočítán podle vztahu [30]:

$$J_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = 1018 \text{ mm}^4 \quad (25)$$

3.2.6 Výpočet ložiska

Výpočet v předchozí kapitole: 3.2.5 nabízí hodnotu radiálního zatížení ložiska. Tato síla je nazvána jako reakce R_B . Dalším namáháním, které na ložisko působí, je zatížení v ose rotace – axiální síla od dávkované hmoty, která působí v opačném směru dávkování materiálu, tedy proti působení tíhového zrychlení. Na základě přístupu Ing. Rozboje v jeho disertační práci [32], kde je řešena doprava směrem vzhůru, jsem upravil silové působení, viz obr. 26.



Obrázek 26: Silový rozklad působení dávkované hmoty na součást šneku, odvozeno z literatury [32]

Z tohoto silového rozkladu vychází:

$$F_A = G \quad (26)$$

$$G \cdot \sin \alpha = F_{t\dot{s}} + F_{t0} \quad (27)$$

Kde:

F_A ... celková axiální síla od materiálu působící na šnek

$F_{t\dot{s}}$... třecí síla způsobena třením mezi materiálem a šnekem

F_{to} ... síla způsobena od tření mezi materiálem a stěnou pláště

G ... síla způsobena tíhovým zrychlením

α_s ... úhel stoupání závitu šneku

Tabulka 6: Vstupní hodnoty pro výpočet axiálního zatížení

Tíhové zrychlení	g	9,81	$m \cdot s^{-2}$
Úhel stoupání šneku	α_s	0,308	rad
Tření mezi materiálem a pláštěm	f_1	0,6	-
Tření mezi materiálem a šnekem	f_2	0,6	-
Poloměr šneku	$r_{\dot{s}}$	0,02	m
Otáčky šneku	n_2	0,53	s^{-1}
Hustota vytlačované hmoty	ρ_H	1200	$kg \cdot m^{-3}$
Maximální uvažovaný průměr trysky	d_{tmax}	0,02	m
Délka vytlačeného materiálu	l_v	1	m
Hmotnost šneku	$m_{\dot{s}}$	0,012	kg

Hmotnost hmoty, která je využívána ve vzorcích pro výpočet třecích sil, je definována následovně, pomocí maximálního objemu protlačovaném skrze trysku.

$$V_{max} = \frac{\pi \cdot d_{tmax}^2}{4} \cdot l_v = 3,14 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (28)$$

Se vstupními hodnotami viz tabulka 6. Hmotnost je pak vypočtena s využitím vzorce:

$$m_H = V_{max} \cdot \rho_H = 0,38 kg \quad (29)$$

Třecí síly následně lze vypočítat jako:

$$F_{to} = m_H \cdot r_{\dot{s}} \cdot f_1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_2)^2 \quad (30)$$

$$F_{t\dot{s}} = m_H \cdot g \cdot f_2 \cdot \cos \alpha_s \quad (31)$$

Po dosazení do vzorce (27) a vyjádření síly od tíhového zrychlení, které je rovno výsledné axiální síle, jak je zřejmé z rovnice (26), získáme axiální zatížení šneku hmotou, viz:

$$F_A = G = \frac{F_{t\dot{s}} + F_{to}}{\sin \alpha_s} = 7,14 \text{ N} \quad (32)$$

Abychom získali hodnotu axiálního zatížení působící na ložisko, od axiální síly působící od hmoty, je třeba odečíst hmotu samotného šneku, která je definována následovně:

$$G_{\dot{s}} = m_{\dot{s}} \cdot g = 0,12 \text{ N} \quad (33)$$

Z toho lze vypočítat celkovou axiální sílu působící na ložisko:

$$F_{AL} = F_A - G_{\dot{s}} = 7,02 \text{ N} \quad (34)$$

V tuto chvíli lze přejít k výpočtu únosnosti vybraného ložiska, kterým je součást od firmy SKF s označením 6001 2RSH. Ložisko je záměrně voleno s oboustranným krytováním, aby valivá ložiska nebyla v žádném případě v kontaktu s dávkovanou hmotou. Technické parametry ložiska lze vidět v tabulce 7.

Tabulka 7: Technické parametry ložiska SKF 6001 2RSH [33]

Vnitřní průměr ložiska	d_L	12	mm
Vnější průměr ložiska	D_L	28	mm
Šířka ložiska	B	8	mm
Základní dynamická únosnost	C	5,4	kN
Základní statická únosnost	C_0	2,36	kN
Axiální zatížení ložiska	F_{AL}	7,02	N
Radiální zatížení ložiska	R_B	21,25	N
Provozní otáčky ložiska	n_2	0,53	s^{-1}
Výpočtový součinitel ložiska	f_0	13	-

Ložisko bylo voleno na základě průměru hřídele – šneku a vnějšího zástavbového prostoru. Následnými výpočty bude zjištěna základní trvanlivost ložiska v provozu extrudéru. V prvním kroku je třeba určit z tabulky na obr. 27, koeficienty dynamického zatížení, pro výpočet ekvivalentního dynamického zatížení, viz rovnice (39). Celý výpočet je převzat ze zdroje [30].

Tabulka 3 – Hodnoty X a Y pro radiální kuličková ložiska

Typ ložiska	„Relativní axiální zatížení“ ^{1), 2)}		Jednořadá ložiska				Dvouřadá ložiska				e
			$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$		$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$		
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	
Radiální kuličková ložiska	$\frac{f_0 \cdot F_a^3}{C_{or}}$	$\frac{F_a}{iZD_w^2}$									
	0,172	0,172				2,30				2,30	0,19
	0,345	0,345				1,99				1,99	0,22
	0,689	0,689				1,71				1,71	0,26
	1,03	1,03				1,55				1,55	0,28
	1,38	1,38	1	0	0,56	1,45	1	0	0,56	1,45	0,30
	2,07	2,07				1,31				1,31	0,34
	3,45	3,45				1,15				1,15	0,38
	5,17	5,17				1,04				1,04	0,42
	6,89	6,89				1,00				1,00	0,44

Obrázek 27: Tabulka pro určení hodnot koeficientů dynamického zatížení [30]

Vstupním výpočtem je poměr hodnot axiálního zatížení a základní statické únosnosti:

$$\frac{f_0 \cdot F_{AL}}{C_0} = 0,04 \quad (35)$$

Touto hodnotou jsme mimo rozsah tabulky, a tak volím nejbližší hodnotu 0,172, které odpovídá hodnota koeficientu $e = 0,19$.

Z poměru axiálního a radiálního zatížení ložiska a následným porovnáním s koeficientem e , získáváme hodnoty koeficientů dynamického zatížení X a Y.

$$\frac{F_{AL}}{R_B} = 0,33 \quad (36)$$

Z toho vyplývá:

$$\frac{F_{AL}}{R_B} > e \quad (37)$$

Koeficienty dynamického zatížení X a Y, po odečtení z tabulky na obr. 27, jsou:

$$X = 0,56, Y = 2,3 \quad (38)$$

Tyto hodnoty následně dosadíme do výpočtu ekvivalentního dynamického zatížení, podle vzorce:

$$P = X \cdot R_B + Y \cdot F_{AL} = 28 \text{ N} \quad (39)$$

Výsledným výpočtem je již zmiňovaná základní trvanlivost v hodinách, kterou lze vypočítat dle vztahu:

$$L_{h10} = \frac{10^6}{3600 \cdot n_2} \left(\frac{C}{P} \right)^3 = 3,7 \cdot 10^8 \text{ h} \quad (40)$$

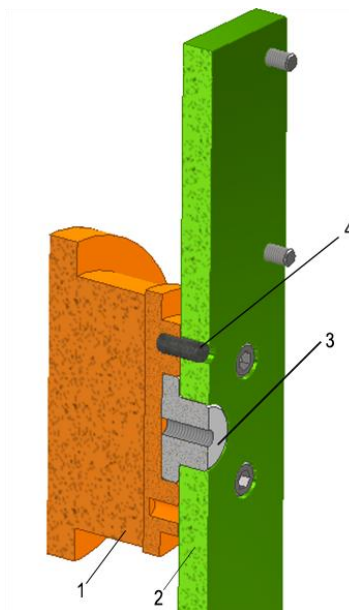
Životnost ložiska nám říká, že je ložisko velmi předimenzováno a bylo by vhodné využít ložisko s menší únosností. Protože je ale finanční stránka jednoho kusu takového ložiska zanedbatelná, takový díl nám dodá jistotu bezporuchového a bez údržbového chodu.

3.3. Popis konstrukce

V této kapitole bude podrobněji popsána celá konstrukce zařízení od upevňovací části k manipulátoru až po trysku, která je koncovým členem celého zařízení.

3.3.1 Nosná deska tiskové hlavy

Jak už je zmíněno v kapitole se vstupními parametry pro konstrukci: 3.1, jako manipulační zařízení tiskové hlavy je zvolen robot od firmy Kuka s označením KR 16. K montážní přírubě robotu je připevněna nosná deska, ke které jsou uchyceny všechny části tiskové hlavy, buď přímo, nebo zprostředkovaně. Díl nosné desky je upevněn pomocí čtyř šroubů M6 a souose ustaven s koncovým členem robotu prostřednictvím středícího válečku. Na roztečné kružnici upevňovacích šroubů je využito kolíku pro úhlové ustavení.

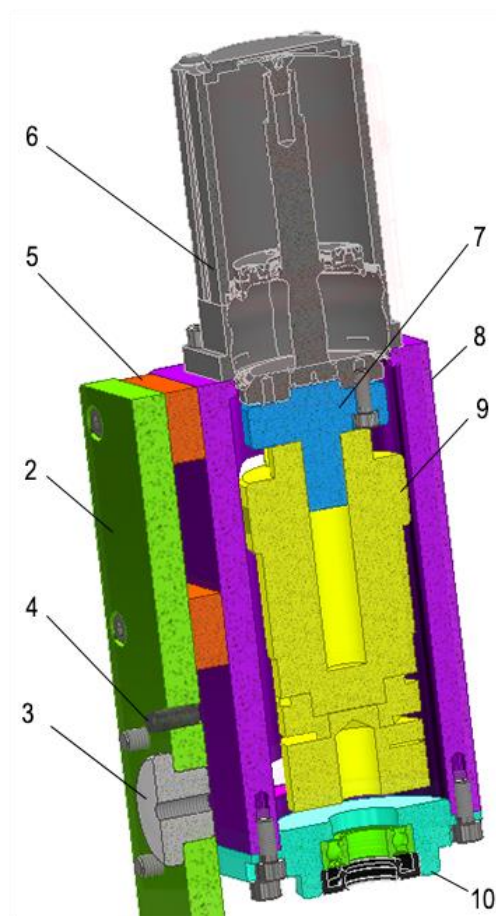


Obrázek 28: Řez oblasti upevnění nosné desky k přírubě robotu

Na obr. 28 je v řezu zobrazený způsob spojení koncového členu robotu (oranžový díl, 1) a nosné desky (zelený díl, 2), s ustavením pomocí středícího válečku (šedý díl, 3) a kolíku (černý díl, 4).

3.3.2 Ustavovací tělo

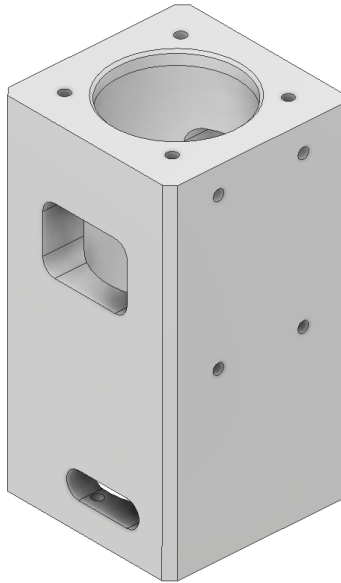
Multifunkční součástí v sestavě zařízení, je ustavovací tělo, které plní funkci vzájemného ustavení mezi manipulačním zařízením – robotem a pohonem extrudéru. Tento díl bude nejnáročnější z pohledu požadavků na přesnost výroby. Protínají se zde jak tolerance rozměru, tak tolerance polohy.



Obrázek 29: Řez oblasti spojení nosné desky, ustavovacího těla a pohonu

Na obr. 29, je zobrazeno ustavovací tělo (fialový díl, 8), ustavené k nosné desce (zelený díl, 2) pomocí šroubových spojů. Kvůli zástavbovým požadavkům, je mezi tyto díly začleněna upevňovací patka (oranžový díl, 5), v obou místech spojení. Současně je ustavovací tělo (fialový díl, 8) vystředěno vůči pohonu (tmavě šedý díl, 6). Ve spodní části je upevněný ložiskový domek (tyrkysový díl, 10), ve kterém je umístěno ložisko a hřídelové těsnění šneku.

Příruba pohonu (modrý díl, 7) je již popsána v kapitole: 3.2.4, z hlediska vrubové únosnosti, viz obr. 23. K těmto, již popsaným vlastnostem, přibývá nárok na osové ustavení mezi pohonem a hřídelovou spojkou. To je zajištěno kruhovými, tvarově i rozměrově tolerovanými, výstupy na obou koncích. Příruba je následně připevněna k pohonu pomocí pěti šroubů o velikosti M4 a k hřídelové spojce pomocí čtyř stavěcích šroubů o velikosti M6, kde jeden z nich dosedá na předem zhotovenou plošku na delším průměru.

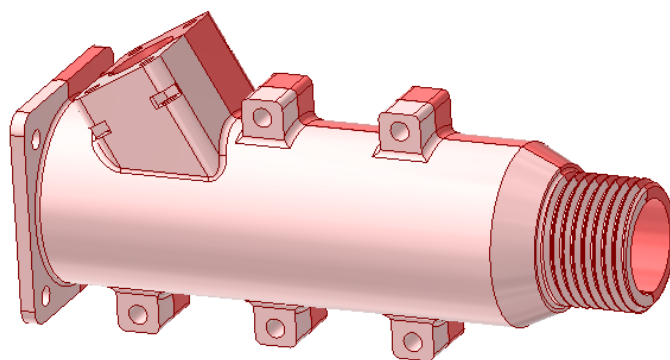


Obrázek 30: Díl – ustavovací tělo

Ve dvou postranních stěnách ustavovacího těla jsou vytvořeny otvory obdélníkového tvaru, viz obr. 30, které slouží k přístupu pro ruční nastavení prokluzu třecí hřídelové spojky, a tak není nutná demontáž žádného z dílů. V jedné z těchto stěn je umístěna drážka, která slouží pro utažení objímky hřídelové spojky při montáži zařízení.

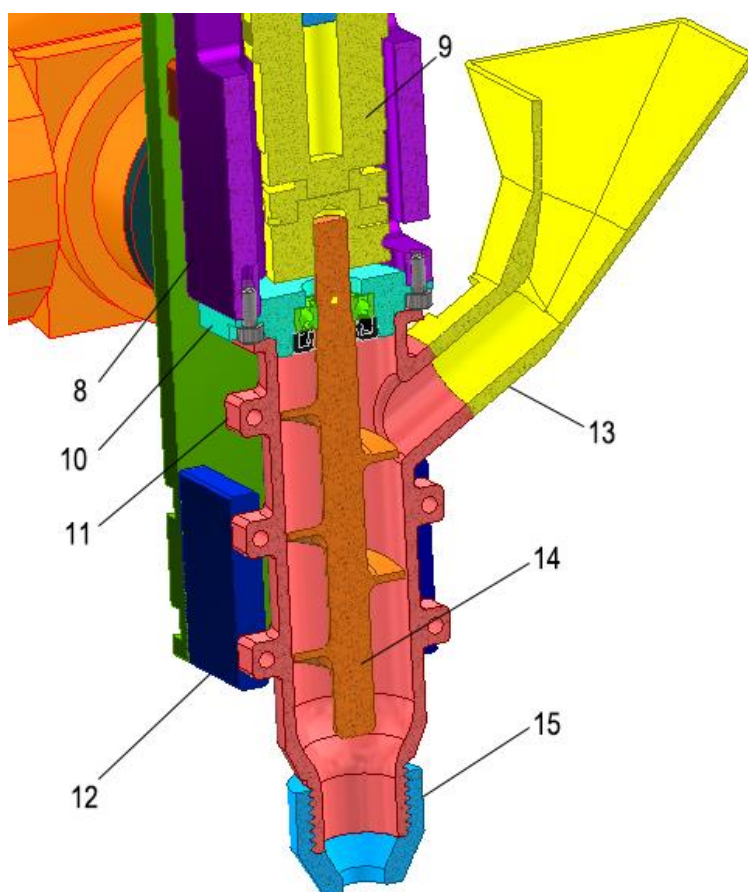
3.3.3 Plášť šneku

Plášť šneku, složený ze dvou polovin, viz obr. 31, je upevněn k ložiskovému domku (tyrkysový díl, 10), viz obr. 29 a současně k nosné desce, pomocí dvou podpěr (modré díly, 12), viz obr. 32, ke kterým je upevněn šrouby o velikosti M5. V pravé části je umístěna násypka (žlutý díl, 13), která je určena pro experimentální potřeby ručního zakládání dávkované hmoty. V případě



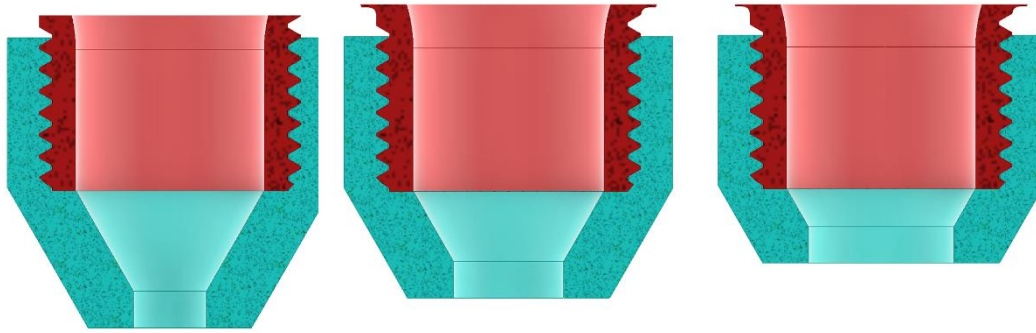
Obrázek 31: Plášť šneku složený ze dvou, na sebe přiléhajících, polovin

dalších inovací, je tuto součást zamýšleno zaměnit za externí kontinuální způsob dopravy. Násypka současně zastává funkci upevnění dvou polovin pláště vůči sobě.



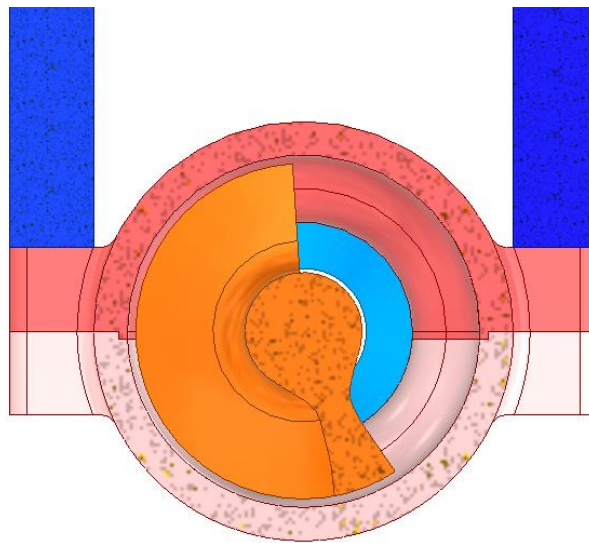
Obrázek 32: Detailní řez oblasti pláště

Výstupním prvkem celého zařízení je tryska (světle modrý díl, 15), viz obr. 32, která udává velikost a hlavně tvar vytlačované hmotě. V této práci je voleno kruhového průřezu s velikostí: 10, 15 a 20 mm, viz obr. 33. Tyto trysky jsou upevněny přes závit k plášti šneku.



Obrázek 33: Trysky s průměry - zleva: 10, 15 a 20 mm

Jak je podrobněji popsáno v kapitole: 2.1, hmota nepříznivě reaguje s ostatními materiály, a tak rozdělením pláště na dva díly dosáhneme jednoduché demontáže a následného čištění. Vzhledem k nízké přesnosti výroby plastových dílů metodou 3D tisku, po obvodu obou na sebe dosedajících polovin, je zkonstruovaný tvarový zámek v podobě přesahu na jedné polovině a drážky na druhé polovině, viz obr 34. Oba díly jsou k sobě upevněny pomocí šroubových spojů o velikosti M5.



Obrázek 34: Tvarový zámek mezi oběma díly pláště

4. Zhodnocení zkonstruovaného zařízení

Zkonstruované zařízení je od počátku vymyšleno pro experimentální účely v rámci katedry školy, které se fyzicky vyrobí a bude se na něm rozvíjet technologie vytlačování křemičité hmoty. Vzhledem k tomu, že zařízení bude pracovat s doposud neprozkoumanou hmotou, je v této práci určité množství neznámých parametrů, které budou rozklíčovány až při samotném experimentu. K těmto faktům je přistupováno tak, že jak na strojních součástech, tak na celém zařízení, je množství bezpečnostních opatření, které snižují riziko neúspěšného provozu. Tato opatření jsou, v konstrukci zařízení, aplikována v podobě naddimenzovaných rozměrů, nebo v podobě nastavitelné třecí spojky, která má za úkol ochránit nejdůležitější díl zařízení – šnek. Celé zařízení je navrhováno s ohledem na snadnou demontáž, jak z pohledu čištění, tak z pohledu zaměnitelnosti součástí. Současně je vhodné, vzhledem k předpokládaným negativním vlastnostem hmoty a samotné metody, volit kvalitní materiály, které obnáší dostatečný zdroj financí. Vzhledem k současné situaci bylo rozhodnuto, po konzultaci s vedoucím práce, že se zpracované podklady využijí pro výrobu zařízení, která proběhne až po odevzdání této práce, v rámci vybraného projektu, který zajistí potřebné finanční pokrytí.

S tím je velmi úzce spjatý výběr materiálů pro konstrukci. Jak je popsáno v kapitole: 2.1, součástí této práce je experiment, který byl zaměřen na vzájemné reakce dávkované hmoty a materiálů, které budou využity pro výrobu zařízení. Zde byla zjištěna negativní reakce s kovovými materiály, a tak součásti, které budou ve styku s dávkovanou/dopřítovanou hmotou, jsou navrženy pro technologii 3D tisku, technologií FDM, z plastového materiálů. Pro plastové díly je volen materiál ABS (akrylonitrilbutadienstyrenu) a pro díly, kde je nárok na tvarovou, nebo rozměrovou přesnost, je voleno hliníkové slitiny AlMg3 (EN AW-5754). Jedinou výjimkou je součást příruby motoru, u které je voleno materiálu ČSN 11 500, vzhledem k požadavku vyšších hodnot mechanických vlastností, k přenosu krouticího momentu od pohonu.

Protože je v této kapitole shrnuto technickoekonomické zhodnocení, je vytvořena tabulka 8, ve které jsou shrnuty náklady nutné pro výrobu výše popsaného zařízení.

Tabulka 8: Shrnutí nákladů potřebných pro výrobu zařízení (s DPH)

Položka	Cena
Třecí spojka	3 120 Kč
Motor (přibližná cena)	48 500 Kč
Ložisko	89 Kč
Hřídelové těsnění	12 Kč
Spojovací materiál	100 Kč
Výroba - kov (odhad)	8 500 Kč
Výroba 3D tisk	7 340 Kč
Montáž	1 250 Kč
Celkem:	68 911 Kč

4.1. Oblasti potenciální inovace

Jak je zmíněno dříve, součásti extrudéru jsou záměrně naddimenzovány, a tak po zjištění reálně potřebných parametrů, pro bezchybný provoz, by se celé zařízení mohlo zmenšit, jak z pohledu rozměrů vyráběných součástí, tak i z pohledu rozměrů mechanických součástí. Těmito součástmi jsou pohon, který je nejnákladnější položkou celého zařízení, viz tabulka 8, a hřídelová spojka.

Z tabulky 8, je viditelné, že další nejvyšší náklady jsou vynaloženy na výrobu plastových a kovových dílů. Jedním z řešení, jak snížit náklady, by mohlo být zjednodušení celého zařízení a s tím spojené snížení počtu součástí.

V případě, že zařízení bude plnit svou funkci, je potenciálním objektem pro inovaci součást násypka, která je určena pouze pro ruční zakládání hmoty v malém množství. Dávkování by, v následujících krocích optimalizace, mohlo být zajišťováno externě kontinuálním způsobem z nádoby, která by mohla být umístěna mimo oblast tisku, a tak by bylo možné tisknout větší objekty bez zásahu obsluhy. Z tohoto důvodu bylo také zvoleno způsobu tiskové hlavy s využitím šneku s teoreticky neomezeným objemem.

Závěr

V této práci je zpracované téma návrhu zařízení pro materiálovou extruzi hmoty vyzkoumané pracovníky na Katedře sklářských strojů a robotiky.

V první kapitole práce je zpracovaná rešerše současné situace v oblasti 3D tisku, jehož očima je na konstruované zařízení pohlíženo. Současně jsou vybrány příbuzné materiály právě námi zpracovávané hmotě, v jejichž spojitosti je následně proveden průzkum již existujících zařízení. Zde je zjištěna zákonitost v metodice vytlačování takovýchto hmot a je vybrán jeden z nich - mechanický způsob. Následně jsou zpracovány koncepční návrhy, ze kterých, na základě předem stanovených vstupních požadavků, je vybrán jeden, který se pro danou problematiku jeví jako nejvhodnější. Vstupními požadavky pro výběr, byla volba konstrukčních materiálů, vzhledem k negativní reakci dávkované hmoty s ostatními materiály, způsob dopravy materiálu do hlavice – objemově omezený/neomezený zásobník hmoty, nároky na přesnost výroby a s tím spojené náklady a v poslední řadě nároky na aktuální stav hmoty v hlavici – nutnost drobného promíchání.

Vybraný koncepční návrh je zpracován v další kapitole, kterou je konstrukce zařízení. Zde je zkonstruováno zařízení, které je upevněno k manipulační jednotce. Pomocí rotačního pohonu, je přes hřídelovou spojku s třecím prokluzem zajištěn přenos krouticího momentu do místa vytlačování hmoty – tiskové hlavy. V této oblasti se nachází šnek, který zajišťuje lineární dopravu materiálu skrze trysku, která na úplném konci zařízení tvaruje hmotu do finální podoby a vytváří, tzv. výtlak, který je následně, jako u běžného 3D tisku, pokládán ve vrstvách do požadovaného komplexního tvaru - výrobku. Hmota je do hlavice dávkována z vnějšku, bočním vstupem. V této oblasti se nachází ústí, ke kterému je v této práci připevněna násypka, u které je v dalších krocích optimalizace záměr záměny, za kontinuální způsob dávkování. Výstupem z této kapitoly je kompletní technická dokumentace, pro výrobu navrhovaného zařízení.

V posledním kroku práce je zhodnocena celá konstrukční část práce z hlediska výroby, financí a případných optimalizací, které jsou očekávány po experimentálním odzkoušení zařízení.

Seznam zdrojů

- [1] X. W. G. K. Z. Q. M. a. W. S. Yuanyuan Xu, „The Boom in 3D-Printed Sensor Technology,“ 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17051166>.
- [2] Z. L. J. L. C. L. C. L. Y. F. C. L. Y. L. P. W. a. Y. H. HEN Z., „3D printing of ceramics: A review,“ *Journal of the European Ceramic Society* 39, pp. 661-687, 2019.
- [3] I. 52900:2015(en), „Additive manufacturing — General principles — Terminology,“ [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en:term:2.1.3>.
- [4] I. E. P. Stratasys, „HIGH TEMPERATURE MODELING APPARATUS“. MN (US) Patent US 6,722,872 B1, 20 08 2004.
- [5] C. Barnatt, „ExplainingTheFuture.com: 3D Printing – The Next Industrial Revolution,“ [Online]. Available: https://www.explainingthefuture.com/3dp_chapter1.pdf. [Přístup získán 01 2023].
- [6] K. J. S. Whyman, „Design and development of an extrusion system for 3D printing,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1843-y>, 96:3417–3428, 2018.
- [7] N. T. H. S. P. G. L. Weisensel, „Laminated Object Manufacturing (LOM) of SiSiC Composites,“ *Advanced Engineering Materials Volume 6, Issue 11*, pp. 899 - 903, ISSN1438-1656. Dostupné z <https://doi.org/10.1002/adem.200400112>, 2004.
- [8] P. J. C. A.-L. A. W. B. A. G. Iria Seoane-Viaño, „Semi-solid extrusion 3D printing in drug delivery and biomedicine: Personalised solutions for healthcare challenges,“ *Journal of Controlled Release* 332, pp. 367-389, <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.02.027>, 27 02 2021.
- [9] H. A. C. Carlos F. Revelo, „3D printing of kaolinite clay ceramics using the Direct Ink Writing (DIW),“ *Ceramics International*, pp. 5673-5682, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.219>, 2018.
- [10] W. LEAL DE SILVA, „3D Concrete Printing -Technological issues in concrete mix design and extrusion,“ Danish technological institute, 2017.
- [11] Z. W. J. G. A. J. Sun, „A Review on 3D Printing for Customized Food,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915010574>. [Přístup získán 01 2023].
- [12] B. J. Haluška, „Návrh konstrukčního řešení 3D tiskárny pro tisk bio gelu,“ Technická univerzita v Liberci, Liberec: Diplomová práce, 2019.
- [13] G. K. W. G. I. h. P. M. Ferris CJ, „Biofabrication: an overview of the approaches used for printing,“ *Applied Microbiology and Biotechnology*, pp. 97:4243–4258, ISSN 0175-7598. Dostupné z: [doi:10.1007/s00253-013-4853-6](https://doi.org/10.1007/s00253-013-4853-6), 2013.

- [14] K. K. M. M. D. a. I. T. O. Monika Hospodiuk, „Extrusion-Based Biofabrication in Tissue Engineering and Regenerative Medicine,“ *3D Printing and Biofabrication*, pp. 255-281, DOI: 10.1007/978-3-319-45444-3_10, 29 5 2018.
- [15] M. H. Ibrahim T. Ozbolat, „Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting,“ *Biomaterials* 76, pp. 321-343, <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.10.076>, 31 10 2015.
- [16] T. J. H. A. W. F. Kira Pusch, „Large volume syringe pump extruder for desktop 3D printers,“ *HardwareX* 3, pp. 49-61, <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.02.001>, 2018.
- [17] J. Svatý, „Úprava prototypu 3D tiskárny pro tisk z čokoládových hmot,“ Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2020, Bakalářská práce.
- [18] M. Z. B. B. Chao-Fan Guo, „A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation,“ *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 397-404, Volume 162, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.032>, 2019.
- [19] M. Volk, *Pump Characteristics and Applications*, Third Edition, ISBN: 9781466563087, 1466563087, Taylor & Francis, 2013.
- [20] R. W. Z. A. a. T. S. Freek Bos, „Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing,“ *VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING*, VOL 11, NO. 3, pp. 209-225, <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>, 07 2016.
- [21] W. R. L. d. Silva, „Teknologisk Institut,“ 12 2018. [Online]. Available: <https://www.dti.dk/projects/3d-printed-buildings/36993>. [Přístup získán 09 02 2023].
- [22] B. J. Slavíček, „Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk betonových směsí, Diplomová práce,“ Vysoké učení technické v Brně, Brno, Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/200862>., 2020.
- [23] O. C. VIA ALTA a. s., „Tisková hlava s rotací trysky pro 3D tisk“. ČR Patent 34 847, 23 02 2021.
- [24] B. K. Dooil Hwang, „Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting,“ *University of Southern California, Los Angeles, CA 90089*, p. <https://doi.org/10.22260/ISARC2004/0057>, 2004.
- [25] F. a. K. J. DRAŽAN, *Manipulace s materiálem*, Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979. Česká matice technická, č. spisu 351, roč. 84 (1979).
- [26] M. Sordyl, „VERTIKÁLNÍ ŠNEKOVÝ DOPRAVNÍK,“ Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2017, Bakalářská práce.
- [27] T. D. O. P. 2.-2. Elektromobilita, „tgdrives.cz,“ omegadesign, 2006-2023. [Online]. Available: <https://www.tgdrives.cz/prevodovky-a-linearni-jednotky/rotacni-aktuatory-drivespin/>. [Přístup získán 12 05 2023].

- [28] HUCO, „huco.com,“ Regal Rexnord, 2023. [Online]. Available: <https://www.huco.com/shop/couplings/miniature-friction-clutches/269-48>. [Přístup získán 12 05 2023].
- [29] J. a. L. Č. JÁGROVÁ, *Dynamická únosnost a životnost*, Liberec: Technická univerzita v Liberci: ISBN 978-80-7494-366-9, 2017.
- [30] V. P. LEINVÉBER Jan, *Strojírenské tabulky, Úvaly*: Albra, ISBN 80-7361-011-6, 2005.
- [31] S. H. S. N. J. R. B. Dolenská, „Pevnost materiálů PLA a PETG vytištěných na 3D tiskárně,“ FJFI ČVUT, Trojanova 13, Praha 2, 120 00.
- [32] I. J. Rozbroj, „Simulace (DEM) pohybu partikulární hmoty ve šnekovém dopravníku v aplikaci na konstrukci svislého šneku,“ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Disertační práce, Ostrava, 2013.
- [33] „skf.com/cz,“ SKF, 2023. [Online]. Available: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-6001-2RSH>. [Přístup získán 15 05 15].
- [34] M. V. B. V. Hotař, „Present state of 3D printing from glass,“ v *Pure Appl. Chem.*, Liberec, 2021.
- [35] S. R. M. K. X. X. DERAKHSHANFAR, *3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering: A review of recent trends and advances*, Winnipeg: Bioactive Materials, ISSN: 2452-199X, 2018.
- [36] L. R. I. A. D. M. d. M. E. a. M. D. Mariano Jiménez, „Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D,“ *Hindawi Complexity*, p. ID 9656938, 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.
- [37] S.-K. K. S.-J. H. J.-Y. K. D.-G. S. Gang-Seok Park, „Effects of Printing Parameters on the Fit of Implant-Supported 3D Printing Resin Prosthetics,“ *Materials*, pp. 12(16), 2533, 2019, <https://doi.org/10.3390/ma12162533>.
- [38] I. J. Šplíchal, „Technický týdeník,“ Business Media CZ s.r.o, 2020. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/3d-tisk-kovovych-materialu_50018.html. [Přístup získán 24 1 2023].
- [39] J. Kopečný, „TradeCZ,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.tradecz.cz/3d-tisk-40-let-stara-technologie-s-pozornosti-v-poslednim-desetileti-investice-do-3d-tisku/>. [Přístup získán 24 01 2023].
- [40] HUBS, „3D HUBS B.V.,“ 2023. [Online]. Available: www.shorturl.at/euXZ3. [Přístup získán 8.2.2023].
- [41] B. V. Růžička, „Návrh konstrukce 3D tiskárny pro uplatnění v oblasti gastronomie, Diplomová práce,“ Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2016.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Jednotlivé aditivní technologie, spolu s jejich zástupci. [40]	14
Obrázek 2: Funkční diagram způsobu materiálové extruze chalkogenidového skla formou 3D tisku [34]	15
Obrázek 3: Základní konstrukční rozdělení pro využití technologie SSE v 3D tisku: A) Pneumatická extruze: A1) bez ventilu, A2) s ventilem, B) Mechanická extruze: B1) pístová, B2) s využitím závitové tyče, C) Solenoidová extruze [8].....	17
Obrázek 4: 3D CAD model tiskové hlavy LVE pro velké zdvihy, využívající mechanickou extruzi [17]	18
Obrázek 5: Model sestavy tiskové hlavy, s využitím závitové tyče jako pohonu plunžru [12]	19
Obrázek 6: a) 3D tiskárna, b) detail vytláčovacího systému [9]	19
Obrázek 7: Vřetenové čerpadlo s excentrickým šnekovým rotorem navrhnutém pro vytlačování čokoládové hmoty, 1) Pryžový stator, 2)Excentrický šnekový rotor, 3)Vyhřívaná komora, 4)Kloubový mechanismus, 5)Hřídelová spojka, 6)Násypka [41]	20
Obrázek 8: Pasivní tisková hlavice s tryskou. V pravé části je přívodní dávkovací hadice [20]	21
Obrázek 9: Aktivní tisková hlava s využitím šnekového podavače a rotační tryskou [22]	21
Obrázek 10: Kroucení cementového filamentu bez využití otočné trysky [20].....	22
Obrázek 11: Mechanismus pro tisk cementových směsí metodou Contour Crafting, za využití plunžru poháněného elektromotorem prostřednictvím závitové tyče [24].....	23
Obrázek 12: Ukázka experimentu přilnavosti směsi k materiálu.....	23
Obrázek 13: Vzorek korozivzdorné ocele	24
Obrázek 14: Princip s využitím závitové tyče. 1) Vytlačovací tryska, 2) Základový rám s objímkami pro upnutí, 3) Vytlačovací hlava, 4) Vytlačovací plunžr, 5) Jezdec, 6) Ložisko uchycení závitové tyče, 7) Závitová tyč, 8) Hřídel od pohonu, 9) Matice.....	25
Obrázek 15: Princip s využitím šnekového podavače. 1) Vytlačovací tryska, 2) Tělo hlavice, 3) Šnekový podavač (šnek), 4) Ložiska uložení šneku, 5) Hřídel pohonu, 6) Oblast plnění hlavice	27
Obrázek 16: Zvolený pohon extrudéru DS50 od firmy TG DRIVE [27]	30
Obrázek 17: Třecí hřídelová spojka HUCO 269.48.3535 [28]	31
Obrázek 18: Součinitel tvaru vrubu [29].....	32
Obrázek 19: Součinitel vrubové citlivosti [29]	33
Obrázek 20: Součinitel vlivu jakosti povrchu [29]	34
Obrázek 21: Součinitel velikosti [29].....	34
Obrázek 22: Volený zápich pro přírubu motoru [30].....	35
Obrázek 23: Příruba motoru	36
Obrázek 24: Sestava spojky, ložiska a šneku s vyobrazením nákresu nosníku	36
Obrázek 25: Průběh momentu skutečného nosníku vlevo, náhradní nosník podle Mohrovy metody napravo	37
Obrázek 26: Silový rozklad působení dávkované hmoty na součást šneku, odvozeno z literatury [32]	39
Obrázek 27: Tabulka pro určení hodnot koeficientů dynamického zatížení [30]	42
Obrázek 28: Řez oblasti upevnění nosné desky k přírubě robotu	43

Obrázek 29: Řez oblasti spojení nosné desky, ustavovacího těla a pohonu	44
Obrázek 30: Díl – ustavovací tělo	45
Obrázek 31: Plášť šneku složený ze dvou, na sebe přiléhajících, polovin.....	46
Obrázek 32: Detailní řez oblasti pláště	46
Obrázek 33: Trysky s průměry - zleva: 10, 15 a 20 mm.....	47
Obrázek 34: Tvarový zámek mezi oběma díly pláště	47

Seznam tabulek

Tabulka 1: Volené vstupní parametry výpočtu	28
Tabulka 2: Základní parametry pohonu DS50 [27]	30
Tabulka 3: Základní parametry hřídelové spojky 269.48.3535 [28].....	30
Tabulka 4: Vstupní hodnoty pro výpočet vrubového napětí	32
Tabulka 5: Vstupní parametry výpočtu	37
Tabulka 6: Vstupní hodnoty pro výpočet axiálního zatížení.....	40
Tabulka 7: Technické parametry ložiska SKF 6001 2RSH [33].....	41
Tabulka 8: Shrnutí nákladů potřebných pro výrobu zařízení (s DPH).....	49

Seznam příloh

Příloha 1 – Výkres - 1-DP S21000249-0-0
Příloha 2 – Výkres - 2-DP S21000249-0-05
Příloha 3 – Výkres - 3-DP S21000249-0-02
Příloha 4 – Výkres - 3-DP S21000249-0-03
Příloha 5 – Výkres - 3-DP S21000249-0-09
Příloha 6 – Výkres - 3-DP S21000249-0-10
Příloha 7 – Výkres - 3-DP S21000249-0-12
Příloha 8 – Výkres - 4-DP S21000249-0-01
Příloha 9 – Výkres - 4-DP S21000249-0-04
Příloha 10 – Výkres - 4-DP S21000249-0-06
Příloha 11 – Výkres - 4-DP S21000249-0-07
Příloha 12 – Výkres - 4-DP S21000249-0-08
Příloha 13 – Výkres - 4-DP S21000249-0-11