



Diplomová práce

Vývoj konstrukce nanášecí hlavy pro 3D tisk ve stavebnictví

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Ondřej Louda

Vedoucí práce:

Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Vývoj konstrukce nanášecí hlavy pro 3D tisk ve stavebnictví

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Ondřej Louda
<i>Osobní číslo:</i>	S21000240
<i>Studijní program:</i>	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra výrobních systémů a automatizace
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Hlavním cílem je vývoj konstrukce nanášecí hlavy, která bude umístěna na konci robotického ramena Printing Mantis. Úkolem této hlavy je nanášet betonovou (či jinou) stavební hmotu po jednotlivých vrstvách a tak vytvářet objekt. Funkce a parametry hlavy budou vycházet z materiálových potřeb (potřeba přidávání aditiv přímo v hlavě, míchání směsi v hlavě, řízení teploty ...) a z potřeb samotného procesu stavby (řízení množství průtoku, uzavírání toku, hlazení a tvarování nanášené vrstvy, přidávání výztuže ...).

Pro vývoj konstrukce budou aplikovány moderní metody návrhu či inovace výrobků (např. TRIZ, aditivní technologie ...).

1. Rešerše existujících řešení.
2. Seznámení se s projektem 3D STAR a jeho výstupy.
3. Definování parametrů nanášecí hlavy, možné nastavby.
4. Návrh několika konceptů.
5. Rozpracování vybraného konceptu do konstrukčního návrhu.
6. Vypracování potřebné dokumentace pro výrobu.
7. Vypracování podkladů pro odborný článek.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 60 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

1. PERROT, Arnaud, ed. 3D printing of concrete: state of the art and challenges of the digital construction revolution. London: ISTE, 2019. Civil engineering and geomechanics series. ISBN 978-1-78630-341-7.
2. SANJAYAN, Jay G., Ali NAZARI a Behzad NEMATOLLAHI, ed. 3D concrete printing technology: construction and building applications. Oxford: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, [2019]. ISBN 978-0-12-815481-6.
3. Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing : state of the industry. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, [2019]. ISBN 978-0-9913332-5-7.
4. Portál 3D Printing Industry [online], dostupné: <https://3dprintingindustry.com/>
5. Portál 3D Printing Media Network [online], dostupné: <https://www.3dprintingmedia.network/>
6. SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE, R. G. BUDYNAS, M. HARTL a M. VLK. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
7. LEINVEBER, J. a P. VÁVRA. Strojnické tabulky. Praha: Albra, 2011. 927s. ISBN 978-80-7361-081-4.

Vedoucí práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání práce: 20. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 20. května 2024

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

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 20. 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.

Název práce

Vývoj konstrukce nanášecí hlavy pro 3D tisk ve stavebnictví

Anotace česky

Tato diplomová práce se zabývá vývojem nanášecí hlavy pro zpracování stavebních směsí prostřednictvím aditivních technologií. V úvodní části práce je představen vědeckovýzkumný projekt, na který tato diplomová práce navazuje. Teoretická část práce se zaměřuje na rešerši a popis technologie Contour Crafting a možnosti její aplikovatelnosti. Dále byla v rámci rešerše nalezena možná technická řešení nanášecích hlav včetně jejich příslušenství. Praktická část se zaměřuje na vyhledání a volbu nejvhodnějšího konceptu řešení pro zadanou aplikaci. Vybraný koncept byl následně rozpracován do podoby konstrukčního návrhu. Výstupem z této práce je pak kompletní technická dokumentace pro výrobu funkčního prototypu navržené nanášecí hlavy.

Klíčová slova

Nanášecí hlava, aditivní technologie, 3D tisk, Contour Crafting, beton, vytlačovací hlava, tisková hlava, extrudér, šnekový dopravník

Title

Development of a printing head design for 3D printing in the construction industry

Annotation

This thesis deals with the development of a print head for the processing of construction mixtures by additive technologies. In the introductory part of the thesis, the scientific research project on which this thesis is based is presented. The theoretical part of the thesis focuses on the research and description of the Contour Crafting technology and its applicability. Furthermore, possible technical solutions of print heads including their accessories were found within the framework of the research. The practical part focuses on finding and selecting the most suitable solution concept for the given application. The selected concept was subsequently developed into a structural design. The output of this thesis is then a complete technical documentation for the production of a functional prototype of the designed print head.

Keywords

Print head, additive manufacturing, 3D printing, Contour Crafting, concrete, extruding head, extruder, screw conveyor

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu této práce, panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D. za jeho velmi laskavý přístup, nápomoc při řešení jednotlivých částí práce na pravidelných konzultacích a za celkové vedení diplomové práce.

Další poděkování pak patří panu Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. za konzultace navržených řešení, analýzu jejich vyrobiteľnosti, smontovatelnosti a připomínky při vypracování technické dokumentace.

Veliké poděkování pak patří těm, kteří mě podporovali v průběhu celého studia. V první řadě tak děkuji rodině za plnou podporu a vytvoření vhodných podmínek pro studium. Dále pak děkuji přátelům, kamarádům a kolegům, a to zejména za psychickou podporu.

Obsah

1.	Úvod	12
2.	Cíle práce.....	13
3.	Teoretická část.....	14
3.1.	Seznámení s projektem 3D STAR.....	14
3.2.	Technologie 3D tisku metodou vytlačování CC (Contour Crafting)	15
3.3.	Materiály používané pro 3D tisk ve stavebnictví.....	17
3.4.	Zařízení pro 3D tisk.....	18
3.4.1.	Průmyslové roboty	18
3.4.2.	Tisková zařízení v kartézském souřadném systému	20
3.4.3.	Tisková zařízení v cylindrickém souřadném systému	21
3.4.4.	Tisková zařízení v systému delta.....	21
3.4.5.	Další možné kinematické struktury	22
3.4.6.	Testovací zařízení TestBed	23
3.4.7.	Testovací zařízení Printing Mantis	24
3.5.	Nanášecí hlavy pro metodu CC	25
3.5.1.	Pístová nanášecí hlava.....	27
3.5.2.	Nanášecí hlava s vřetenovým čerpadlem.....	28
3.5.3.	Pasivní nanášecí hlava	30
3.5.4.	Šneková nanášecí hlava.....	31
3.5.5.	Příslušenství a další funkce nanášecích hlav	32
4.	Volba konceptu řešení.....	35
4.1.	Definování parametrů navrhované nanášecí hlavy.....	35
4.2.	Volba nejvhodnějšího konceptu.....	35
5.	Konstrukční návrh šnekové hlavy	38
5.1.	Konstrukční zásady a přístupy zohledněné při návrhu nanášecí hlavy	38
5.2.	Základní uspořádání šnekové hlavy.....	39
5.3.	Pohon šnekové hlavy.....	41

5.4.	Návrh šneku.....	43
5.4.1.	Návrh rozměrů šneku	43
5.4.2.	Výpočet axiální síly na šneku.....	47
5.4.3.	Volba provedení vřetena šneku.....	49
5.4.4.	Návrh hřídele šneku	51
5.5.	Návrh spojky mezi hřídelí šneku a spojovacím hřídelem	52
5.5.1.	Výpočet kolíkové spojky	53
5.6.	Návrh ložiskového domku	55
5.6.1.	Kontrol únosnosti ložisek	57
5.6.2.	Návrh spojovacího hřídele.....	58
5.6.3.	Spojka mezi spojovacím hřídelem a převodovkou	60
5.7.	Návrh pracovní části hlavy.....	61
5.7.1.	Vstup materiálu do pracovní části	63
5.7.2.	Systém uchycení trysek	64
5.7.3.	Vstřikování urychlovačů tuhnutí.....	65
5.7.4.	Rychloupínací systém	66
5.8.	Výsledný návrh	67
5.8.1.	Hmotnostní bilance navržené hlavy	68
6.	Diskuze navrženého řešení a naplnění cílů práce.....	70
7.	Závěr.....	71

Seznam zkratk a symbolů

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	Computer aided design (počítačem podporované kreslení)
CNC	Computer Numerical Control (Počítačové číslicové řízení)
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
HMH	Huber, von Mises, Hencky (pevnostní hypotéza)
PA	Polyamid
PMMA	Polymethylmethakrylát
a	[mm] Výška pera
D	[mm] Vnější průměr kolíkové spojky
d	[mm] Průměr hřídele
D_1	[mm] Vnitřní průměr kolíkové spojky (hřídele)
d_k	[mm] Průměr kolíku
D_{ξ}	[mm] Zvolený průměr šnekovnice
$D_{\xi \min}$	[mm] Minimální průměr šnekovnice
d_{tr}	[mm] Maximální uvažovaný průměr trysky
d_v	[mm] Vnitřní průměr pracovního válce
F_a	[N] Axiální síla na šneku
F_k	[N] Výsledná síla působící na kolík
$F_{k \max}$	[N] Maximální dvoustřížná síla na kolíku
F_r	[N] Radiální složka zatížení
F_{tSP}	[N] Obvodová síla na vnitřním průměru spojky
h	[mm] Výška jedné tištěné vrstvy
C_H	[-] Součinitel sklonu šneku
C	[N] Dynamická únosnost ložiska
i_p	[-] Převodové číslo převodovky
k	[-] Koeficient bezpečnosti
L_h	[hod] Trvanlivost ložiska
l_n	[mm] Délka vstupní části nástavce
$l_{p \min}$	[mm] Minimální délka pera
l_v	[mm] Délka pracovního válce po vstupní nástavec
m_c	[kg] Celková provozní hmotnost nanášecí hlavy
m_{hl}	[kg] Hmotnost prázdné nanášecí hlavy
M_{km}	[Nm] Maximální krouticí moment motoru
$M_{kš}$	[Nm] Krouticí moment na šneku

m_{sme}	[kg]	Hmotnost směsi v hlavě
n_m	[min ⁻¹]	Maximální otáčky motoru
n_{ξ}	[min ⁻¹]	Otáčky šneku
P	[N]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska
p	[-]	Exponent rovnice trvanlivosti
p_1	[MPa]	Tlak mezi nábojem spojky a kolíkem
Q_v	[m ³ s ⁻¹]	Maximální objemový průtok tryskou
R_e	[MPa]	Mez kluzu oceli v tahu
R_{es}	[MPa]	Mez kluzu oceli ve smyku
R_s	[mm]	Účinný poloměr šnekovnice
s	[mm]	Rozměr šestihranu
S	[m ²]	Plocha průřezu pracovního válce
S_0	[m ²]	Plocha průřezu zaplněného materiálu
S_{tr}	[m ²]	Plocha průřezu trysky
v_f	[mm s ⁻¹]	Požadovaná rychlost tisku
V_{sm1}	[m ³]	Objem směsi v pracovním válci
V_{sm2}	[m ³]	Objem směsi ve vstupní části nástavce
V_{sm3}	[m ³]	Objem směsi v zásobníku
W_k	[m ³]	Modul průřezu v krutu
W_s	[m ³]	Modul průřezu svaru
W_{kP}	[m ³]	Modul průřezu v krutu pro hřídel s drážkou
γ	[°]	Úhel stoupání šroubovice
ρ_{sme}	[kg m ⁻³]	Hustota betonu
σ_{ekv}	[MPa]	Ekvivalentní napětí dle HMH
$\tau_{ }$	[MPa]	Smykové napětí rovnoběžné s osou svaru
τ_k	[MPa]	Napětí v krutu
τ_{kk}	[MPa]	Napětí v krutu v hřídeli v místě kolíku
τ_{kP}	[MPa]	Napětí v krutu v hřídeli pod drážkou pro pero
φ	[°]	Třecí úhel
ψ	[-]	Součinitel plnění

1. Úvod

V současné době automatizace rapidně proniká do všech odvětví průmyslu, ale i mimo něj. Nynější stav technického vývoje tak umožňuje automatizovat téměř jakýkoliv výrobní i nevýrobní proces v zájmu úspory času, lidské pracovní síly při současném nárůstu produktivity práce a zachování nebo i zvýšení kvality výrobního procesu. Jedním z odvětví, kde si ale automatizace teprve hledá svou pozici je stavebnictví. V posledních letech se obecně ve stavebnictví začíná významně projevovat nedostatek pracovních sil. K tomu nenapomáhá ani skutečnost, že práce ve stavebnictví bývá obvykle fyzicky velice náročná a z dlouhodobého hlediska velice namáhavá. Z tohoto důvodu se snahy o zvýšení stupně automatizace v tomto oboru jeví jako možné východisko řešení problémů, které tento obor v posledních letech nejvíce zasahují.

Jednou z možností automatizace ve stavebnictví je využití některé z moderních technologií výroby například 3D tisku. Tato diplomová práce navazuje na vědeckovýzkumný projekt 3D STAR, který se právě možnostmi 3D tisku ve stavebnictví a architektuře zabývá. Jedním z dílčích cílů tohoto projektu je návrh tiskového zařízení pro 3D tisk stavebních směsí. Tato práce se podílí na návrhu části jednoho z vyvíjených zařízení, konkrétně návrhem nanášecí hlavy pro zpracování a extruzi stavebních směsí. Samotný návrh bude proveden po předchozím prozkoumání aktuálně využívaných řešení, zhodnocení současného stavu a nejmodernějších trendů právě v tomto odvětví a následném vyhodnocení nejvhodnějšího řešení pro daný případ. Součástí práce je pak dále konstrukční návrh zvoleného nejvhodnějšího řešení.

2. Cíle práce

Tato práce si klade za cíl navrhnout nanášecí hlavu pro 3D tisk stavebních směsí. Nanášecí hlava by měla být součástí již vyvinutého tiskového zařízení. Vzhledem k této okolnosti tak bude muset navržená konstrukce hlavy svou konstrukcí odpovídat parametrům navrženého tiskového zařízení. Z tohoto důvodu bude na samém počátku rešerše provedeno seznámení s vědeckovýzkumným projektem v rámci kterého dané tiskové zařízení vznikalo, aby bylo možné konstrukční návrh hlavy přizpůsobit okolnostem, za kterých bude vznikat funkční prototyp. Dílčími cíli této práce je pak rešerše existujících řešení nanášecích hlav a jejich příslušenství a následné posouzení výhod a nevýhod jednotlivých nalezených řešení (konceptů). Dalším cílem je volba nejvhodnějšího konceptu pro zadanou aplikaci. Zvolený koncept pak bude rozpracován do podoby konstrukčního návrhu. Výstupem celého navrženého řešení bude ucelená technická dokumentace (3D případně 2D), která bude sloužit jako kompletní podklady pro výrobu prototypu navržené nanášecí hlavy. Jako další dílčí cíl této práce, vyplývající ze zadání diplomové práce, je vypracování podkladů pro odborný článek.

3. Teoretická část

Teoretická část práce se v úvodní části zabývá seznámením s vědeckovýzkumným projektem, na který tato diplomová práce navazuje. Dále je zde popsána problematika 3D tisku v oblasti stavebnictví. Jsou zde rozebrány technologické možnosti metody Contour Crafting, a to jak z pohledu samotné technologie, tak i používaných materiálů. Současně jsou zde popsána i různá řešení samotných zařízení pro 3D tisk. Podrobněji se pak teoretická část práce zaměřuje na provedení nanášecích hlav. V obou případech jsou pak uvedeny příklady aplikací zmíněných řešení u firem nebo projektů, které se zabývají problematikou 3D tisku v oblasti stavebnictví nebo architektury.

3.1. Seznámení s projektem 3D STAR

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tato práce navazuje na vědeckovýzkumný projekt 3D STAR, který byl řešen na katedře výrobních systémů a automatizace Technické univerzity v Liberci v kooperaci s Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze. Samotná zkratka „STAR“ (**STA**věbnictví a **AR**chitektura) odkazuje na výzkumný záměr projektu, který zahrnuje 3D tisk stavebních směsí od architektonických návrhů stavebních prvků, výzkum vhodných stavebních materiálů pro použití technologií 3D tisku až po vývoj testovacích zařízení pro 3D tisk a jejich aplikací ve stavebnictví a architektuře. V rámci tohoto projektu již bylo vyvinuto testovací zařízení *TestBed*, viz Obr. 3.1 vlevo. Toto zařízení bylo vyvinuto za účelem testování nanášecích hlav, jejich příslušenství a technologických parametrů tisku (rychlostí, průtoků materiálů apod.). Jedná se o číslicově řízenou portálovou konstrukci (3D tiskárnu), která pracuje v kartézském souřadném systému a pro kterou již bylo v tomto projektu vyvinuto několik prototypů nanášecích hlav. Jednotlivé instalované nanášecí hlavy využívaly pro svou činnost různé principy vytlačování směsi. Díky tomu tak bylo možné porovnat vhodnost použití jednotlivých technologií pro danou aplikaci. Jako další vyvíjené zařízení v rámci projektu je zařízení *Printing Mantis*, viz Obr. 3.1 vpravo. Jedná se o počítačem řízené robotické rameno pracující v kinematické struktuře typu SCARA rozšířené o jedno rameno. Více technických informací a parametrů k jednotlivým tiskovým zařízením bude uvedeno v kap. 3.4 *Zařízení pro 3D tisk*. Hlavním cílem této práce je návrh nanášecí hlavy právě pro tento typ vyvíjeného zařízení.[1]



Obr. 3.1 Testovací zařízení: TestBed (vlevo), Printing Mantis (vpravo) [2]

3.2. Technologie 3D tisku metodou vytlačování CC (Contour Crafting)

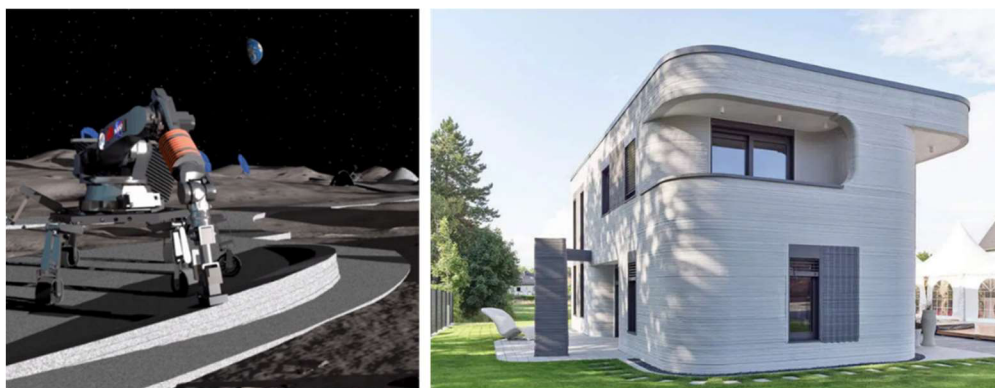
V současné době existuje několik metod 3D tisku cementových směsí. Mezi nejčastěji používané technologie patří technologie vytlačování (anglicky „Contour Crafting“, CC), při které se polotekutá cementová směs nanáší v jednotlivých vrstvách na sebe prostřednictvím nanášecí hlavy. Mezi další metody patří technologie, která využívá např. pomocných forem (bednění) nebo například zpracování betonové směsi ve formě prášku, do kterého je následně vstříkována hydratační tekutina. V této práci je vyvíjena nanášecí hlava pro technologii vytlačování. Dále se tedy bude práce zabývat výhradně technologií vytlačování (CC).[3]

Technologie vytlačování, někdy též označována jako extrudování/depozice, byla vyvinuta na počátku 90. let 20. století a dodnes patří v oblasti 3D tisku ve stavebnictví mezi nejrozšířenější. Při této metodě je polotekutá cementová směs nanášena tryskou podle předem definované dráhy v jednotlivých vrstvách na sebe, viz Obr. 3.2 vlevo. U této technologie je stěžejní, aby mezi jednotlivými vrstvami docházelo ke ztuhnutí betonové směsi dostatečně rychle tak, aby již nanesené vrstvy měly dostatečnou pevnost a dokázaly unést zatížení od vrstev následujících. V opačném případě by mohlo docházet k nežádoucím deformacím tištěného objektu či dokonce k propadům již vytisknutého objektu, viz Obr. 3.2 vpravo.[3]



Obr. 3.2 Ukázka tisku metodou CC (vlevo), ukázka ztráty stability tisknutého objektu (vpravo) [2]

Tato metoda bez problémů umožňuje tisk jednotlivých stavebních nebo architektonických elementů, ale i tisk celých stavebních komplexů (budov, mostů). Výhodou této technologie je také velmi vysoká produktivita a vysoká úspora manuální práce, protože vlastní proces tisku je možné plně automatizovat. Mezi další přednosti této metody patří úspora použitého stavebního materiálu, neboť touto metodou lze vytvářet tenkostěnné stavební struktury. Dále není potřeba dovážet na staveniště žádné stavební prefabrikáty, ale pouze samotné tiskové zařízení a stavební směs (případně suroviny pro její namíchání přímo na staveništi). Díky tomu lze uspořit velké množství energie na dopravu a zpracování prefabrikovaných produktů. Touto metodou lze také vytvářet objekty, které by byly konvenčními „stavebními“ metodami jen velmi těžko realizovatelné. Díky této výhodě tak mohou architekti navrhovat a následně úspěšně realizovat mnohem progresivnější architektonické výtvary, viz Obr. 3.3 vpravo, první vytištěný dům v Německu. S ohledem na velmi vysokou produktivitu a nenáročnost na lidskou manuální práci během procesu samotné výstavby se tato technologie jeví jako velmi vhodná pro případy, kdy je nutné postavit za velmi krátký čas velké množství staveb jako například při přírodních katastrofách. Do budoucna se o této technologii uvažuje jako o vhodné pro vytváření stavebních objektů například na měsíčním povrchu (jako součást kosmických programů zaměřených na kolonizaci Měsíce a dalších vesmírných těles), viz Obr. 3.3 vlevo. Jednak by bylo možné používat tamní dostupné zdroje materiálu (v případě Měsíce horniny regolitu) a dále by výstavba mohla probíhat v plně automatickém režimu. [4]



Obr. 3.3 Vize tisku metodou CC na Měsíci (vlevo) [5], První 3D tištěný dům v Německu (vpravo) [6]

Jak již bylo zmíněno, mezi hlavní nevýhody této technologie patří náchylnost vytvářených objektů k samovolnému zhroucení v důsledku působení gravitace. Tomuto nežádoucímu efektu lze zabránit správnou konzistencí vytlačované směsi, která dokáže dostatečně rychle tuhnout a zvýšit svoji pevnost po vytlačení z trysky. S tím souvisí i zajištění dostatečného času na ztuhnutí směsi v jedné vrstvě před nanesením vrstvy další. To je dáno především rychlostí extruze, rychlostí pohybu stroje a délkou dráhy extruze v jedné tištěné vrstvě. Dalším problémem u této metody je tisk převyšů rovnoběžných se stavební deskou, které je vzhledem k charakteru této technologie v podstatě nemožné vytvářet bez použití zvláštních podpěr.

3.3. Materiály používané pro 3D tisk ve stavebnictví

Jako materiál pro 3D tisk se nejčastěji používají *cementové směsi*. Jak je zřejmé z označení, nejedná se o standardní beton používaný ve stavebnictví. Obecně by se beton dal charakterizovat jako umělé stavivo složené z cementu, hrubého a jemného kameniva a vody.[7] Jako hrubé kamenivo se nejčastěji používá štěrk, jako jemné pak nejčastěji písek. Takový materiál je však pro samotný 3D tisk nevhodný, a to zejména kvůli obsahu hrubého kameniva, které by mohlo zapříčinit ucpávání trysky. Z tohoto důvodu se hrubé kamenivo v případě 3D tisku obvykle vynechává a pro stavební směs se používá pouze směs jemného kameniva, obvykle písku, cementu, vody a dalších přísad (např. plastifikátorů). Na základě výše uvedených vlastností se v případě těchto stavebních směsí hovoří spíše o „*maltách*“, nebo také „*cementových směsí*“. Dalším problémem betonů běžně používaných ve stavebnictví je jejich poměrně dlouhá doba zpracování. Při samotném 3D tisku pak nedochází ke včasnému zatuhnutí vrstvy před nanesením vrstvy další a může tak docházet k deformaci již vytištěného objektu v důsledku působení vlastní tíhy betonové směsi. Pro urychlení tuhnutí nanášené směsi pak mohou být do namíchané cementové směsi přidávány urychlovače tuhnutí, aby vytlačená směs co nejrychleji po vytlačení z trysky zatuhla a nabrala potřebnou pevnost před nanesením vrstvy další. V dnešní době se nejčastěji používají stavební hmoty ve formě prefabrikované suché směsi, která je na staveništi míchána prostřednictvím míchacího zařízení se záměsovou vodou až krátce před zpracováním. V případě použití 3D tisku pro výstavbu větších objektů (např. budov) může být použita i směs vyráběná v betonárnách jako transportbeton, do kterého jsou až v samotném tiskovém zařízení (nanášecí hlavě nebo čerpadle směsi) přimíchávány urychlovače tuhnutí. Pro zlepšení mechanických nebo fyzikálních vlastností je možné přidávat do cementové směsi plniva (např. vyztužující vlákna).[3, 7, 8]

Jako další materiály vhodné pro použití v oblasti 3D tisku ve stavebnictví se jeví geopolymery. Dle prof. Petra Loudy z Technické univerzity v Liberci lze geopolymery charakterizovat jako: „*uměle vyrobené (polymerní) anorganické materiály tvořené směsí lupku (sedimentární horniny) jako základní suroviny s aktivační složkou na bázi hlinito-křemičitanových minerálů a alkalických roztoků*“.[9] Tyto materiály v mnoha ohledech (vzhledově, ale i postupem přípravy) připomínají beton. Oproti betonům ale vynikají mnohem lepšími mechanickými vlastnostmi a vyšší tepelnou odolností. Stejně tak jako v případě cementových směsí mohou být i do geopolymérů přidávána plniva. Je možné použít například pěnový polystyren pro vytvoření tepelně izolační a odlehčené struktury nebo přidání vláken jako vyztuže. Další skupinou materiálů v této oblasti 3D tisku je pak použití keramických směsí.[9]

Většina používaných stavebních směsí se připravuje smícháním předpřipravené suché směsi tzv. premixu s vodou. Pro přípravu lze použít konvenční míchací stroje používané ve stavebnictví. Pro čerpání směsi do nanášecí hlavy lze využít například maltové čerpadlo, viz Obr. 3.4 vpravo. U některých typů nanášecích hlav je pak čerpadlo směsi jediný zdroj energie pro vytlačování směsi. Pro zajištění stálosti konzistence a vlastností stavební směsi pro každou dávku lze použít například automatickou míchací jednotku stavebních směsí. Někdy může být míchací zařízení kombinováno i s dopravním čerpadlem směsi, viz Obr. 3.4 vlevo. Tyto stroje jsou určeny především pro přípravu omítkových směsí a jejich dopravu do místa aplikace. Vzhledem k tomu, že většina stavebních směsí používaných pro 3D tisk svou frakcí i konzistencí připomíná maltu, jeví se použití právě takového zařízení jako výhodné.



Obr. 3.4 Omítačí stroj od firmy m-tech (vlevo)[10], Maltové čerpadlo od firmy ToughTek (vpravo)[11]

3.4. Zařízení pro 3D tisk

Pro 3D tisk stavebních hmot metodou CC může být použito několik typů tiskových zařízení. Tiskové zařízení se obvykle skládá z čerpací a mixážní jednotky pro stavební směs, kinematické struktury pro polohování nanášecí hlavy v prostoru a samotné nanášecí hlavy. V případě testovacího provozu nebo tisku menších objektů nemusí být samotné zařízení vybaveno systémem pro přípravu a čerpání stavební směsi. V takovém případě bývá nanášecí hlava vybavena zásobníkem, do kterého je přidávána již namíchaná stavební směs. Jako kinematické struktury bývají využívány průmyslové roboty nebo jednoúčelová zařízení uzpůsobená přímo pro účely použití ve stavebnictví.

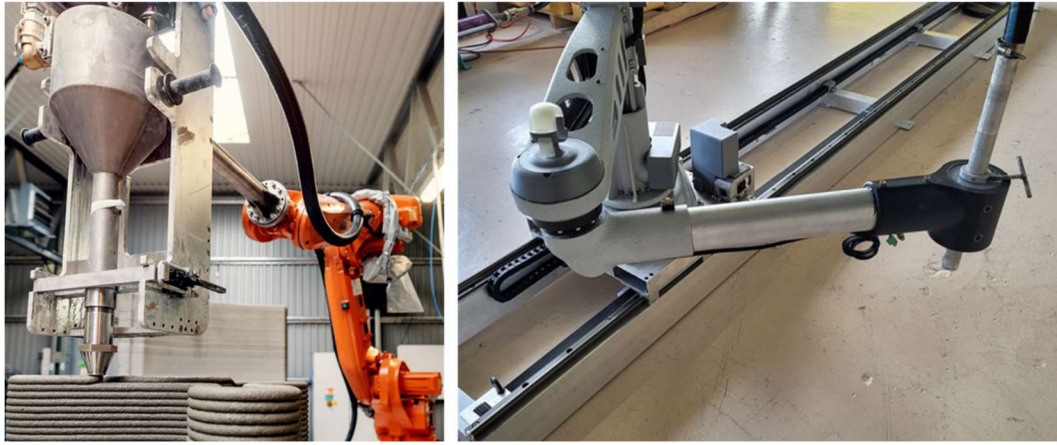
3.4.1. Průmyslové roboty

Průmyslové roboty nacházejí svá uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Vynikají velmi vysokou produktivitou, spolehlivostí, přesností, opakovatelností polohování a flexibilitou použití. Velmi často průmyslové roboty provádějí pohybově náročné operace (lepení, svařování, přesné polohování). Díky těmto vlastnostem je jejich použití pro 3D tisk nasnadě. Jako efektor je v takovém případě na robot nainstalována nanášecí hlava, která je napojena na systém čerpání stavebních hmot.

Možným omezením této aplikace mohou být zhoršené pracovní podmínky (vysoká vlhkost a prašnost, povětrnostní vlivy v případě venkovního použití apod.), které nemusí být pro běžné průmyslové roboty vhodné. Dalším omezením bývá velikost pracovního prostoru robotů, který nemusí být ve stavebnictví vždy dostačující. Tento problém lze vyřešit umístěním robotu na transportér, aby se mohl pohybovat po staveništi a rozšířit tak tím svůj pracovní prostor.

Nejčastěji bývají pro tento účel využívány angulární roboty. Kinematická struktura angulárních robotů se skládá z jedné svislé rotační osy a dvou rovnoběžných vodorovných rotačních os. Výhodou této kinematické struktury je velmi dobrá manévrovatelnost v pracovním prostoru, která např. umožňuje polohování koncového efektoru i v blízkosti samotného stojanu robotu. Další výhodou použití této struktury je, že hlavu lze v pracovním prostoru nejen polohovat, ale i orientovat. To umožňuje v případě 3D tisku i tisk jedné vrstvy mimo jednu tiskovou rovinu. Toho lze s výhodou využít např. pro 3D tisk některých progresivnějších architektonických objektů se složitější geometrií. Velká část projektů 3D tisku ve stavebnictví ve svých začátcích využívala právě angulárních robotů, a to zejména pro jejich všestranné použití a jejich léty prověřenou spolehlivost. V oblasti 3D tisku ve stavebnictví působí například i česká firma ICE Coral, která pro polohování nanášecí hlavy používá právě angulární průmyslové roboty, viz Obr. 3.5 vlevo.

Dalším typem průmyslového robotu, který lze pro 3D tisk použít, je robot typu SCARA. Tato struktura se skládá ze dvou otočných ramen, která jsou připojena na hlavní otočný stojan. Tato dvě ramena svým vzájemným natočením a natočením kolem hlavního stojanu pokrývají rovinný pracovní prostor ve tvaru neúplné kruhové výseče. Posun ve svislé ose „z“ může být realizován posuvem prvního připojeného ramene po otočném stojanu nebo posuvem efektoru na konci ramene druhého. Robot typu SCARA je často využíván pro manipulační, montážní a třídící operace v průmyslu. Většina robotů s touto koncepcí vyniká výhodným poměrem hmotnosti konstrukce vzhledem k velikosti pracovního prostoru. To zaručuje relativně přesné polohování a dobré dynamické vlastnosti celé struktury. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že efektor, resp. nanášecí hlavu lze v prostoru pouze polohovat nikoliv však orientovat. Na principu robotu SCARA funguje například 3D tiskárna *3D Scara Elite v2 Printer* od firmy 3D Potter, viz Obr. 3.5 vpravo.[12]



Obr. 3.5 Zařízení české firmy ICE Coral používající angulárního robota (vlevo)[13],

3D Scara Elite v2 Printer využívající struktury typu SCARA (vpravo)[14]

3.4.2. Tisková zařízení v kartézském souřadném systému

Poměrně často bývají pro 3D tisk ve stavebnictví využívána jednoúčelová zařízení navržená přímo pro tento účel použití. Odpadají tím tak hlavní nevýhody oproti nasazení průmyslových robotů, uvedené v předchozí kapitole. Asi nejčastěji jsou pro tyto účely používány počítačem řízené stroje pracující v kartézském souřadném systému. Kartézský souřadný systém se skládá ze tří na sebe kolmých lineárních os a jeho pracovním prostorem je tak hranol. Mezi hlavní výhody této konstrukce patří zejména vysoká přesnost polohování, která navíc není závislá na místě v pracovním prostoru. Hlavní výhodou tohoto uspořádání je modularita. Vzhledem k tomu, že se takové zařízení dá jednoduše postavit z jednotlivých modulů, je možné samotné tiskové zařízení relativně jednoduše převézt na místo stavby, kde je následně sestaveno. Tohoto principu využívá například u svých tiskových zařízení dánská firma COBOD, viz Obr. 3.6. Celé tiskové zařízení je nejprve po částech převezeno na staveniště, kde je následně smontováno. Po dokončení tisku je poté opět rozebráno a převezeno na další staveniště. Výhodou tak je, že výsledný tisknutý objekt je tištěn přímo na místě určení.[12, 15]



Obr. 3.6 Tiskové zařízení dánské firmy COBOD (vlevo)[16]

3.4.3. Tisková zařízení v cylindrickém souřadném systému

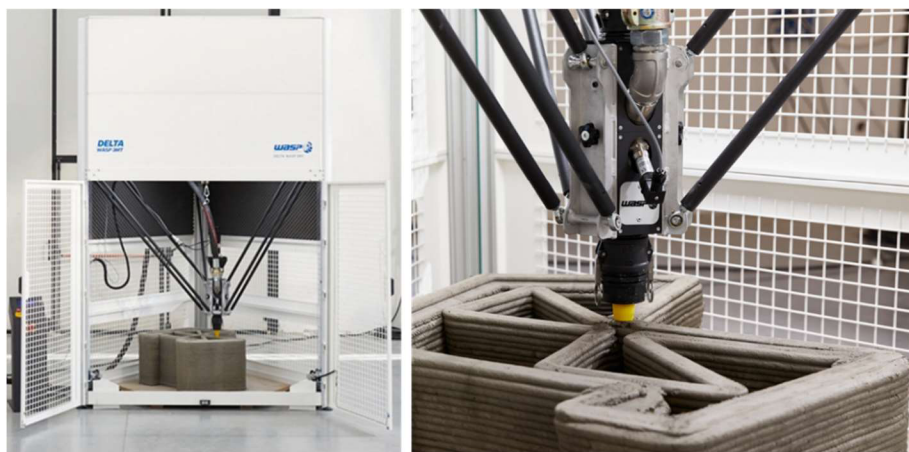
Tento typ zařízení se obvykle skládá ze svislé otočné osy a vodorovného ramene. Rameno se svisle posouvá po otočné ose. Nanášecí hlava se následně ještě posouvá po vodorovném rameni. Výhodou této koncepce je, že ji lze relativně jednoduše realizovat jako modulární. Jako pracovní prostor tohoto zařízení je cylindrický prstenec.[12] Toto kinematické řešení využívají na svých zařízeních například firma WASP (Obr. 3.7 vlevo) nebo firma Apis Cor (Obr. 3.7 vpravo).



Obr. 3.7 Ukázka použití cylindrické kinematické struktury: firma WASP (vlevo) [17], firma Apis Cor (vpravo) [18]

3.4.4. Tisková zařízení v systému delta

Konstrukce typu delta je tvořena soustavou ramen uložených v kloubech, která v prostoru polohují tzv. orientovanou plošinu.[12] Tato koncepce se v průmyslu hojně využívá pro roboty, a to zejména pro své velmi dobré dynamické vlastnosti i při vyšších pohybových rychlostech. Kolem válcového pracovního prostoru jsou umístěny tři svislé stojany. Součástí každého tohoto stojanu je lineární pohybová jednotka. Na jednotlivých suportech pak jsou klouby, ke kterým jsou připojena ramena, která orientují v prostoru orientovanou plošinu. Plošina je pak k ramenům opět připojena prostřednictvím kloubů. Toto uspořádání využívá u svých tiskových zařízení například italská firma WASP, a to jak pro menší tiskárny určených pro tisk jednotlivých stavebních nebo architektonických objektů, viz Obr. 3.8, tak i pro velká tisková zařízení určená pro tisk budov. Výhodou této kinematické struktury je relativně dobrá pohyblivost koncové plošiny. Jako možná nevýhoda se jeví nutnost pevné a dostatečně tuhé sloupové konstrukce. Další nevýhodou této koncepce je vyšší prostorová náročnost nad samotným pracovním prostorem, protože výška sloupů musí být výrazně větší, než je výška pracovního prostoru. Obecně také bývají tyto systémy náročnější na servis, a to hlavně v případě diagnostiky mechanických závad. Například větší vůle v jednom z mnoha kloubů nebo závada na jednom z pohonů naruší pohyblivost celé soustavy, a je tak poměrně náročné diagnostikovat místo vzniku závady.



Obr. 3.8 Ukázka 3D tiskárny Delta WASP 3MT CONCRETE od firmy WASP [19]

3.4.5. Další možné kinematické struktury

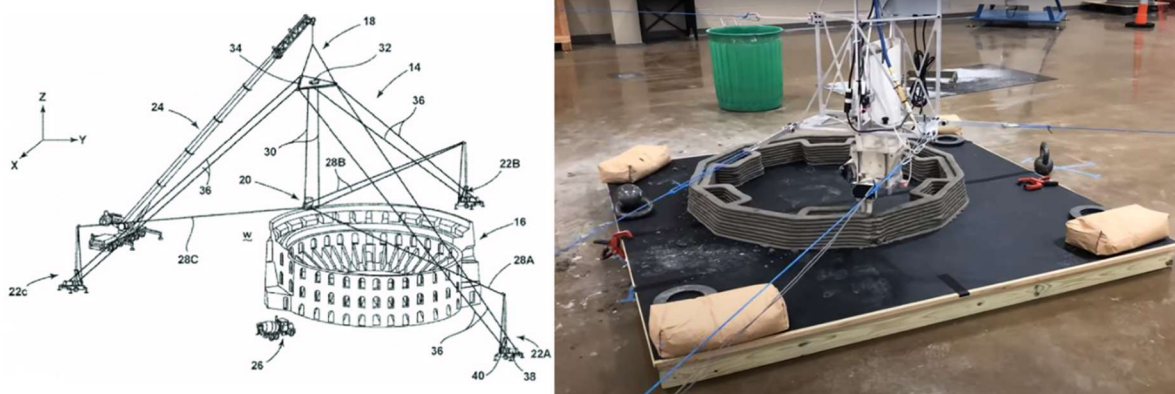
V rámci rešerše existujících tiskových zařízení bylo nalezeno i několik ojedinělých řešení kinematické struktury tiskového zařízení. Například francouzská firma *Construction-3D* využívá pro svá tisková zařízení konstrukci podobnou běžně používaným stavebním strojům jako jsou například bagry. Její tiskové zařízení *MaxiPrinter*, viz Obr. 3.9, je tak tvořeno soustavou ramen ovládaných pomocí hydraulických válců. Tato ramena jsou k základní pojezdové plošině připojena prostřednictvím hydraulicky ovládané svislé otočné osy. Samotná základna je vybavena pojezdovými pásy, díky kterým se zařízení může přepravit na libovolné místo stavby. Během samotného tisku je pak plošina vyzvednuta pomocí hydraulicky ovládaných nohou. Díky tomuto uchycení základní plošiny na staveništi je pak zajištěna stabilita celého zařízení v průběhu tisku.[20]



Obr. 3.9 Tiskové zařízení MaxiPrinter firmy Construction 3D [20, 21]

Další ojedinělé řešení kinematické struktury bylo nalezeno u tiskového zařízení vyvinutého Národními laboratořemi Oak Ridge (ORNL) v USA. Jejich zařízení *SkyBAAM* pracuje na principu paralelního lanového robotu (CDPM). Zařízení se tak skládá pouze z polohované plošiny, která v prostoru nese nanášecí hlavu a soustavy navijáků umístěných kolem pracovního prostoru. Samotná plošina je polohována v pracovním prostoru navijáky pomocí lan, viz Obr. 3.10.[22]

Tento princip bývá v různých modifikacích používán pro polohování lehčích objektů ve velkých pracovních prostorech. Známe je použití například pro polohování kamer na sportovních stadionech. V případě použití tohoto principu ve 3D tisku je toto řešení patentováno pod číslem patentu *US 11230032*. [23] Jako výhoda tohoto uspořádání se jeví absence těžkého a obtížně přepravovatelného zařízení. Nevýhodou pak může být například horší přesnost polohování hlavy v důsledku poddajnosti lan nebo obecně složitější kinematika polohování.



*Obr. 3.10 Ukázka kinematické struktury zařízení SkyBAAM (vlevo)[23],
ukázka nanášecí hlavy téhož zařízení na reálném prototypu (vpravo)[22]*

3.4.6. Testovací zařízení TestBed

Testovací zařízení TestBed je první tiskové zařízení vyvinuté v rámci projektu 3D STAR. Jedná se o stacionární počítačem řízený CNC stroj portálové konstrukce, viz Obr. 3.11, pracující v kartézském souřadném systému. Toto řešení bylo zvoleno zejména pro svou relativně jednoduchou konstrukci, známou kinematiku pohybu a jednoduché řízení. Zařízení TestBed bylo vyvinuto pro potřeby testování nanášecích hlav, technologických podmínek tisku, ale i za účelem testování nově vyvinutých stavebních směsí pro 3D tisk. Velikost pracovního prostoru stroje byla limitována velikostí laboratoře v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze, do které bylo toto zařízení navrženo. V Tab. 1 jsou uvedeny technické parametry zařízení. Je nutné podotknout, že uvedené parametry jsou maximální hodnoty, na které bylo zařízení dimenzováno a kterých by mělo bez problémů při svém provozu dosáhnout. Například při praktických testech tisku ale zatím nebyly maximální hodnoty tiskové rychlosti využity (testováno bylo na cca. 10krát menších rychlostech tisku). Nosnost tohoto zařízení je až 150 kg, což bez problémů umožňuje i instalaci nanášecí hlavy se zásobníkem na stavební směs. Pro zařízení TestBed bylo již vyvinuto několik prototypů nanášecích hlav. Zkušenosti získané tímto vývojem budou využity i při vývoji hlav pro další tiskové zařízení. [24]



Obr. 3.11 zařízení TestBed [2]

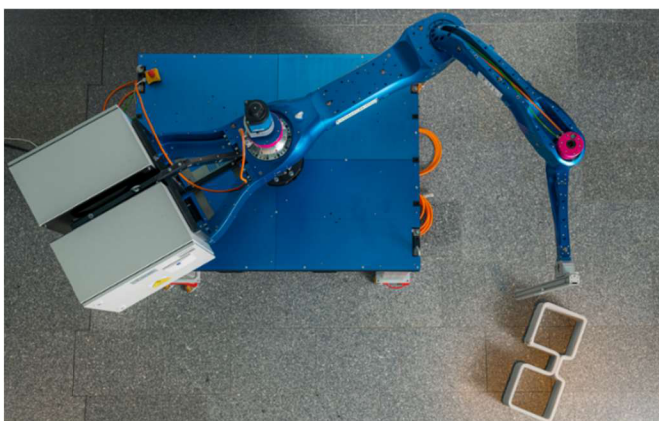
Tab. 1 Technické parametry zařízení TestBed [24]

Parametr	X	Y	Z
Pracovní prostor [m]	3,5	1,1	1,3
Max. rychlost posuvu [m s^{-1}]	3	3	2
Zrychlení [m s^{-2}]	5	4	3
Opakovatelnost [mm]	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,25$
Přesnost [mm]		$< 0,1$	
Max. zátěž [kg]		150	
Hmotnost TestBedu [kg]		3 920	

3.4.7. Testovací zařízení Printing Mantis

Zařízení Printing Mantis bylo další zařízení vyvinuté v rámci projektu 3D STAR. Jedná se o robotické rameno s kinematickou strukturou typu SCARA rozšířenou o jedno rameno navíc, viz Obr. 3.12. Jako hlavní výhoda užití této konstrukce je možnost plynulejšího pohybu během tisku. Samotná konstrukce tak nemusí zastavit svůj pohyb ani v případě, kdy je potřeba zastavit pohyb nanášecí hlavy v prostoru. Tím lze docílit mnohem menšího dynamického namáhání celé konstrukce. Vzhledem k tomu, že nejvíce energie se u podobných zařízení spotřebuje obvykle pro rozjezdy a brzdění celé struktury, může tento typ konstrukce přinést také úsporu energie. Jako další vize tohoto zařízení je zajištění jeho mobility na staveništi. Počítá se tak s jeho umístěním na mobilní plošinu. Díky tomu bude schopné celé zařízení tisknout i větší objekty, než je pracovní prostor samotného robotického ramene. S touto okolností se tak pojí další přednost užití rozšířené SCARA struktury, kdy bude moci robotické rameno lépe polohovat nanášecí hlavu i do hůře přístupných míst (např. za roh již vytištěného objektu).

Zařízení Printing Mantis bylo vyvinuto v kooperaci s fakultou mechatroniky na Technické univerzitě v Liberci přímo za účelem aplikace ve stavebnictví. Mělo by tak odolávat nepříznivým podmínkám ve stavebnictví (vysoká prašnost, vlhkost apod.), na které nejsou běžně používané průmyslové roboty uzpůsobené. Maximální zatížení na konci ramene, které je schopné dané zařízení polohovat v prostoru, je 35 kg. Tato hodnota hmotnosti je tedy limitující pro celkovou hmotnost nanášecí hlavy, která je v této diplomové práci právě na toto zařízení navrhována. Další technické parametry zařízení jsou pak uvedeny v Tab. 2.[24]



Obr. 3.12 Zařízení Printing Mantis (kinematická struktura SCARA rozšířená o jedno rameno) [2]

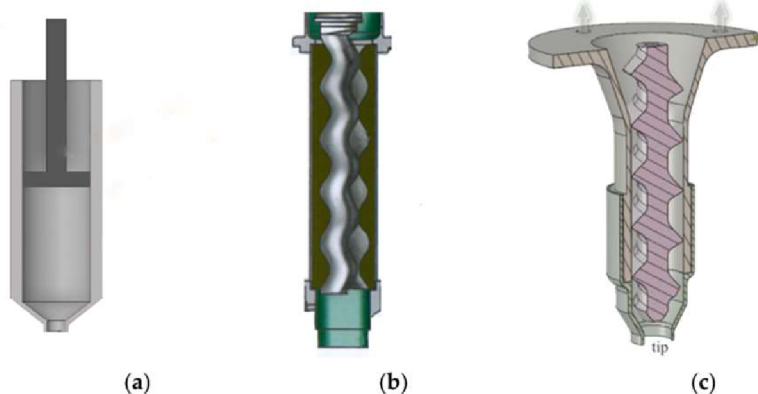
Tab. 2 Technické parametry zařízení Printing Mantis [24]

Parametr	
Délka ramene [m]	2,8
Svislý zdvih ramene [m]	2,5
Svislý zdvih koncového bodu [m]	1
Max. zatížení konce [kg]	35

3.5. Nanášecí hlavy pro metodu CC

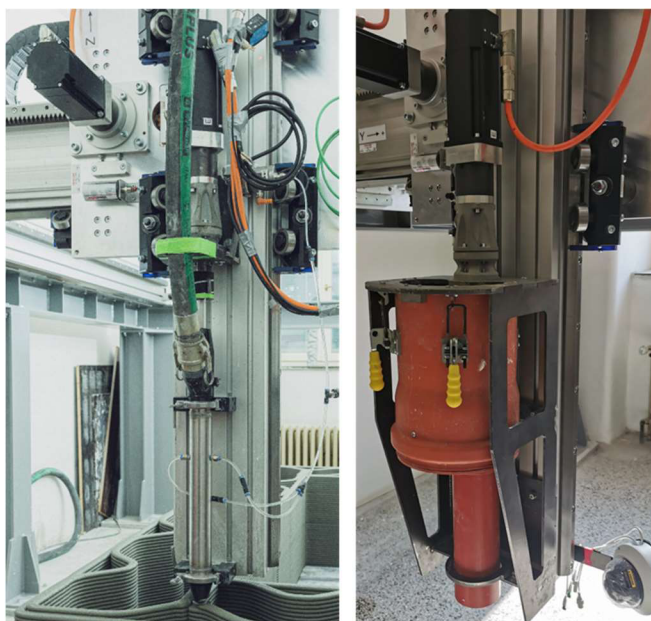
Nanášecí hlava slouží ke zpracování a aplikaci stavební (nejčastěji cementové) směsi na tiskovou podložku. Skládá se z pohonné jednotky, dopravní části a aplikační části. Nanášecí hlava může mimo tyto základní funkce dodatečně upravovat připravenou cementovou směs, a to např. přidáváním urychlovačů tuhnutí směsi či výztuže. Připravená směs je pak prostřednictvím trysky nanášena na tiskovou podložku, a to buď volně anebo je dále tvarována pomocí hladítek, která mohou být rovněž součástí nanášecí hlavy. Samotná nanášecí hlava může být *pasivní* nebo *aktivní*. U pasivních hlav je stavební směs čerpána prostřednictvím čerpadla umístěného mimo tiskové zařízení. Samotná nanášecí hlava pak slouží pouze pro usměrnění toku směsi přes trysku. Na rozdíl od pasivních hlav aktivní hlavy obsahují nějaký aktivní zdroj tlaku (šnek, píst apod.). Díky regulovatelnému zdroji tlaku přímo v nanášecí hlavě lze mnohem lépe řídit průtok směsi z trysky a ulehčit tak práci externímu čerpadlu potřebnou k překonání všech odporů během čerpání směsi.

Jako zdroj tlaku se užívají známé principy používané pro čerpání tekutin. V oblasti 3D tisku jsou tak využívány nanášecí hlavy založené na vytlačování směsí pístem, viz Obr. 3.13 (a), vytlačování pomocí vřetenového čerpadla, viz Obr. 3.13 (b) anebo vytlačování prostřednictvím šneku, viz Obr. 3.13 (c). Jednotlivé koncepty provedení nanášecích hlav budou podrobněji popsány v následující kapitole. [3, 25]



Obr. 3.13 Ukázky jednotlivých principů nanášecích hlav [26] [upraveno]

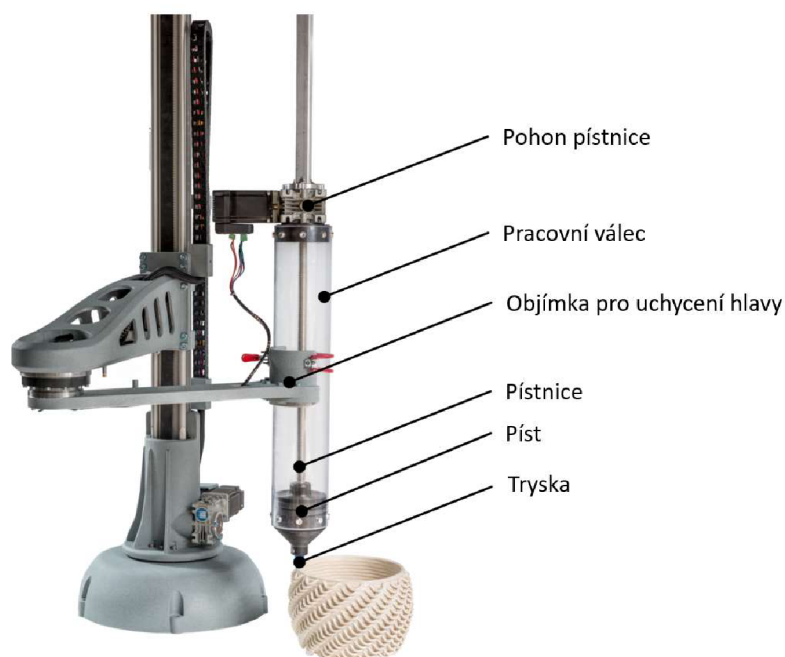
Aktivní nanášecí hlavy mohou být opatřeny zásobníkem na tisknutou směs, viz Obr. 3.14 vpravo. V případě užití pístové nanášecí hlavy slouží jako zásobník směsi samotný pracovní válec. Jeho objem je tak limitující pro nepřetržitý tisk. Zásobník směsi může být součástí i nanášecích hlav se šnekem nebo s vřetenovým čerpadlem. Zásobník slouží pro uchování stavební směsi před jejím zpracováním. Další funkcí může být vyrovnávání tlaku směsi v celém systému v případě, kdy je stavební směs čerpána z externího čerpadla, protože některé typy čerpadel mohou způsobovat kolísání tlaku směsi v celé soustavě. Jako nevýhoda použití zásobníku může být zejména zvýšená hmotnost celé nanášecí hlavy. Dále je nutné zajistit dobré promíchávání směsi i v samotném zásobníku tak, aby nedocházelo k jejímu zatuhnutí ještě v době před zpracováním. V případě, kdy je nanášecí hlava napojena přímo na čerpací systém stavební směsi, není použití zásobníku nutné, viz Obr. 3.14 vlevo.



Obr. 3.14 Nanášecí hlava bez zásobníku (vlevo), nanášecí hlava se zásobníkem (vpravo) [2]

3.5.1. Pístová nanášecí hlava

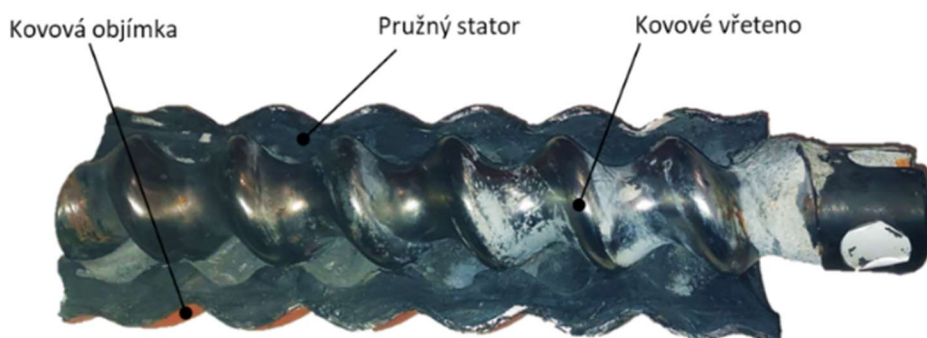
Pístová nanášecí hlava sestává z pracovního válce, vytlačovacího pístu, pohonu pístnice a trysky. Tento princip je využíván pro vytlačování nejrůznějších typů hmot, které jsou před samotným zpracováním v tekutém, ale i tuhém stavu (např. některé keramické hlíny). Pístová nanášecí hlava vyniká zejména svou relativně jednoduchou konstrukcí. Mezi hlavní výhody tak určitě patří jednoduchá údržba (hlavu lze jednoduše rozebrat a vyčistit). Dalším atributem této hlavy je omezené množství vytlačované směsi. To může být vnímáno jako nevýhoda, protože kontinuální tisk je limitován objemem směsi, který se vejde do válce na jeden zdvih a poté musí dojít k jejímu doplnění. Tento typ hlavy tak není vhodný pro tisk větších objektů a tisk, kde by mohlo být případné navazování tisku na obtíž. Další možnou nevýhodou je, že tisknutá stavební směs je umístěna v samotné hlavě a její vlastní hmotnost tak navyšuje hmotnost celé hlavy. To může být v některých aplikacích zásadní nevýhoda, protože tento přírůstek hmotnosti celé nanášecí hlavy může být vzhledem k vysokým hustotám některých směsí markantní. V některých případech ale může být toto řešení výhodné, a to ve chvíli, kdy je potřeba testovat tiskové parametry anebo chování stavebních směsí při tisku. V takovém případě může být zásadní výhodou, že pro realizaci tisku stačí menší množství připravené stavební směsi. K tomu také přispívá absence externí čerpací jednotky, která není pro takový typ nanášecí hlavy vůbec potřeba. Častým problémem u tohoto typu hlavy je pak náchylnost ucpávání výstupu trysky. Tento typ nanášecí hlavy využívá např. firma *3D Potter* pro zpracování keramických směsí na svých 3D tiskárnách, viz Obr. 3.15.[14, 26]



Obr. 3.15 3D tiskárna na keramické materiály 3D Potterbot Scara v4 s pístovou nanášecí jednotkou [14] [upraveno]

3.5.2. Nanášecí hlava s vřetenovým čerpadlem

Použití vřetenového čerpadla je další možností pro realizaci nanášecí hlavy. Tento typ čerpadla vynalezl francouzský inženýr Moineau. Z tohoto důvodu se někdy se tento typ čerpadla označuje také jako *Mono-pumpa*. Tento typ čerpadla se skládá ze statoru, rotoru a kovové objímky, viz Obr. 3.16. Stator je vyráběn z pružného materiálu (pryže nebo elastomeru). Vnitřní geometrie statoru je tvořena dutinou ve tvaru dvouchodého nebo i vícechodého závitu, ve kterém je uložen pevný rotor. Rotor bývá obvykle vyroben z kovu a je tvořen jednochodým oblým závitem s velkou hodnotou stoupání. U tohoto typu čerpadla je rotor uložen ve statoru s výrazným přesahem. To má za následek částečnou deformaci závitu statoru, ve kterém vzniknou v důsledku tohoto uložení a v důsledku rozdílnosti závitů mezi státorem a rotorem dutiny. Při otáčení rotoru tak dochází k postupnému deformování vzniklých dutin mezi rotorem a státorem a jejich posouvání ve směru osy rotoru a tím dochází k čerpání tekutiny.[27, 28]



Obr. 3.16 Řez vřetenovým čerpadlem používaným pro čerpání betonu

Jako hlavní výhoda této konstrukce je samonasávací schopnost, která je dána dokonalým utěsněním mezi rotorem a statorem. Těto výhody se využívá zejména v případě aplikace tohoto čerpadla pro čerpání vody např. ze studní nebo vrtů. Při této aplikaci se hodí také pro svou relativně nízkou hmotnost a malé rozměry. Další výhodou je eliminace volného průchodu nasáté směsi. To může v případě nanášecí hlavy být výhodou v případě nutnosti zastavení procesu tisku nebo v případě potřeby přejezdů hlavy bez extruze. Mezi další nesporné výhody vřetenových čerpadel je nižší náchylnost na nečistoty čerpaných tekutin. Z tohoto důvodu se používají také běžně v báňském průmyslu pro čerpání znečištěné vody. Vřetenovému čerpadlu nevádí ani tekutiny s vyšší viskozitou např. olej, mazut, nafta anebo tekutiny s obsahem pevných částic například stavební hmoty typu beton, malta. Díky tomu se také často používají pro čerpání těchto stavebních směsí na stavbách. V tomto ohledu se jeví použití tohoto čerpadla pro nanášecí hlavu jako výhodné.[26, 27]

Mezi hlavní nevýhody tohoto čerpadla patří potřeba poměrně vysokého krouticího momentu pro zajištění správné funkce. Tato okolnost byla vyzorována také u jednoho z prototypů nanášecí hlavy, která již byla vytvořena pro testovací zařízení TestBed, viz Obr. 3.17. S tím také souvisí účinnost čerpadel, která se u tohoto typu čerpadel pohybuje v širokém rozmezí tlaku mezi 50 až 60 %.[27]

Během provozu se vřeteno čerpadla otáčí kolem své osy a současně excentricky obíhá v objímce statoru proti smyslu své vlastní rotace. Tento složitý pohyb je tak nutné mezi pohonem a samotným vřetenem vhodně kompenzovat. Tato okolnost tak komplikuje konstrukci nanášecí hlavy o použití spojky, která musí zajistit přenos krouticího momentu mezi motorem (případně převodovkou) a vřetenem, ale současně musí zvládnout kompenzovat pravidelné vyosení jednotlivých rotačních součástí. Mezi další nevýhody použití tohoto typu čerpání směsi, které byly vyzorovány na prototypu již navržené nanášecí hlavy, je její zahřívání v průběhu vytlačování. To je způsobeno zejména deformací statoru, ale také v důsledku tření směsi mezi rotorem a statorem. Zahřívání směsi pak může zapříčinit její předčasné tuhnutí, které může mít za následek v krajním případě ucpání celé nanášecí hlavy. S tímto problémem se také pojí celkově horší údržba tohoto typu čerpadla.[27]

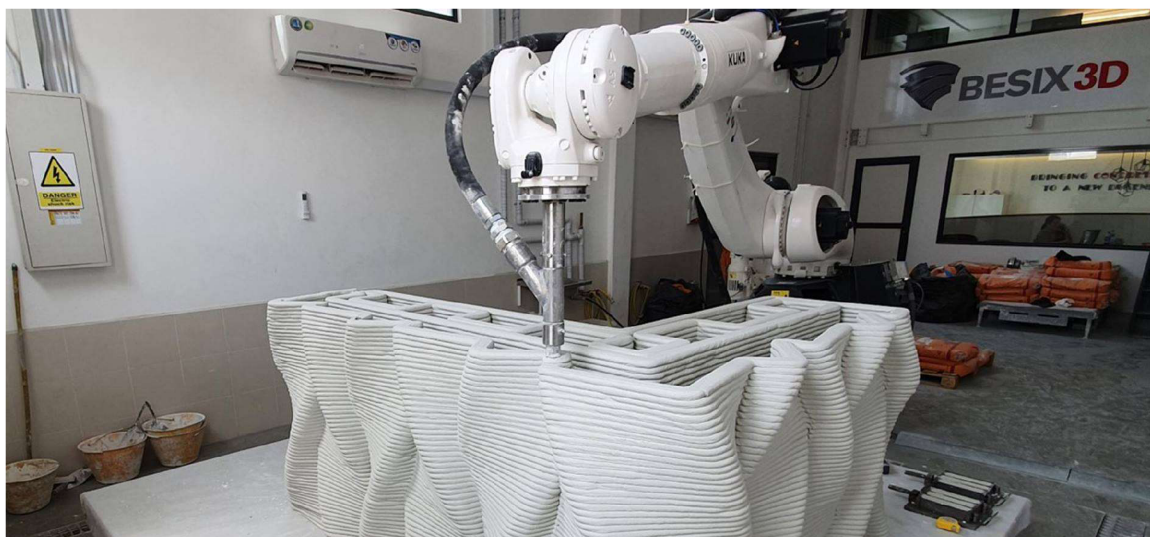


Obr. 3.17 Nanášecí hlava použitá na zařízení TestBed s vřetenovým čerpadlem

3.5.3. Pasivní nanášecí hlava

Koncept pasivní hlavy znamená, že v samotné nanášecí hlavě není žádný aktivní prvek (vřeteno nebo píst), který by zajišťoval čerpání stavební směsi. Čerpání směsi je v tomto případě zajišťováno externě mimo samotnou konstrukci tiskového zařízení. Samotná hlava je obvykle tvořena pouze trubkou, ke které je připojena hadice s čerpanou směsí, viz Obr. 5.18. Pro čerpání lze využít například maltové čerpadlo nebo míchací jednotku s čerpadlem, která zajistí jak přípravu, tak i samotné čerpání směsi. Nanášecí hlava pak slouží zejména k usměrnění toku směsi a její vytlačování prostřednictvím trysky na podložku. Součástí tohoto typu nanášecí hlavy pak může být systém pro regulaci toku směsi.[25]

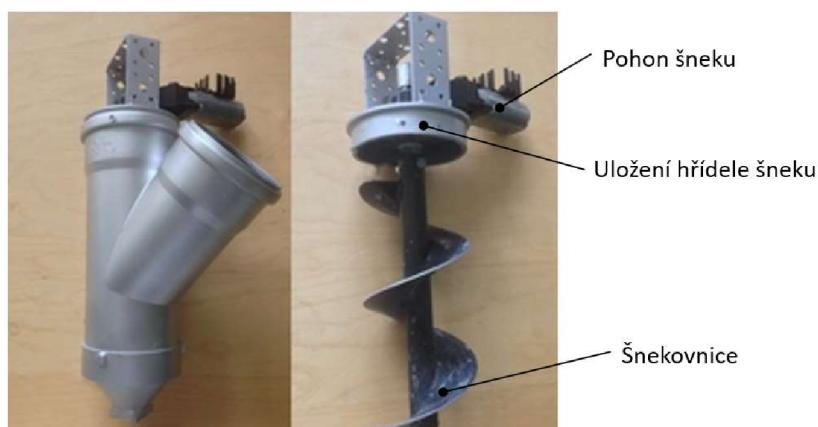
Jako hlavní přednost této koncepce je jednoduchá konstrukce bez pohyblivých mechanických částí. S tím souvisí také absence pohonné jednotky, která může u některých typů hlav, zejména u provedení bez zásobníku směsi, tvořit velmi významný podíl hmotnosti celé hlavy. Výhodou tak je i nižší hmotnost a menší rozměry celé této nanášecí hlavy. Hlavní nevýhodou této koncepce je potřeba externího zařízení pro čerpání stavební směsi. Vzhledem k tomu, že vzdálenost mezi čerpadlem směsi a samotnou nanášecí hlavou může být u některých zařízení až několik metrů hrozí, že nastane problém s regulací průtoku směsi v důsledku vyšší setrvačnosti proudění směsi v potrubí. Dalším problémem u tohoto systému může být poměrně velký tlakový spád mezi výstupní tryskou a čerpadlem. To je dáno zejména vysokými tlakovými ztrátami v přívodní hadici. U tohoto provedení hlavy také není možné použití zásobníku na stavební směs. Z tohoto důvodu je pro testování směsí a tisku menších objektů tento způsob nevhodný, protože značná část materiálu se spotřebuje jenom pro naplnění samotného čerpacího systému. Tento typ nanášecí hlavy využívá např. firma *Vertico 3D*. [3]



Obr. 3.18 Průmyslový robot s pasivní nanášecí hlavou napojenou na maltové čerpadlo [29]

3.5.4. Šneková nanášecí hlava

Tento princip nanášecích hlav patří v oblasti 3D tisku ve stavebnictví k nejrozšířenějším. U tohoto typu konstrukce je hlava tvořena válcem, ve které je umístěno vřeteno se šnekovým profilem (šnekovnicí), viz Obr. 3.19. V průběhu tisku šnek rotuje a průběžně vytlačuje stavební směs přes trysku na podložku. Šneková hlava může být využívána se zásobníkem stavební směsi nebo může být přímo napojena na externí systém čerpání směsi. Samotný šnek v takovém případě funguje jako regulátor průtoku stavební směsi. Hlavními výhodami této koncepce jsou relativně jednoduchá konstrukce a nižší odpor proti pohybu šneku než v případě vřetena v pružném statoru. Další výhodou je, že směs je neustále promíchávána a mohou tak být do ní dodávána a zamíchávána aditiva např. urychlovače tuhnutí směsi. Jako vhodná se tato koncepce jeví zejména pro stavební směsi, které vykazují tixotropické vlastnosti (v důsledku míchání směsi, klesá její viskozita). Jako možná nevýhoda šnekové hlavy může být problém úplně zastavit průtok směsi v případě potřeby přejezdu hlavy bez extruze.[25]



Obr. 3.19 Ukázka nanášecí hlavy využívající šnek [30] [upraveno]

3.5.5. Příslušenství a další funkce nanášecích hlav

Hlavní funkcí nanášecí hlavy je doprava a usměrnění nanášeného materiálu do místa tisku. Mezi další funkce nanášecí hlavy pak může patřit tvarování vytlačovaného materiálu, přidávání výztuže, přidávání aditiv do tisknuté směsi nebo například kontrola samotného procesu tisku. Asi nejčastěji se v případě nanášecích hlav používají pro extruzi trysky o kruhovém průřezu. Jedná se o konstrukčně nejjednodušší řešení, které vykazuje relativně bezproblémový proces vytlačování, a to zejména díky rovnoměrnému průtoku v celém průřezu trysky. Výtisky prováděné kruhovou tryskou jsou pak charakteristické výrazně vystouplými přetoky v jednotlivých vrstvách. Samotný povrch stěn tištěných kruhovou tryskou má charakteristickou vlnitou strukturu. Díky této struktuře lze pak na první pohled rozeznat, že daný objekt byl vyroben právě metodou 3D tisku. V některých případech ale může být právě tato charakteristická struktura nežádoucí. Možným řešením pak může být použití trysky nekruhového (například obdélníkového) průřezu. Taková tryska pak dokáže vytvářet výrazně širší stopu než tryska kruhová. Součástí takové trysky pak mohou být také boční hladítka, která dokážou urovnávat boční konturu tak, že vznikne dokonale rovný a uhlazený povrch stěn tisknutých objektů, viz Obr. 3.20 vpravo. Při správném nastavení průtoku směsi pak i jednotlivé vrstvy navazují tak, že je nelze ani okem rozlišit. Výsledný vytištěný objekt pak svou kvalitou povrchu připomíná konstrukce z litého betonu.

Aby bylo možné tisknout nekruhovou tryskou ve všech směrech je potřeba, aby byla zajištěna rotace trysky nebo celé nanášecí hlavy kolem své svislé osy. Díky otáčení samotné hlavy nebo trysky je pak možné vytvářet rovnoměrně zakřivené stěny s hladkou konturou. Toho lze docílit správným nastavením průtoku a průběžným natáčením trysky během tisku tak, aby její boční hladítka byla ve všech fázích tisku ideálně tečně k tisknuté křivce, resp. dráze. Jako konstrukčně jednodušší se jeví v tomto směru natáčení samotné trysky. V takovém případě je tryska, případně její přípojný díl, otočně uložena na konci nanášecí hlavy. Součástí hlavy je pak elektromotor, případně servomotor, který orientuje trysku kolem svislé osy, viz Obr. 3.20 vlevo. Mechanická vazba mezi tryskou a hřídelí motoru může být realizována například prostřednictvím ozubeného řemene, vnějšího ozubení na otočné trysce v kombinaci s pastorkem nebo šnekem na hřídeli motoru.



Obr. 3.20 Nanášecí hlava s otočnou tryskou (vlevo)[31], nanášecí hlava s bočními hladítky (vpravo)[15]

Další funkcí nanášecí hlavy může být přidávání urychlovačů tuhnutí směsi. V celém čerpacím systému cementové směsi je nutné zajistit dobrou tekutost a sní související dobrou čerpatelnost tištěné směsi. Po vytlačení směsi je naopak žádoucí, aby vytištěný materiál co nejrychleji ztuhnul a výsledná vytisknutá vrstva získala dostatečnou pevnost. Jako možné řešení tohoto problému se jeví přidávání urychlovačů přímo v nanášecí hlavě, kde jsou následně vmíchány do směsi, viz Obr. 3.21. V takovém případě může být vřetenem opatřeno například příčnými kolíky pro zajištění dostatečného vmíchání urychlovačů do směsi.



Obr. 3.21 Ukázka nanášecí hlavy s injektáží urychlovačů přímo do pracovního válce [2]

Pro zlepšení mechanických vlastností může vzniknout potřeba přidávat do tištěného materiálu nějaký druh výztuže. Jedním typem výztuže, používaným v oblasti 3D tisku cementových směsí, jsou výztužná vlákna přidávaná přímo do směsi. Tato vlákna mohou být například ze skla, čediče, polypropylenu nebo oceli. Na téma přidávání výztužných vláken do tištěných cementových směsí vzniklo v minulosti již několik studií. Obecně se tyto studie shodují na pozitivním vlivu obsahu výztužných vláken, a to na navýšení tažnosti a zvýšení pevnosti v tahu. Nutno dodat, že takto vyztužený materiál se může chovat výrazně anizotropně, neboť orientace vláken ovlivňuje mechanické vlastnosti vytisknutého materiálu v různých směrech. V případě použití stavební směsi s obsahem vláken je nutné počítat se zhoršením tokových vlastností směsi (obvykle je vytlačování směsí s obsahem vláken energeticky náročnější). Pro zajištění vhodných mechanických vlastností je pak žádoucí zajistit optimální orientaci výztužných vláken.[3]

Další možností, jak vyztužit tisknutou směs je přidání externích výztuh. V takovém případě mohou být do ještě ne zcela zatuhnutých vrstev přidávány např. ocelové tyče. Používá se tak známého a léty osvědčeného principu kompozitního materiálu (železobetonu). Za možnou modifikaci tohoto principu lze považovat přidávání výztuže ve formě např. ocelového lanka nebo drátu přímo do vytlačovaného materiálu.

Výhodou tohoto principu je, že může být prováděn plně automaticky. V takovém případě je součástí nanášecí hlavy nebo čerpacího systému buben s navinutým lankem nebo drátem, který je následně veden přes průvlastky tak, aby byl plně obalen vytlačovanou směsí a vhodně uložen do vytlačeného materiálu, viz Obr. 3.22 vlevo. Je však nutné dodat, že tento typ výztuže vykazuje podstatně horší výztužné vlastnosti než v předchozím uvedeném případě.[3]

V současné době je obecným trendem v průmyslu zavádění senzorů a kontroly všech výrobních procesů ve všech fázích. V případě nanášecí hlavy tak mohou být sledovány některé stavové veličiny například teplota směsi nebo například tlak v pracovním válci. Zvýšená teplota směsi může signalizovat nastartování chemického procesu, během kterého je směs vytvrzována. V případě zahřání směsi v důsledku tření šnekem může být tento chemický proces až příliš urychlen, což může mít za následek předčasnou ztuhnutí směsi a ucpání celé nanášecí hlavy. Samotná nanášecí hlava pak může být opatřena například kamerami, aby bylo možné obsluhou pozorovat proces extruze z místa obsluhy stroje, viz Obr. 3.22 vpravo. Dále může být hlava osazena například kontrolními systémy pro detekci přiblížení hlavy k objektům či například osobám a zabránění vzájemné kolize.



Obr. 3.22 Ukázka tisku s výztuží ve formě drátu/lanka (vlevo)[31], nanášecí hlava s kontrolními kamerami (vpravo)[15]

4. Volba konceptu řešení

V této práci bylo porovnáno několik konceptů řešení nanášecí hlavy pro zařízení Printing Mantis. Během rešerše bylo nalezeno několik možných variant technického řešení nanášecí hlavy. Rešerše byla prováděna na základě technických podkladů firem, které se zabývají danou problematikou, vědeckých článcích a dostupné odborné literatuře. Nejvhodnější (zvolené) řešení bylo dále rozpracováno do podoby kompletního konstrukčního návrhu. Výstupem pak je kompletní technická dokumentace pro výrobu zvoleného řešení.

4.1. Definování parametrů navrhované nanášecí hlavy

V úvodní části vývoje byly definovány parametry a vlastnosti, které by měl navrhnutý typ nanášecí hlavy splňovat. Tyto parametry byly zvoleny jako výchozí pro samotný návrh a byly získány zejména na základě zkušeností získaných z projektu 3D STAR. Jak již bylo uvedeno, pro zařízení TestBed bylo vyvinuto již několik typů hlav a bylo tak k dispozici velké množství parametrů, které byly získány na základě zkušeností s danou technologií. Pro navrhovanou nanášecí hlavu tak byly definovány následující parametry:

- předpokládaný průměr trysky do 30 mm,
- výška vrstvy max. 10 mm,
- rychlost tisku 300 mm s^{-1} ,
- limitní hmotnost hlavy 35 kg,
- možnost tisku cementové směsi, ale i dalších materiálů (geopolymery, keramické směsi apod.),
- možnost přidávání aditiv do směsi (urychlovače tuhnutí),
- možnost připojení na čerpací systém stavební směsi,
- možnost regulace průtoku,
- jednoduchá montáž a demontáž hlavy a výměna trysek,
- snadná údržba celé hlavy (rychlé rozebrání po dotisknutí),
- možnost tisku i menšího množství směsi (v případě testovacího režimu).

4.2. Volba nejvhodnějšího konceptu

Nejprve bylo nutné vybrat vhodný koncept nanášecí hlavy. V teoretické části práce byly popsány čtyři typy nejpoužívanějších nanášecích hlav. Prvním zvažovaným typem byla nanášecí hlava, která využívá k vytlačování píst. Hlavní výhodou tohoto řešení by byla relativně jednoduchá konstrukce. Tato hlava se skládá z malého množství komponent a její realizace by tak mohla být i ekonomicky výhodná. Současně tento typ hlavy je charakteristický obvykle svou relativně úzkou a podlouhlou konstrukcí, která by mohla být právě pro aplikaci na zařízení PM výhodná.

Hlavní nevýhodou tohoto konceptu je především omezené množství směsi, se kterým lze provádět kontinuální tisk. V případě zařízení PM, které je právě na počátku testovacího provozu a dá se tak předpokládat potřeba většího množství testů, jeví se možnost zpracování i menšího množství směsi pro otestování jako poměrně výhodná. Další nevýhodou této konstrukce je, že tisknutá směs není v tomto typu hlavy nikterak promíchávána. To by mohlo mít za následek předčasné zatuhnutí směsi již v samotném pracovním válci hlavy. Dalším nedostatkem tohoto řešení je pak stav, kdy je pracovní válec naplněn směsí a vyskytne se problém při tisku, pro který je nutno celý proces zastavit. V takovém případě je potřeba hlavu demontovat a již připravenou směs z hlavy odstranit, protože v důsledku nemíchání této směsi by mohlo dojít k jejímu předčasnému zatuhnutí.

Dalším možným řešením bylo použití vřetenového čerpadla jako čerpacího prvku pro nanášecí hlavu. Právě v době, kdy byla psána tato diplomová práce, proběhla na zařízení TestBed zkouška jednoho z prototypů nanášecí hlavy, která využívá právě vřetenové čerpadlo. Ačkoliv se zpočátku jeví použití jako velmi výhodné pro své relativně přesné dávkování směsi, bezúkapovost, možnost provozování se zásobníkem i bez a dobrou dostupnost (lze zakoupit), bylo po provedení testu zjištěno několik zásadních nedostatků. Jako hlavní nedostatek byla zjištěna velmi velká energetická náročnost tohoto čerpacího systému. S tím se pojí zejména potřeba relativně silného pohonu a robustní konstrukce celé nanášecí hlavy, která musí zvládnout zachytit velké reakční účinky od vřetene. Vzhledem k tomu, že však limitní nosnost celé nanášecí hlavy včetně směsi nesmí přesáhnout 35 kg, není možné uvažovat například o nějaké těžké svařované ocelové konstrukci se silným pohonem. Mezi další zásadní problémy u této hlavy patří velké smykové namáhání směsi v důsledku mechanismu čerpání (podrobněji popsáno v kap. 3.5.2), které způsobuje významné zahřívání směsi během čerpání. Zahřátí pak může urychlit chemickou reakci tuhnutí směsi, což by mohlo vést k zatuhnutí směsi ještě v samotné nanášecí hlavě.

Pasivní hlava by v případě zařízení PM mohla být vhodným východiskem pro své relativně malé rozměry, nízkou hmotnost a konstrukční jednoduchost. Nevýhodou tohoto provedení je absence aktivního zdroje čerpání nebo míchání, který by mohl sloužit současně k přimíchávání urychlovačů tuhnutí do směsi. Zásadním problémem, kvůli kterému nakonec toto řešení nebylo vybráno, je potřeba externího čerpacího zařízení. Vzhledem k tomu, že u tohoto řešení je potřeba významné množství tisknuté směsi jenom na samotné zaplnění celého čerpacího systému, jeví se toto řešení nevhodné zejména pro úvodní testy, kdy je k otestování potřeba relativně malé množství materiálu. Nicméně o pasivní tiskové hlavě je možno uvažovat jako o možném řešení do dalších fází vývoje zařízení PM.

Po zvážení veškerých předností a nedostatků různých typů nanášecích hlav byla jako nejvhodnější řešení zvolena nanášecí hlava využívající šnek. V uvažovaném případě by nanášecí hlava byla napojena na systém míchání a čerpání stavebních směsí mimo samotné tiskové zařízení. Samotná hlava by tak fungovala jako regulátor a usměrňovač toku stavební směsi, která by mohla být čerpána z externí čerpací jednotky. Díky tomuto uspořádání tak bude možné zajistit kontinuální tisk i větších objektů. Tato okolnost současně souzní s vizí další fáze vývoje, kdy by zařízení PM bylo opatřeno transportní jednotkou, aby se mohlo pohybovat po staveništi. Díky tomu by bylo možné vytvářet objekty mnohem větších rozměrů, než je samotný pracovní prostor zařízení při stacionárním provozu. Dalším hlediskem, proč byl vybrán právě tento typ hlavy, je jeho nižší hmotnost, než je tomu v případě ostatních typů hlav. Nižší hmotnost je dána zejména absencí zásobníku se směsí nebo například potřebou pohonu s nižším výkonem (tím pádem s nižší hmotností) než třeba v případě použití vřetenového čerpadla. Další nespornou výhodou je neustálé promíchávání stavební směsi, které je vhodné zejména v případě tisku cementových směsí, kdy jsou těsně před výstupem směsi z hlavy do směsi přimíchána aditiva např. urychlovače tuhnutí směsi. Tento typ hlavy byl vybrán také pro své menší rozměry, jelikož samotné rameno zařízení PM není uzpůsobeno manipulaci s robustnějšími typy nanášecích hlav. Výhodou použití šnekové hlavy také je, že může pracovat jak v režimu, kdy je napojena na externí systém čerpání směsi, tak i v režimu čerpání směsi ze zásobníku. Díky tomu bude možné použít tento typ hlavy i pro úvodní testy, kdy je zapotřebí menší množství materiálu.

5. Konstrukční návrh šnekové hlavy

Tato část práce podrobně popisuje postup návrhu vybraného konceptu řešení – šnekové nanášecí hlavy. Jsou zde popsány jednotlivé fáze vývoje navazující v logickém sledu.

5.1. Konstrukční zásady a přístupy zohledněné při návrhu nanášecí hlavy

Již od samotného počátku návrhu bylo nutné zohlednit podmínky, za kterých bude navržená hlava provozována. Z tohoto důvodu bylo například stěžejní přistupovat k návrhu zařízení podobně, jako by bylo navrhováno zařízení do stavebnictví nebo například zemědělství. Nanášecí hlava bude muset odolávat vysoké prašnosti, přítomnosti abrazivního materiálu, zvýšené vlhkosti apod. Současně bude nutné zajistit, aby byly jednotlivé komponenty hlavy jednoduše demontovatelné. To je nutné zejména po dokončení tisku, kdy je potřeba co nejrychleji omýt veškeré části, které přišly do kontaktu s rychle tuhnoucí stavební směsí. Co se týče přítomnosti abrazivních materiálů (písku, cementu atd.) bude potřeba zajistit, aby například ložiska byla dobře chráněna, a nedostala se do kontaktu s těmito materiály. Dalším problémem, který vzniká při přítomnosti abrazivních materiálů, je zvýšené opotřebení součástí, které s nimi přijdou do kontaktu. To se dá vyřešit například použitím odolnějších materiálů v místě kontaktu součástí se směsí nebo naopak použitím běžných materiálů u součástí, které bude možné jednoduše vyměnit až dojde k jejich opotřebení. Obecně nejvýznamnějším rozdílem konstrukce zařízení do „nečistých provozů“ je přesnost vyráběných součástí. Například navrhované součásti pro zpracování stavebních směsí obecně mívají větší vůle a jejich rozměry a geometrie jsou tolerovány ve větších tolerančních polích. Díky větším vůlím je pak například možné jednoduše sestavit součásti i za přítomnosti prachu a nečistot. Další nežádoucí vliv, se kterým je nutné počítat, je zvýšená vlhkost prostředí, ve kterém bude zařízení pracovat. Působení vlhkosti se pak nejvíce projeví u součástí, které jsou v přímém kontaktu se stavební směsí. Z tohoto důvodu bude vhodné zvážit u jednotlivých komponent použití vhodných materiálů a v případě ocelí posoudit jejich korozivzdornost.

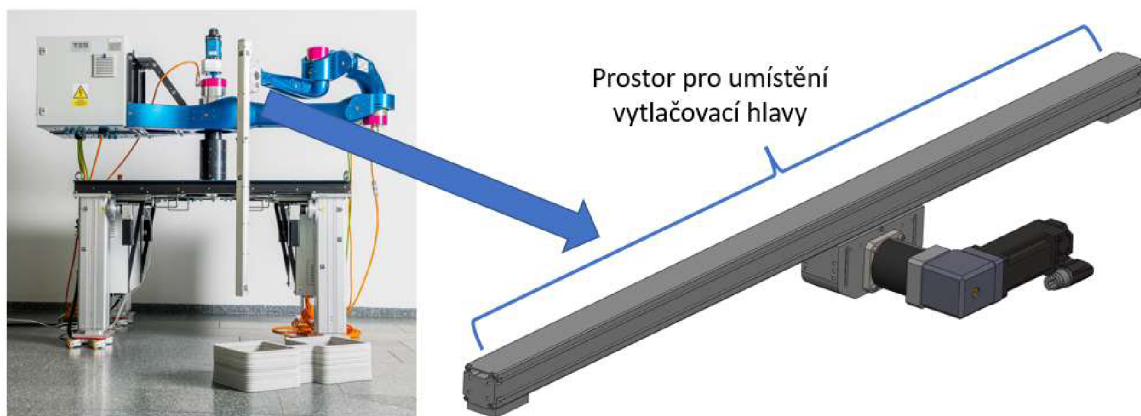
Při návrhu nanášecí hlavy byl kladen také důraz na možnost využití moderních technologií výroby, jakými jsou například aditivní technologie. Díky tomu bude možné relativně rychle a levně vyrobit jednotlivé komponenty a v případě nutné změny či potřeby náhradního dílu bude možné jednoduše zhotovit náhradu. V poslední době se aditivní technologie výroby stávají plnohodnotnou technologií výroby strojních součástí, a to zejména pro svůj velmi dynamický rozvoj. V oblasti těchto technologií má technická Technická univerzita v Liberci dlouhodobé zkušenosti a disponuje zařízeními, které jsou schopny vytvářet 3D tištěné objekty velmi vysoké kvality.

Například v případě technologie Multi Jet Fusion se mechanické vlastnosti tištěných součástí z polyamidu blíží výrobkům vyráběných konvenční metodou vstřikováním.[32] Ačkoliv by se mohlo zdát, že použití plastových součástí pro komponenty nanášecí hlavy není vhodné z důvodu nižší odolnosti, jsou tím současně umožněny relativně rychlé a levné úpravy a opravy výsledného prototypu nanášecí hlavy, než by tomu bylo v případě, kdy by všechny komponenty byly vyrobeny konvenčními technologiemi výroby. S ohledem na použití těchto metod výroby bylo také možné vytvořit významně designově složitější součásti, které budou moci být svou geometrií mnohem lépe uzpůsobeny potřebám dané konstrukce.

V případě komponent vyráběných prostřednictvím aditivních technologií nebyla kromě případů, kdy bude potřeba zajistit například některé parametry v určité toleranci (například v místě uložení ložisek), vytvářena standardní výkresová dokumentace. Toto rozhodnutí bylo učiněno s ohledem na fakt, že součásti vyráběné aditivními technologiemi nepotřebují standardní výkresovou dokumentaci v celém svém výrobním procesu, neboť návrh i následnou kontrolu lze provádět v digitálním prostředí (např. prostřednictvím 3D skenování).

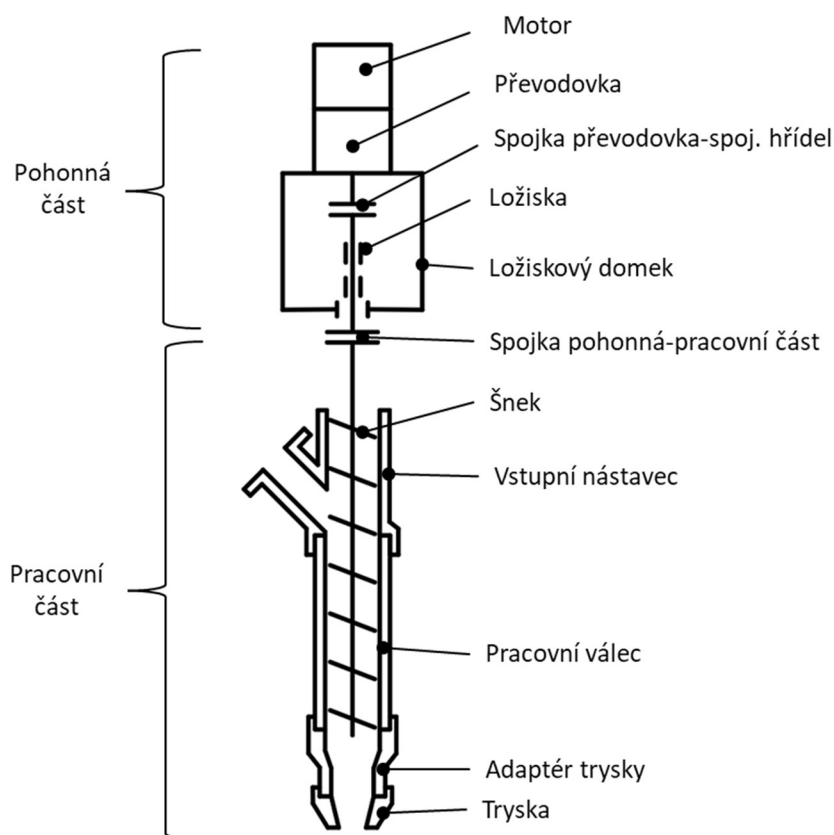
5.2. Základní uspořádání šnekové hlavy

Rozvržení navrhované nanášecí hlavy by mělo ideálně reflektovat možnosti již zkonstruovaného zařízení PM. Samotné zařízení PM je na konci svého robotického ramene zakončeno svislou lineární pohybovou osou, viz Obr. 5.1. Jak je patrné z tohoto obrázku, jako nejvhodnější řešení se jeví nanášecí hlava relativně úzké konstrukce. S ohledem na délku lineární osy (1370 mm) bylo možné využít výšky tohoto profilu tak, aby nanášecí hlava byla vybavena všemi potřebnými systémy.



Obr. 5.1 Zakončení robotického ramene – lineární pohybová osa pro instalaci nanášecí hlavy

Na základě výše uvedených okolností byl pro tiskovou hlavu zvolen koncept vertikálně uložené nanášecí hlavy. Vzhledem k tomu, že velmi významnou složkou hmotnosti celé nanášecí hlavy bývá pohonná jednotka, bude u tohoto typu hlavy využita oddělená konstrukce, kde bude nanášecí hlava rozdělena na pohonnou a pracovní část. Pohonná část bude v tomto případě uložena v horní části hlavy a bude pevnou součástí robotického ramene. Hlavními částmi pohonné části v tomto případě jsou motor, převodovka, ložiskový domek s ložisky a spojovací hřídel. Pracovní část pak bude tvořena pracovním válcem s adaptérem na rychlou výměnu trysek, připojením na systém čerpání směsi a šnekem. Pracovní část bude na profil uchycena nezávisle na pohonné části. Jedinou společnou vazbou mezi pohonnou a pracovní částí pak bude vřeteno šneku, které bude k pohonné části připojeno jednoduše rozpojitelnou hřídelovou spojkou. Toto řešení usnadní zejména údržbu nanášecí hlavy, kdy je nutné bezodkladně po dokončení tisku vyčistit všechny komponenty, které přišly do kontaktu s tuhnoucí stavební směsí. Díky oddělení pracovní části pak nebude nutné v průběhu údržby manipulovat s pohonnou částí, která by svou hmotností mohla významně znesnadňovat proces čištění. Kompletní schematický návrh nanášecí hlavy je zobrazen na Obr. 5.2. Jak je patrné z obrázku, díky svislému sériovému umístění všech komponent bude možné docílit úzké konstrukce, která se jeví s ohledem na konstrukci zakončení ramene zařízení PM jako nejvhodnější.



Obr. 5.2 Schématický nákres navrhované šnekové hlavy

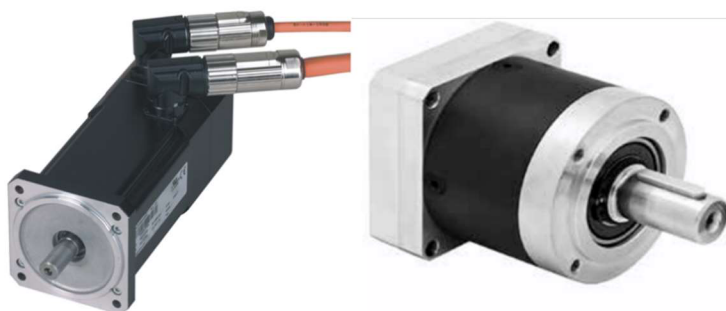
5.3. Pohon šnekové hlavy

Určení potřebného příkonu pohonu pro šnekovou nanášecí hlavu je vzhledem k neznalosti mechanických vlastností vytlačované stavební směsi početně nemožné. V dostupné literatuře, která se zabývá touto problematikou, byly nalezeny vztahy pro výpočet přibližného příkonu šnekových dopravníků.[33] V drtivé většině případů se však šnekové dopravníky používají v horizontální nebo v šikmé poloze. V ojedinělých případech mohou být koncipovány také jako svislé dopravníky.[33] V obou případech ale byly nalezeny pouze vztahy pro výpočet dopravníků dopravujících materiál z nižší do vyšší výškové úrovně. Z tohoto důvodu se použití těchto vztahů pro výpočet příkonu svisle uložené šnekové nanášecí hlavy, kde je materiál dopravován z vyšší úrovně do nižší, jeví jako nevhodné, protože výpočet nereflexuje reálnou situaci v nanášecí hlavě.

Šnek v případě nanášecí hlavy má za úkol překovávat tlakový rozdíl mezi čerpacím systémem a tryskou, který vzniká v důsledku mísení stavební směsi a v důsledku jejího průchodu tryskou. Vzhledem k tomu, že ale není znám matematický model, který by popisoval chování tisknuté stavební směsi, nelze určit energii potřebnou pro průchod materiálu nanášecí hlavou. V případě že nelze tuto potřebnou energii vypočítat přímo, nabízí se zde možnost výpočtu prostřednictvím nějaké z nepřímých (např. energetických) metod výpočtu. V tomto případě by bylo nutné znát např. tlak uvnitř pracovního válce. Z rozdílu tlaku uvnitř pracovního válce, tlaku vytlačované směsi za tryskou a tlaku vstupující směsi do hlavy by bylo možné vypočítat tlakový spád směsi na nanášecí hlavě. Pokud by byl znám tento tlakový spád, bylo by možné za použití rovnice kontinuity a známého průtoku tryskou určit potřebný objemový výkon šnekové hlavy. Dále by bylo možné po zohlednění účinnosti šnekových dopravníků spočítat potřebný příkon na šneku. Vzhledem k tomu, že ale z výše uvedených parametrů bude znám pouze požadovaných průtok hlavou, nelze ani jednu z uvedených metod použít.

Na základě okolností uvedených v předchozím odstavci bude pro pohon hlavy použit pohonný celek, který byl použit i pro předchozí prototypy nanášecích hlav vyvinutých v rámci projektu 3D STAR. Některé z těchto hlav využívaly rovněž šnek pro vytlačování směsi a tak se dá předpokládat, že dodávaný mechanický výkon této pohonné soustavy je pro danou aplikaci dostatečný. Zmiňovaná pohonná jednotka je v tomto případě tvořena elektromotorem a převodovkou. Dle potřeby bude dále mechanická soustava hlavy doplněna o ložiskový domek, který bude sloužit k zachytávání reakčních sil, které působí od materiálu na hřídel šneku.

Pro pohon šnekové nanášecí hlavy bude použit již zakoupený synchronní elektromotor s modelovým označením *8LSA37.DA030S200-3* od firmy *B&R Industrial Automation GmbH*, viz Obr. 5.3 vlevo. Tento elektromotor disponuje nominálními otáčkami 3000 min^{-1} , viz příloha 1. Jmenovitý krouticí moment tohoto motoru je 3,4 Nm. Pro zvýšení krouticího momentu motoru a snížení pracovních otáček byla k motoru nainstalována planetová převodovka *8GP40-040hh016klmm* od stejné firmy jako elektromotor, viz Obr. 5.3 vpravo. Tato převodovka umožňuje montáž přímo na přírubu elektromotru a vzhledem ke svým kompaktním rozměrům plynule prodlouží elektromotor a dohromady tak tvoří kompaktní pohonný celek. Jak již bylo uvedeno v předchozích odstavcích, tento konkrétní pohon byl již v minulosti použit pro některé vyvinuté nanášecí hlavy pro zařízení TestBed, které využívaly šnek. Vhodnost použití této konfigurace je tak experimentálně ověřena.



Obr. 5.3 Zvolený elektromotor (vlevo) s převodovkou (vpravo)

Nejprve byly vypočítány otáčky a krouticí moment na výstupním hřídeli převodovky. Převodové číslo je dle technické dokumentace převodovky 16, viz příloha 2. Převodové číslo definuje poměr mezi otáčkami i momenty od motoru a na výstupním hřídeli z převodovky, viz rov. (1) a (2). Následně tak mohly být vypočteny hodnoty maximálního krouticího momentu a otáček na výstupním hřídeli převodovky, resp. šneku, viz rov. (3) a (4).

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
n_m	Maximální otáčky motoru	3000	min^{-1}	Příloha 1
$M_{kš}$	Maximální krouticí moment motoru	3,4	Nm	Příloha 1
i_p	Převodové číslo převodovky	16	-	Příloha 2
$n_š$	Otáčky šneku	187,5	min^{-1}	rov. (3)
$M_{kš}$	Krouticí moment na šneku	54,4	Nm	rov. (4)

$$i_p = \frac{n_m}{n_š} \quad (1)$$

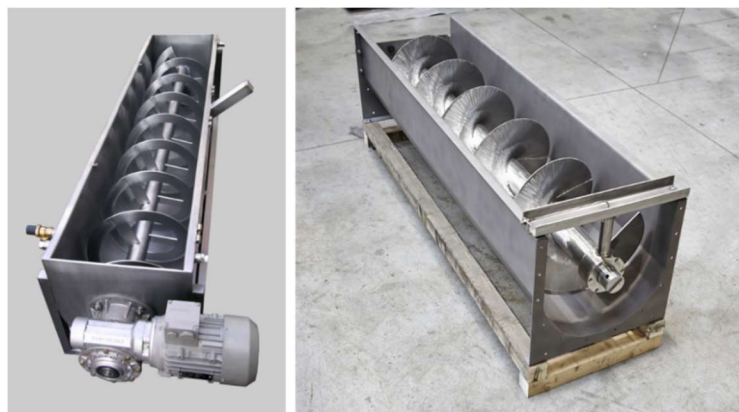
$$i_p = \frac{M_{kš}}{M_{km}} \quad (2)$$

$$n_s = \frac{n_m}{i_p} = \frac{3000}{16} = 187,5 \text{ min}^{-1} \quad (3)$$

$$M_{kš} = M_{km} \cdot i_p = 3,4 \cdot 16 = 54,4 \text{ Nm} \quad (4)$$

5.4. Návrh šneku

Vzhledem k tomu, že šneková nanášecí hlava je svou konstrukcí podobná konstrukci svislého šnekového dopravníku, bude pro návrh použita metodika a přístupy, jako by byl navrhován svislý šnekový dopravník. Šnek je hlavní součástí šnekového dopravníku a je tvořen hřídelí a šnekovnicí. Hřídel může být plný nebo dutý. Samotná šnekovnice se u průmyslových dopravníků obvykle vyrábí navinutím a přivařením pásu plechu na hřídel šneku, nebo může být odlita. Podle smyslu stoupání je možné rozlišit šnekovnice s pravým a s levým stoupáním. Samotné šnekovnice mohou být vyrobeny v různých variantách viz. Obr. 5.4. Každé provedení šnekovnice je výhodné pro jiný typ přepravovaného materiálu. Hřídele šnekových dopravníků bývají nejčastěji kruhového průřezu. V některých případech mohou být hřídele například i čtvercového průřezu. Jako výhodné se jeví i použití dutých hřídelů, a to zejména u delších horizontálně uložených dopravníků.[33]

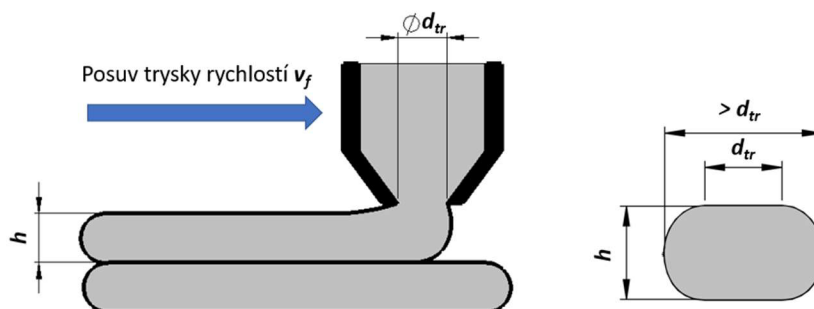


Obr. 5.4 Šnek s obvodovou šnekovnicí (vlevo)[34], šnek s plnou šnekovnicí (vpravo)[35]

5.4.1. Návrh rozměrů šneku

Nejprve bylo potřeba určit základní rozměry šnekovnice. Rozměry šnekovnice mají vliv na množství dopraveného materiálu při zadaných otáčkách, ale i na momentové zatížení pohonné jednotky a celkové mechanické namáhání konstrukce hlavy. Například menší průměr šneku by vyžadoval při zachování stejného průtoku nižší krouticí moment od pohonu, ale vyšší otáčky a naopak. S ohledem na jistou podobnost, byl pro návrh rozměrů šneku použit výpočet pro šnekové dopravníky dle standardu ČSN 26 2802. Šneková nanášecí hlava se ale od standartních šnekových dopravníků v některých ohledech poměrně značně liší. Z tohoto důvodu byl výpočet upraven pro potřeby návrhu nanášecí hlavy.

Vstupním parametrem pro návrh průměru šneku je potřebné dopravované množství. Nejprve tak byl zjištěn požadovaný objemový průtok materiálu tryskou. Ze zadaných parametrů bude pro tisk využívána tryska o maximálním průměru 30 mm. Jako maximální rychlost posuvu byla uvažována rychlost tisku 300 mm s⁻¹. Nejprve byla vypočtena plocha průřezu jedné tiskové stopy. Z Obr. 5.5 je patrné, že vytlačený materiál má v řezu tvar přibližného obdélníku se zaoblenými stranami. Toto zaoblení je způsobeno přetečením vytlačeného materiálu. Výsledná tisková stopa je tak ve skutečnosti vždy o trochu širší, než je průměr trysky. Tento jev lze částečně potlačit použitím například trysky s bočními hladítky, ale u většiny tisků není nutné tento jev kompenzovat. Na základě praktických zkušeností z již uskutečněných testovacích tisků v rámci projektu 3D STAR bylo vyzorováno, že výsledná tisková stopa, resp. šířka vytištěné vrstvy, bývá širší o několik jednotek procent. Například v případě využití trysky o průměru 30 mm, byla tloušťka stěny při optimálním tuhnutí tištěné směsi a nastavených správných technologických parametrů tisku 35 mm (tedy cca o 15 % širší). Tyto experimentálně zjištěné parametry pak byly následně využity pro přibližný výpočet průřezu tiskové stopy. Pokud je známý průřez trysky a rychlost pohybu trysky, je možné spočítat požadovaný objemový průtok tryskou jejich vynásobením, viz rov. (5).



Obr. 5.5 Plocha průřezu jedné tiskové stopy

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
v_f	Požadovaná rychlost tisku	300	mm s ⁻¹	zvoleno
h	Výška jedné tištěné vrstvy	10	mm	zvoleno
d_{tr}	Maximální uvažovaný průměr trysky	30	mm	zvoleno
Q_v	Maximální objemový průtok tryskou	$10,5 \cdot 10^{-5}$	m ³ s ⁻¹	(5)

$$Q_v = v_f \cdot S_{tr} = v_f \cdot h \cdot d_{tr} \cdot 1,15 = 0,3 \cdot 0,01 \cdot 0,035 = 10,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (5)$$

Pro výpočet dopravovaného množství u šnekových dopravníků je používán vztah (6).[33] V případě dopravovaného množství u šnekových dopravníků se obvykle pracuje s jednotkami objemu dopraveného materiálu za hodinu. Z tohoto důvodu je vypočtené množství násobeno konstantou 3600. V případě, že je nutné pracovat se základními jednotkami, konstanta 3600 nebude pro výpočet využita.

$$Q_v = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \cdot s \cdot \psi \cdot n \cdot C_H \quad (6)$$

Jak je patrné z rov. (6), do výpočtu dopravovaného množství vstupuje průměr šnekovnice D_s , ale i jeho stoupání s . Vzhledem k tomu, že není znám ani průměr šnekovnice ani její stoupání, bylo nutné stanovit poměr mezi těmito veličinami. Doporučené stoupání šnekovnice se volí pro menší šnekovnice stejné jako její průměr a pro větší šnekovnice pak 0,8krát průměr.[33] V tomto případě bylo zvoleno stoupání shodně velké s průměrem, viz (7). Po dosazení rov. (7) do rov. (6) vznikne vztah (8).

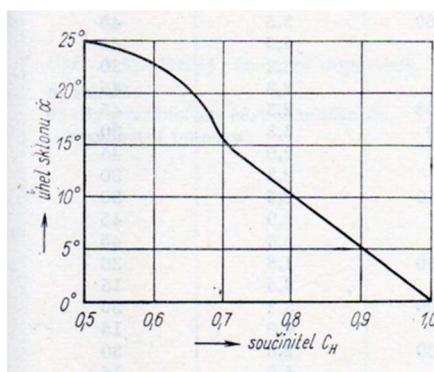
$$s = D \quad (7)$$

$$Q_v = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{4} \cdot \psi \cdot n \cdot C_H \quad (8)$$

Pro výpočet správného dopravovaného množství je potřeba určit korekční součinitele ψ a C_H . Součinitel plnění ψ je definován jako poměr mezi plochou průřezu materiálu ve válci a celkovou plochou průřezu šnekovnice. Tento koeficient upravuje stav, kdy je válec šnekového dopravníku naplněn pouze z části (nejčastěji u vodorovných šnekových dopravníků). V případě nanášecí hlavy se předpokládá, že dopravovaný materiál (stavební směs) zcela zaplní průřez šneku, jelikož bude do hlavy dopravován z externího čerpacího systému. Výsledný koeficient plnění tak bude 1, viz rov. (9).

$$\psi = \frac{S}{S_0} = \frac{S_0}{S_0} = 1 \quad (9)$$

Další parametr vstupující do výpočtu, je součinitel sklonu šneku. Dle dostupné literatury [33] se hodnota tohoto součinitele udává pro sklony šnekových dopravníků do 25°, viz Obr. 5.6. V tomto případě by uvažovaný úhel sklonu dopravníku byl 90°. Pro tento úhel však není součinitel sklonu v diagramu uveden. V rámci rešerše byly nalezeny dvě práce, které řešily obdobnou problematiku. V obou případech byl rovněž navrhován svislý dopravník a pro hodnotu součinitele sklonu šneku C_H byla v obou případech zvolena hodnota $\frac{1}{3}$ [36, 37]. Po získání všech potřebných hodnot mohl být proveden výpočet minimálního průměru šnekovnice, viz rov. 10.



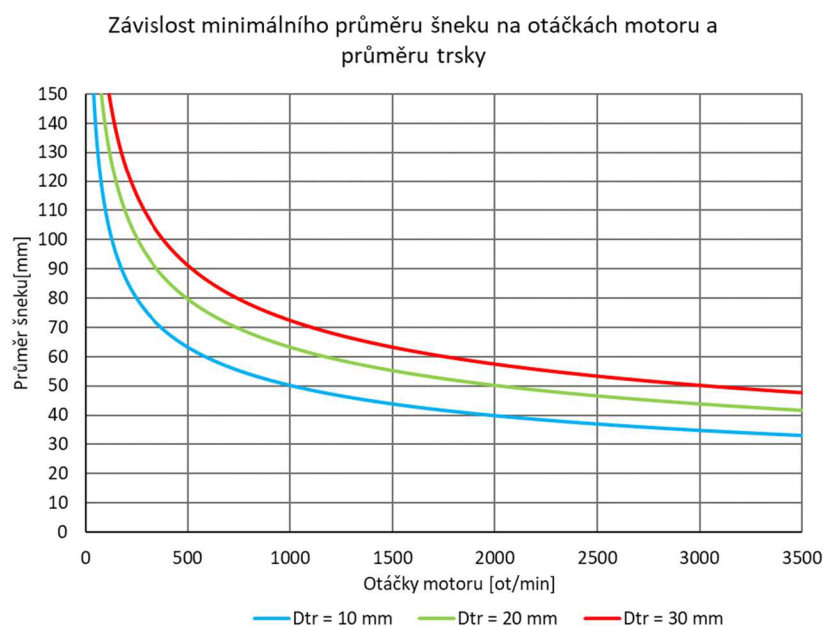
Obr. 5.6 Diagram pro volbu součinitele sklonu šneku C_H [33]

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
Q_v	Maximální objemový průtok tryskou	$10,5 \cdot 10^{-5}$	$m^3 s^{-1}$	(5)
n_ξ	Otáčky šneku	187,5	min^{-1}	(3)
ψ	Součinitel plnění	1	-	(9)
C_H	Součinitel sklonu šneku	1/3	-	[36, 37]
$D_{\xi min}$	Minimální průměr šnekovnice	50,44	mm	(10)

$$D_{\xi min} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot \psi \cdot n_\xi \cdot C_H}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10,5 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 1 \cdot \frac{187,5}{60} \cdot \frac{1}{3}}} = 50,44 \text{ mm} \quad (10)$$

Minimální průměr šnekovnice 50,44 mm, vypočtený ve vztahu (10), uvažuje nominální otáčky na elektromotoru. Dále výpočet uvažuje, že pro tisk bude používána tryska o průměru 30 mm. Za účelem posouzení i jiné konfigurace byl průměr šneku vyjádřen jako funkční závislost otáček a odstupňovaných průměrů trysek (v tomto případě 10, 20 a 30 mm). Uvažovaný rozsah otáček bude v intervalu od 0 do 3000 ot/min. V tomto intervalu otáček je motor schopen dodávat svůj nominální krouticí moment. U všech těchto závislostí bude uvažována výška vrstvy 10 mm. Obvykle se v případě nanášecích metod 3D tisku doporučuje výška vrstvy přibližně $\frac{3}{4}$ průměru trysky, tzn. v případě průměru trysky 10 mm by výška vrstvy byla menší. Tento rozdíl lze ale pro následující výpočet zanedbat. Dále byl vztah upraven, aby výsledná závislost ukazovala závislost minimálního průměru šneku na otáčkách elektromotoru, viz rovnice (11).

$$D_{\xi}(n) = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot \psi \cdot n \cdot C_H}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,03 \cdot 0,1 \cdot d_{tr} \cdot 1,15}{\pi \cdot 1 \cdot \frac{n_m}{60} \cdot \frac{1}{3}}} \quad (11)$$



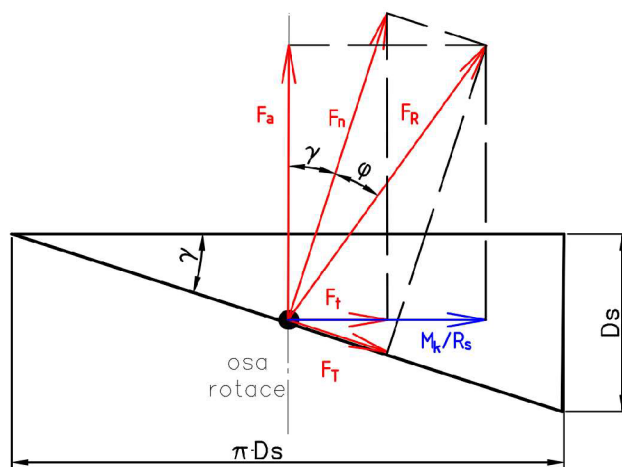
Obr. 5.7 Diagram závislosti minimálního průměru šneku v závislosti na otáčkách elektromotoru pro různé průměry trysek

Z uvedené závislosti (Obr. 5.7) je patrné, že pokud by motor měl pracovat při svých nominálních otáčkách, stačil by průměr šnekovnice 50,44 mm. Pro navrhovaný šnek tak bude zvolen **průměr šnekovnice 60 mm**, viz (12). Tato rezerva byla zvolena s ohledem na fakt, že reálný průřez šnekovnice je zmenšen o průřez hřídele šneku. Současně díky lehkému předimenzování maximálního průtoku šneku bude možné dlouhodobě provozovat pohon i při nižších otáčkách a vznikne tak i prostor pro možnou regulaci průtoku. Z vypočteného diagramu je pak patrné, že při tomto průměru šnekovnice by se pro tisk s tryskou o průměru 30 mm mohly otáčky motoru pohybovat pod 1800 ot/min.

$$D_s = 60 \text{ mm} \quad (12)$$

5.4.2. Výpočet axiální síly na šneku

V důsledku čerpání směsi dochází k reaktivnímu působení vytlačované směsi na samotnou šnekovnici resp. šnek. Toto silové působení způsobuje odpor proti rotaci šneku a současně i vznik axiální síly, která působí na hřídel šneku. Pro vyšetření silových poměrů na šnekovnici byl proveden rozklad působících sil na tzv. účinném průměru šnekovnice, viz Obr. 5.8. V tomto myšleném případě jsou všechny spojitě rozložené síly působící po celé ploše šnekovnice soustředěny do jednoho teoretického bodu a celá šnekovnice je nahrazena jedním rozvinutým závitem na účinném průměru. V tomto místě se realizuje přenos sil prostřednictvím normálové síly F_n . Síla F_t je pak tečná (obvodová) složka této síly. V důsledku tření mezi materiálem a šnekem dojde ke vzniku třecí síly F_T , která má za následek zvětšení normálové síly o účinek třecí síly a vznikne tak celková reakční síla F_R , která je odkloněna od původní normálové síly o třecí úhel φ . Síla potřebná pro překonání všech reakčních účinků je na Obr. 5.8 zvýrazněna modře a její velikost je dána podílem krouticího momentu na šneku a účinným poloměrem šnekovnice. Po rozkladu celkové reakce F_R do axiálního (v tomto případě svislého směru šneku) lze získat axiální sílu působící na šnek F_a . Pro axiální sílu bude platit vztah (18).



Obr. 5.8 Rozklad reakčních sil působících na šnek od vytlačovaného materiálu

Pro vyšetření silových poměrů na šnekovnici je nutné nejprve určit účinný poloměr. Pro účinný poloměr platí vztah dle rovnice (14).[33] V tomto případě bude použita průměrná hodnota z voleného intervalu přepočtení konstanty, viz rovnice (15). Dále bylo potřeba určit úhel stoupání šroubovice (16), který je dán poměrem odvěsen trojúhelníka jednoho rozvinutého závitu, viz Obr. 5.8. Vzhledem k platnosti podobnosti trojúhelníků je poměr stran na vnějším průměru šnekovnice D_s stejný jako v případě středního poloměru D_s , viz rov. (16).

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
D_s	Zvolený průměr šnekovnice	60	mm	(12)
R_s	Účinný poloměr šnekovnice	22,5	mm	(15)
γ	Úhel stoupání šroubovice	17,65	°	(16)

$$R_s = (0,7 \div 0,8) \cdot \frac{D_s}{2} \quad (14)$$

$$R_s = 0,75 \cdot \frac{60}{2} = 22,5 \text{ mm} \quad (15)$$

$$\gamma = \arctg\left(\frac{D_s}{\pi \cdot D_s}\right) = \arctg\left(\frac{D_s}{\pi \cdot D_s}\right) = \arctg\left(\frac{1}{\pi}\right) = 17,65^\circ \quad (16)$$

Pro výpočet třecího úhlu platí vztah (17). V tomto případě nebyl nalezen koeficient smykového tření pro konkrétní zpracovávanou směs, např. tekutý beton. Z tohoto důvodu byl hledán materiál z co nejpodobnějšími mechanickými vlastnostmi jako uvažované stavební směsi. Jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, cementové směsi jsou tvořeny jemnozrnným pískem, cementem a vodou. Z tohoto důvodu byl pro výpočet třecího úhlu použit koeficient smykového tření f pro jemnozrnný písek.[38] Vzhledem k tomu, že vypočtená třecí síla zmenšuje uvažovanou axiální sílu, byla pro výpočet použita nejmenší hodnota koeficientu z naměřeného intervalu tak, aby bylo možné vypočítat teoreticky největší axiální sílu.

$$\varphi = \arctg(f) = \arctg(f) = 24,22^\circ \quad (17)$$

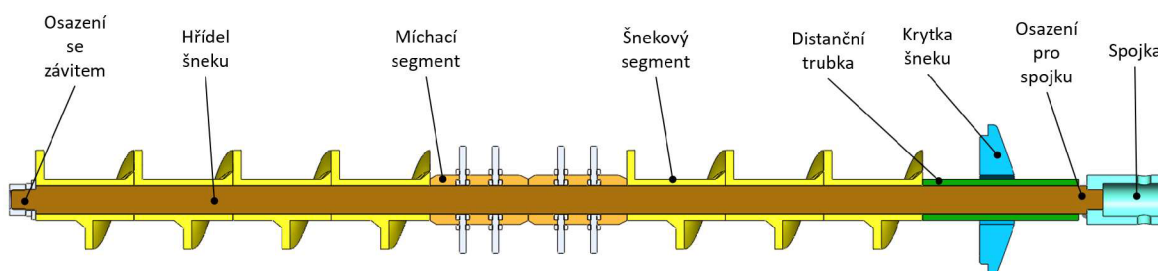
Po získání všech potřebných hodnot mohla být vypočtena velikost axiální síly, která působí na šnek F_a , viz rov. (18). Tento krok je stěžejní pro návrh dalších komponentů nanášecí hlavy, protože právě axiální síla je zdrojem zatížení dalších součástí hlavy (ložisek, hřídele, spojky apod).

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
$M_{kš}$	Krouticí moment na šneku	54,4	Nm	(4)
R_s	Účinný poloměr šnekovnice	22,5	mm	(15)
φ	Třecí úhel	24,22	°	(17)
F_a	Axiální síla na šneku	2 697	N	(18)

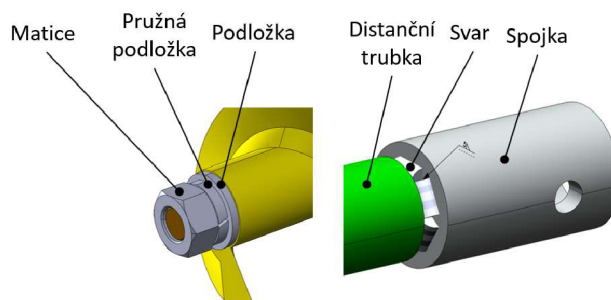
$$F_a = \frac{M_{kš}}{R_s \cdot \lg(\gamma + \varphi)} = \frac{54,4}{22,5 \cdot 10^{-3} \cdot \lg(17,65^\circ + 24,22^\circ)} = 2\,697 \text{ N} \quad (18)$$

5.4.3. Volba provedení vřetena šneku

Pro nanášecí hlavy určené ke zpracování stavebních směsí se nejčastěji využívá plných šnekovic. V případě návrhu nanášecí hlavy v této práci byl celý šnek navržen tak, aby byl poměrně jednoduše vyrobitelný prostřednictvím dostupných technologií. U samotné šnekovnice se předpokládá, že by mohla být vyrobena prostřednictvím 3D tisku (např. MJF, nebo FFF). Nabízí se tak řešení, že by šnekovnice byla tvořena jednotlivými segmenty (např. po jedné otáčce závitů) a tyto segmenty by následně byly naskládány na společný hřídel za sebe. Celá šnekovnice tak bude vyrobena z plastu (např. ABS, nebo PA 12). Hřídel bude v tomto případě vyroben z oceli. Pro spojení jednotlivých segmentů šnekovnice bude použito tvarového styku, v tomto případě kombinace šestihorné tyče v kombinaci s šestihorným otvorem v jednotlivých segmentech šnekovnice, viz Obr. 5.9. Zajištění axiálního pohybu jednotlivých segmentů šnekovnice bude řešeno distanční trubkou, která bude v horní části hřídele opřena o svar, který spojuje hřídel šneku se spojkou, viz Obr. 5.10 vpravo. V dolní části šneku pak bude na části hřídele šneku obrobena válcová plocha, do které bude vyříznut závit pro zafixování a předepnutí všech segmentů prostřednictvím matice, viz Obr. 5.10 vlevo. Pro výměnu jednotlivých segmentů tak bude stačit demontovat tuto matici a prostým vysunutím vyměnit jednotlivé segmenty. V horní části pak bude na vřeteno šneku nasazena krytka vřetena šneku. Ta bude chránit vstupní otvor do pracovní části před nežádoucím vniknutím cizích objektů. Současně se také bude jednat o bezpečnostní prvek, protože chrání obsluhu před kontaktem s rotující šnekovnicí. Mezi distanční trubkou, a dírou krytky je vůle 5 mm. Tato vůle byla zvolena s ohledem na možné vychýlení vřetena šneku během zpracování směsi.

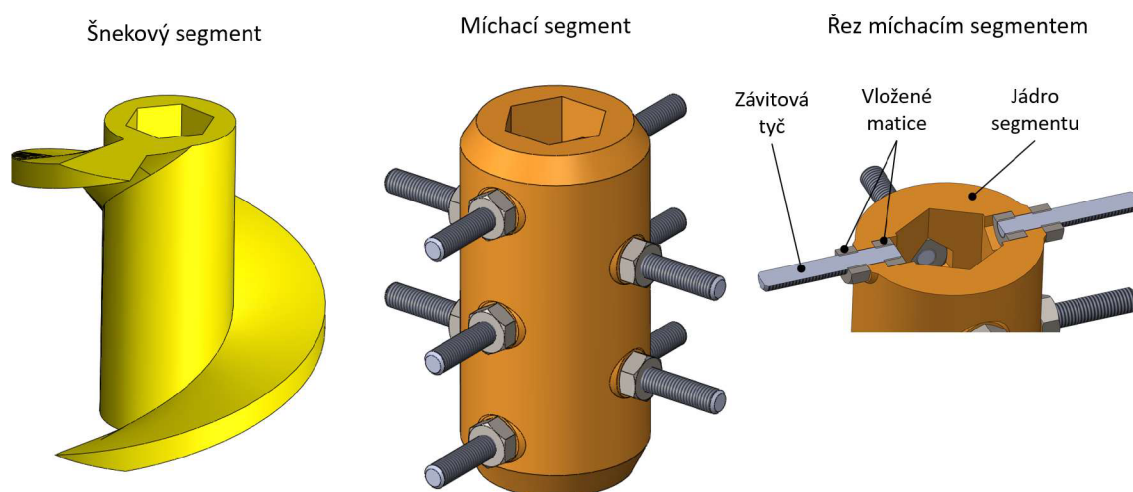


Obr. 5.9 Sestava vřetena šneku



Obr. 5.10 Detail axiálního zajištění segmentů na hřídeli

Vzhledem k tomu, že jednotlivé segmenty budou relativně jednoduše výměnné, bude možné samotné vřeteno šneku rozšířit o různé konfigurace. Díky tomuto systému tak může být jednoduše změnitelné stoupání šnekovnice, ale například i typ segmentu. Samotný segment vřetena tak nemusí být pouze šnekový profil, ale může se například jednat o míchací segment, který lze využít například pro zamíchávání urychlovačů tuhnutí do tisknuté směsi. V této práci taky byly vyvinuty dva typy segmentu. Prvním je šnekový segment viz Obr. 5.11 vlevo, který bude použit pro čerpání směsi. Tento segment je navržen tak, aby jej bylo možné jednoduše vyrobit prostřednictvím aditivních technologií. Dalším navrženým segmentem je segment určený pro vmíchávání urychlovačů tuhnutí do směsi přímo v pracovním válci nanášecí hlavy viz Obr. 5.11. Tento segment je tvořen 3D tištěným jádrem, do kterého budou zašroubovány radiálně po obvodu válcové čepy. Do plastového jádra jsou pak vloženy matice, aby byla zvýšena únosnost závitového spoje. Tyto čepy mohou být vyrobeny jako zvláštní součást, anebo mohou být nahrazeny dostupnými součástmi například šrouby nebo závitovými tyčemi. V navrhovaném případě tak bylo rozhodnuto o využití dostupných a ekonomicky výhodných nařezaných kousků závitové tyče. Aby byla následně tyč zajištěna proti samovolnému povolení během míchaní směsi, bude z vnější strany tato tyč zajištěna ještě druhou maticí, Obr. 5.11 vpravo.



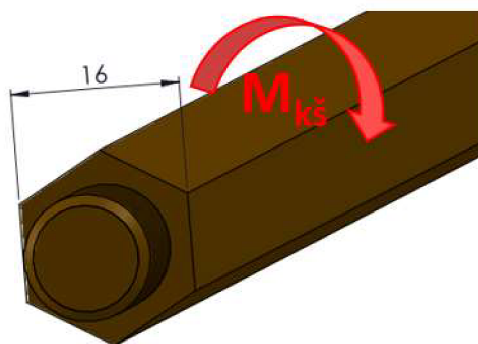
Obr. 5.11 Navržené segmenty šneku

Výhodou tohoto navrženého řešení je zejména jeho modularita. Pokud například dojde k poškození části šneku, bude možné vyměnit pouze poškozené části. Další výhodou je, že v případě potřeby bude možné relativně jednoduše změnit například stoupání šnekovnice. Další nespornou výhodou je integrace míchacích segmentů, které mohou být umístěny pouze v místě potřeby přimíchávání urychlovačů do směsi.

5.4.4. Návrh hřídele šneku

Jak již bylo uvedeno, pro hřídel bude využita ocelová šestihránná tyč o rozměru šestihranu 16 mm, viz Obr. 5.12. S ohledem na fakt, že i běžná konstrukční ocel při kontaktu s cementovou směsí vytváří pasivační vrstvu [39], která ji chrání před další korozí, mohla být pro tento hřídel zvolena nelegovaná konstrukční ocel S235JRC+C (dle EN). Tento materiál byl zvolen především proto, protože je k dostání ve formě šestihránné tyče, jakožto polotovaru.

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
$M_{kš}$	Krouticí moment na šneku	54,4	Nm	(4)
s	Rozměr šestihranu	16	mm	zvoleno
R_e	Mez kluzu oceli v tahu	235	MPa	[41]
R_{es}	Mez kluzu oceli ve smyku	164,5	MPa	(19)
τ_k	Napětí v krutu	70,27	MPa	(20)
k	Koeficient bezpečnosti	2,34	-	(22)



Obr. 5.12 Šestihránný hřídel šneku zakončený závitem

Nejprve bylo vypočítáno napětí v krutu. Pro výpočet modulu průřezu v krutu šestihránné tyče byl nalezen vztah (19) [40]. Následně mohlo být spočítáno maximální napětí v krutu v hřídeli (20).

$$W_k = 0,189 \cdot s^3 \quad (19)$$

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_{kš}}{0,189 \cdot s^3} = \frac{54,4}{0,189 \cdot 0,016^3} = 70,27 \text{ MPa} \quad (20)$$

Následně byl vypočítán koeficient bezpečnosti namáhání šestihránného hřídele na krut. K tomuto porovnání bylo zapotřebí získat hodnotu meze kluzu ve smyku. Jelikož v materiálovém listu použité oceli [41] nebyla tato hodnota uvedena, byl pro výpočet meze kluzu použit přepočební vztah pro nelegovanou konstrukční ocel, viz rov. (21).[40] Následně mohl být vypočten koeficient bezpečnosti (22). S ohledem na jeho velikost lze usoudit, že hřídel je dostatečně předimenzován pro přenášení krouticího momentu na šneku.

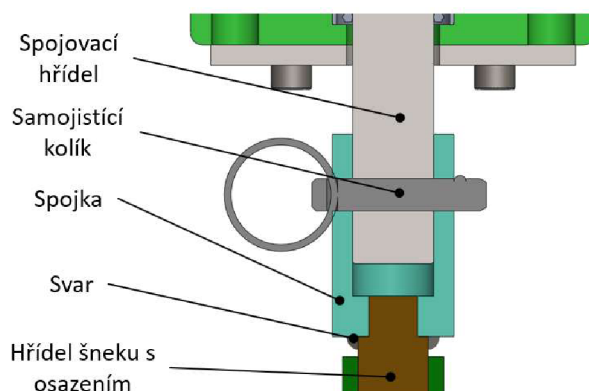
$$R_{es} = 0,7 \cdot R_e = 0,7 \cdot 235 = 164,5 \text{ Mpa} \quad (21)$$

$$k = \frac{R_{es}}{\tau_k} = \frac{164,5}{70,27} = 2,34 \quad (22)$$

5.5. Návrh spojky mezi hřídelí šneku a spojovacím hřídelem

Spojka mezi hřídelí šneku a spojovacím hřídelem od pohonu bude přenášet krouticí moment od pohonu a současně přenášet axiální sílu. Axiální zatížení pak bude muset spojka přenášet obousměrně. V klidovém stavu bude spojka zachytávat tíhovou sílu, která působí na šnek. V provozu pak bude spojka přenášet axiální sílu působící na vřeteno šneku, která vzniká v důsledku reakčních účinků tisknuté stavební směsi. Dále bude muset tato spojka také kompenzovat drobné výkyvy vřetena šneku, které mohou vznikat během čerpání směsi. Současně je zde požadavek na rychlou a jednoduchou demontáž, protože právě tento bod je spojovacím článkem mezi stacionární pohonnou částí a jednoduše demontovatelnou pracovní částí nanášecí hlavy, viz schéma navrhované hlavy (Obr. 5.2).

Jako nejvhodnější řešení byla zvolena spojka s příčným kolíkem, viz Obr. 5.13. Tento konstrukčně jednoduchý typ spojky dokáže přenášet jak krouticí moment mezi hřídeli, tak i axiální zatížení od šneku. U této spojky bude do spojovacího hřídele, který bude přenášet z pohonné části krouticí moment na šnek vyvrtán příčně otvor pro zasunutí kolíku. Samotná spojka bude poté přivařena k hřídeli šneku koutovým obvodovým svarem a bude tak pevnou součástí vřetena šneku. Aby bylo zajištěno souosé uložení spojky na hřídeli, bude na koncové části šestihhranného hřídele obrobena válcová plocha. Ve spojce pak bude obrobena díra, která bude lícovat s touto válcovou plochu. Mezi vnitřním průměrem spojky a průměrem spojovacího hřídele pak bude zapotřebí vůle, aby mohly být obě tyto součásti jednoduše demontovatelné. Tento systém spojení je velmi jednoduše rozebíratelný pouhým odjištěním a vysunutím kolíku a následným vysunutím hřídele šneku ze spojky.



Obr. 5.13 Spojka hřídele šneku

Pro příčné spojení bylo zvažováno použití kolíku s hlavou, viz Obr. 5.14 vlevo. Pro zajištění kolíku proti vypadnutí by pak bylo použito pojistného kroužku nebo závlačky. Nevýhodou tohoto řešení je, že jsou potřeba dva kroky pro zajištění kolíku. Po podrobnějším prozkoumání vyráběných řešení byl nalezen samojistící kolík (zástrčný čep) vyráběný firmou *KIPP*, viz Obr. 5.14 vpravo.

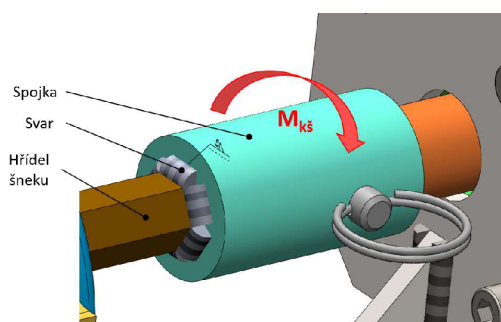
Tento kolík je na svém konci opatřen kulovým výstupkem, který je předepínán pružinou. Po zasunutí kolíku do otvoru spojky tak dojde k zatlačení výstupku a po úplném prostrčení pružina tento výstupek vysune. Díky tomu je tak kolíku znemožněn axiální pohyb v díře spojky a tím je zajištěn proti samovolnému vypadnutí. Hlavní výhodou, proč je navrhováno právě toto řešení, je zajištění kolíku současně s jeho zasunutím. Možnou nevýhodou tohoto řešení může být náchylnost samojistícího mechanismu na znečištěné prostředí. Pokud by tedy docházelo k zasekávání samojistícího mechanismu, může být tento kolík nahrazen běžným pojistným kolíkem zajišťovaným pojistným kroužkem nebo závlačkou.



Obr. 5.14 Čep s hlavou s dírou pro závlačku (vlevo)[42], zástrčný čep samojistící K0365 od firmy KIPP (vpravo)[43]

5.5.1. Výpočet kolíkové spojky

Nejprve byla zkontrolována pevnost obvodového koutového svaru, kterým je spojka připojena k šestihránnému hřídeli. S ohledem na podobnost tohoto případu s výpočtem obvodového svaru přivařeného hřídele kruhového průřezu byl použit výpočet smykového napětí ve svaru vztah pro tento případ, viz rov. (23).[44] Průměr hřídele byl v této rovnici nahrazen rozměrem šestihranu. Následně byla vypočtena bezpečnost svarového spoje (24).



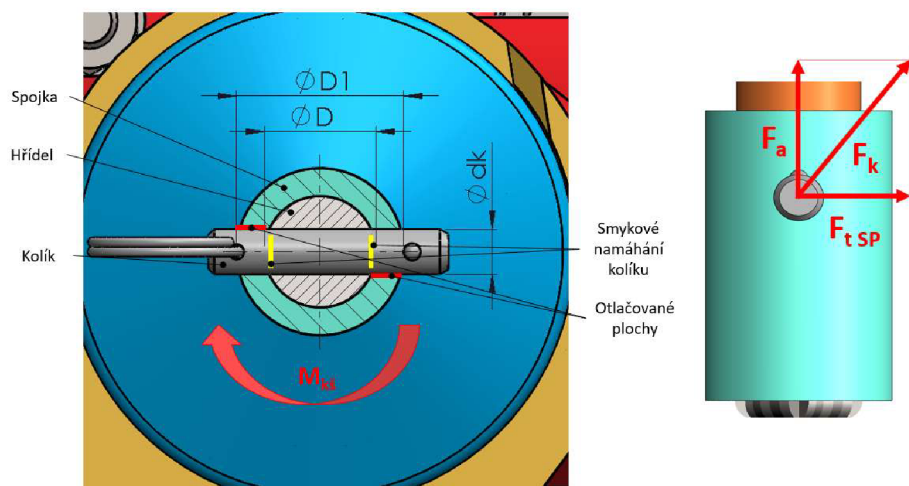
Obr. 5.15 Svarový spoj mezi hřídelem šneku a spojkou

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
$M_{kš}$	Krouticí moment na šneku	54,4	Nm	(4)
s	Rozměr šestihranu	16	mm	zvoleno
a	Výška svaru	5	mm	zvoleno
R_{es}	Mez kluzu oceli ve smyku	164,5	MPa	(21)
$\tau_{ }$	Smykové napětí rovnoběžné s osou svaru	18,40	MPa	(23)
k	Koeficient bezpečnosti únosnosti svaru	8,94	-	(24)

$$\tau_{\parallel} = \frac{M_{kš}}{W_{ks}} = \frac{M_{kš}}{\frac{\pi \cdot [(D+2 \cdot a)^4 - D^4]}{16 \cdot (D+2 \cdot a)}} = \frac{M_{kš}}{\frac{\pi \cdot [(s+2 \cdot a)^4 - s^4]}{16 \cdot (s+2 \cdot a)}} = \frac{54,4}{\frac{\pi \cdot [(0,016+2 \cdot 0,005)^4 - 0,016^4]}{16 \cdot (0,016+2 \cdot 0,005)}} = 18,40 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$k = \frac{R_{es}}{\tau_{\parallel}} = \frac{164,5}{18,40} = 8,94 \quad (24)$$

V další fázi kontrolního výpočtu bylo potřeba zkontrolovat namáhání spojky. Z Obr. 5.16 je patrné, že bude potřeba zkontrolovat namáhání kolíku na smyk a následně otláčení v místě kontaktu kolíku a náboje spojky. Nejprve byla vypočtena obvodová síla působící na vnitřním průměru kolíkové spojky, která vzniká v důsledku přenosu krouticího momentu (25). Následně byla zjištěna velikost síly zatěžující kolík F_k . Ta je výslednicí obvodové síly na spojce F_{tSP} a axiální síly od šneku F_a , viz Obr. 5.16 (26).



Obr. 5.16 Zatížení kolíkové spojky a silový rozklad na kolíku

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
D	Vnější průměr kolíkové spojky	30	mm	zvoleno
D_1	Vnitřní průměr kolíkové spojky (hřídele)	20	mm	zvoleno
d_k	Průměr kolíku	8	mm	zvoleno
R_e	Mez kluzu oceli v tahu	355	MPa	[45]
R_{es}	Mez kluzu oceli ve smyku	248	MPa	(28)
F_{tSP}	Obvodová síla na vnitřním průměru spojky	5 440	N	(25)
F_a	Axiální síla od šneku	2 697	N	(18)
F_k	Výsledná síla působící na kolík	6 072	N	(26)

$$F_{tSP} = \frac{2 \cdot M_{kš}}{D} = \frac{2 \cdot 54,4}{0,02} = 5\,440 \text{ N} \quad (25)$$

$$F_k = \sqrt{F_{tSP}^2 + F_a^2} = \sqrt{5\,440^2 + 2\,697^2} = 6\,072 \text{ N} \quad (26)$$

Po získání velikosti zatěžující síly kolíku (26) mohl být vypočten kontaktní tlak mezi kolíkem a nábojem spojky (27). Jako materiál pro náboj spojky byla zvolena ocel S355J2. Následně byla vypočtena mez kluzu ve smyku, viz rov. (28). Nakonec byl vypočten koeficient bezpečnosti proti otlačení náboje (29).

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
$F_{k\ max}$	Maximální dvoustřížná síla na kolíku	38 000	N	[43]
p_1	Tlak mezi nábojem spojky a kolíkem	75,9	MPa	(27)

$$p_1 = \frac{F_k}{(D_1 - D) \cdot d_k} = \frac{6\ 072}{(0,03 - 0,02) \cdot 0,008} = 75,90\ \text{Mpa} \quad (27)$$

$$R_{es} = 0,7 \cdot R_e = 0,7 \cdot 335 = 248,5\ \text{Mpa} \quad (28)$$

$$k = \frac{R_{es}}{p_1} = \frac{248,5}{75,90} = 3,27 \quad (29)$$

Vzhledem k tomu, že výrobce kolíku poskytuje v technickém listu přímo maximální hodnotu dvoustřížné síly $F_{k\ max}$, bylo možné použít pro kontrolu bezpečnosti na smyk právě tuto hodnotu, viz rov. (30).

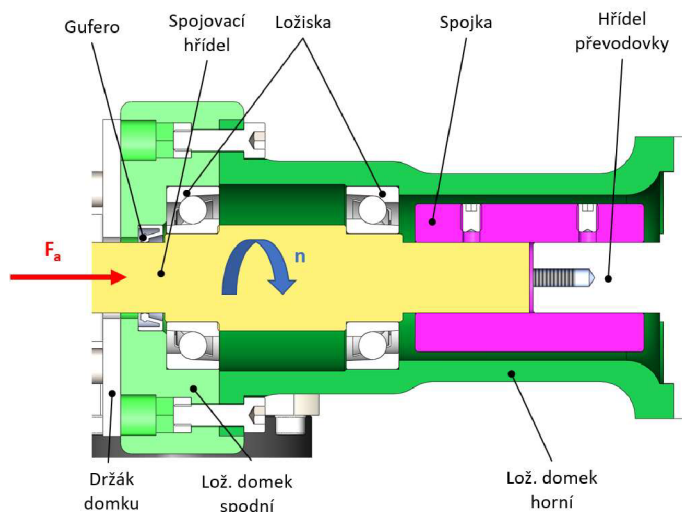
$$k = \frac{F_{k\ max}}{F_k} = \frac{38\ 000}{6\ 072} = 6,23 \quad (30)$$

5.6. Návrh ložiskového domku

Ložiskový domek byl při tomto návrhu zvolen jako prostřední článek mezi vřetenem šneku a převodovkou připojenou k elektromotoru. Hlavním důvodem, proč tak bylo učiněno, je zejména přítomnost axiálních sil na hřídeli šneku (Obr. 5.17), které by tak byly přenášeny přímo na hřídel převodovky. V technickém listu převodovky, viz příloha 2, je uvedeno, že maximální axiální zatížení hřídele převodovky je 1 000 N při 20 000 provozních hodin. Díky použití ložiskového domku tak bude možné předejít nežádoucímu zkrácení životnosti planetové převodovky v důsledku působení nadměrných axiálních sil.

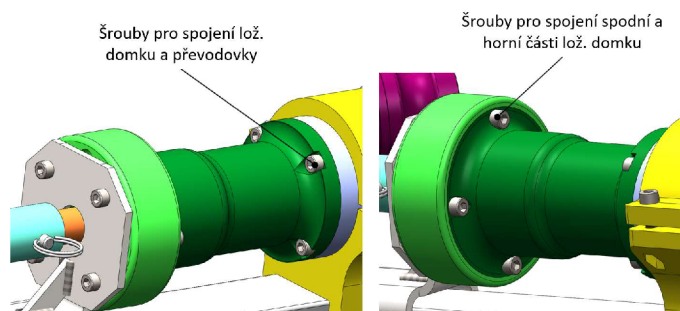
V ložiskovém domku bude uložen spojovací hřídel, který bude spojovat převodovku a vřeteno šneku. Tento hřídel bude uložen v ložiscích. Vzhledem k tomu, že hřídel bude významně zatížen axiální silou od šneku, bylo potřeba zvolit typ ložisek, který dokáže bez problémů zachytávat i významnější podíl axiálních sil v celkovém zatížení. Z tohoto důvodu byla zvolena kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. Tento typ ložiska je velmi vhodným kompromisem mezi ryze radiálním a axiálním ložiskem, protože tento typ ložiska dokáže zachytávat jak axiální, tak i radiální zatížení. Pro tuto aplikaci byla použita ložiska 7205B. V místech, kde jsou pak uložena ložiska, je zmenšen vnitřní průměr domku tak, aby bylo zajištěno optimální uložení ložisek.

S ohledem na charakter zátěže, kdy za klidu bude hřídel namáhán axiální silou v důsledku tíhy šneku a směsi a při pohybu v opačném směru, bylo zvoleno pro tato ložiska uspořádání čely k sobě. Toto uspořádání je výhodné zejména z toho důvodu, že axiální zatížení je zachytáno v obou směrech (v každém směru jedním ložiskem). Pro utěsnění celého ložiskového domku od okolních nečistot je na výstupu hřídele z ložiskového domku umístěn hřídelový těsnicí kroužek (gufero).



Obr. 5.17 Uspořádání ložiskového domku

Důležitým faktorem pro zajištění správné funkce tohoto typu ložisek je jejich správné předpětí. Aby bylo možné ložiska předepnout, bylo potřeba navrhnout dvoudílný ložiskový domek, viz Obr. 5.17. Oba tyto díly jsou navrženy tak, aby je bylo možné vyrobit prostřednictvím 3D tisku. Pokud se toto řešení osvědčí, bude ho možné po drobných úpravách designu vyrobit i konvenčními metodami (např. z nějaké ze slitin hliníku na CNC obráběcím centru). Z důvodu potřeby předpětí bude osazení hřídele, které se opírá o vnitřní kroužky ložisek, v mírném přesahu (0,5 mm). Oba díly ložiskového domku jsou spojeny po obvodu rozmístěnými šrouby, viz Obr. 5.18. Během utahování těchto šroubů dojde v první fázi k dosednutí osazení hřídele na vnitřní kroužky ložisek dříve, než dojde ke kontaktu obou dílů domku. Díky tomu tak bude možné vytvořit mezi ložisky potřebné předpětí prostřednictvím šroubového spoje obou částí ložiskového domku. Přesah 0,5 mm by se mohl zdát pro předpětí ložisek jako zbytečně velký, nicméně je potřeba zohlednit zejména vyšší poddajnost plastových dílů a také jev, kdy po dlouhodobém zatížení může u některých plastů dojít k tzv. tečení. V takovém případě by pak bylo nutné spoj dodatečně předepnout, k čemuž bude potřeba větší mezera mezi spodní a horní částí ložiskového domku. Možným problémem, který se pojí se vznikem mezery mezi součástmi je nežádoucí vnik nečistot. Částečně bude tento problém řešen zapuštěním horní části domku do spodní tak, aby nečistotám nebyla umožněna přímá cesta do vnitřního prostoru ložiskového domku. Vzhledem k tomu, že se ale neočekává častá demontáž a následná montáž ložiskového domku, bude možné na kontaktní plochy mezi jednotlivými částmi ložiskového domku nanést nějaký vhodný elastický tmel pro utěsnění vzniklé mezery.



Obr. 5.18 Spojení ložiskového domku

5.6.1. Kontrol únosnosti ložisek

Kontrola únosnosti ložisek byla provedena pomocí výpočtu jejich trvanlivosti. Nejprve bylo vypočteno ekvivalentní dynamické zatížení pro ložiska s kosoúhlým stykem [40], viz rov. (31). V případě tohoto výpočtu byla zanedbána radiální složka zatížení ložisek. Bylo tak učiněno na základě předpokladu, že radiální zatížení ložisek bude přítomno pouze v důsledku možného vychýlení vřetena šneku v průběhu čerpání/míchání směsi, u kterého se nepředpokládá nějaké výraznější silové působení v radiálním směru. Pro výpočet tak byla použita pouze axiální síla od šneku F_a . Následně mohla být vypočtena trvanlivost zvolených ložisek při zadaném zatížení, viz rov. (32). Vzhledem k tomu, že trvanlivost ložisek vyšla více jak požadovaných 20 000 provozních hodin, lze považovat použití právě zvolených ložisek jako za vhodné.

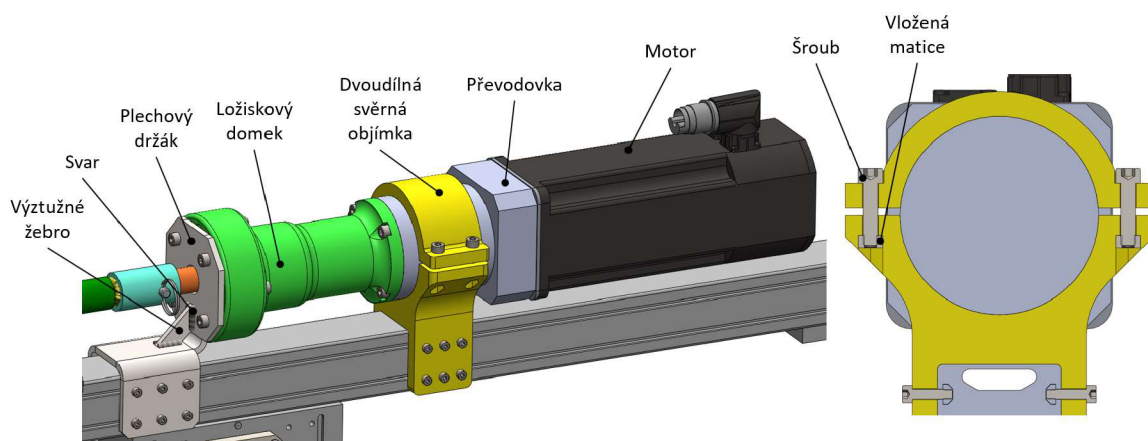
Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
F_r	Radiální složka zatížení	neznámá	N	-
F_a	Axiální složka zatížení (axiální síla na šneku)	2 697	N	(18)
P	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska	2 508	N	(31)
C	Dynamická únosnost ložiska	15 600	N	[40]
p	Exponent rovnice trvanlivosti	3	-	[40]
n_s	Otáčky šneku	187,5	min ⁻¹	(3)
L_h	Trvanlivost ložiska	21 391	hod	(32)

$$P = 0,57 \cdot F_r + 0,93 \cdot F_a = 0,93 \cdot F_a = 0,93 \cdot 2\,697 = 2\,508 \text{ N} \quad (31)$$

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{15\,600}{2\,508}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 187,5} = 21\,391 \text{ hod} \quad (32)$$

Pro uchycení ložiskového domku k profilu lineární osy byl navržen plechový držák, ke kterému bude ložiskový domek přišroubován prostřednictvím čtyř šroubů. Aby byla zajištěna dostatečná tuhost navrženého držáku, bude v místě ohybu přivařeno výztužné žebro, viz Obr. 5.19. Samotný držák pak bude k profilu připevněn šrouby, zašroubovanými do oválných děr (pro zajištění nastavitelnosti polohy držáku). Do profilu pak budou zašroubovány do T matic, které budou zasunuty do T drážky profilu.

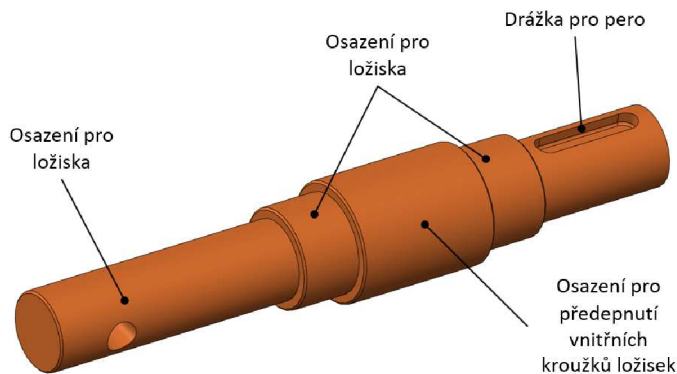
S ohledem na skutečnost, že hmotnost motoru a převodovky v součtu přesahuje 8 kg, bylo usouzeno, že v místě převodovky bude umístěn ještě jeden opěrný bod. Tímto bodem bude dvoudílná svěrná objímka vyrobená prostřednictvím 3D tisku, viz Obr. 5.19 vpravo. Samotná objímka bude sevřena pomocí šroubů, které budou zašroubovány do vložených matic. V průběhu montáže pak bude nutné zajistit, aby byla nejprve připevněna převodovka prostřednictvím objímky k profilu (tím dojde k vystředění pohonu na profilu) a až poté bude ložiskový domek uchycen k držáku, viz sestavný výkres 1. a 2. úchytný bod.



Obr. 5.19 Způsob uchycení ložiskového domku a pohonu

5.6.2. Návrh spojovacího hřídele

Spojovací hřídel spojuje hřídel převodovky s hřídelem šneku. Současně také slouží k přenosu axiálních sil od šneku do ložisek. Spojovací hřídel je uložen v ložiskovém domku v ložiscích s kosoúhlým stykem. Mezi ložisky je hřídel osazen na větší průměr, aby bylo možno přes hřídel přenášet axiální síly do ložisek, viz Obr. 5.20. Na straně převodovky je hřídel opatřen drážkou pro pero 6×6×28 mm (voleno shodně s drážkou na hřídeli zakoupené převodovky). S hřídelem převodovky pak bude hřídel spojen pevnou spojkou s drážkou pro pero. Na druhé straně bude v hřídeli provrtána příčně díra pro kolík.



Obr. 5.20 Spojovací hřídel

Pro hřídel bude použita stejná ocel jako v případě kolíkové spojky S355J2. Díky tomu tak bude možné obě tyto součásti vyrobit ideálně z jednoho polotovaru. V případě pevnostní kontroly byla nejprve odhadnuta nejslabší místa hřídele. Nejprve bylo vypočteno napětí v krutu v místě drážky pro pero. Vzhledem k tomu, že drážka pro pero výrazně oslabí kruhový průřez (chová se jako vrub), nelze pro výpočet modulu průřezu v krutu použít vzorec pro kruhové součásti. Z tohoto důvodu byla v literatuře [40] vyhledána hodnota modulu průřezu v krutu přímo pro hřídel o průměru 20 mm s drážkou pro pero 6×6 mm. Následně mohlo být spočítáno napětí v krutu, viz rov. (33). Nakonec mohl být vypočten součinitel bezpečnosti v krutu v místě drážky pro pero (34).

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
$M_{kš}$	Krouticí moment na šneku	54,4	Nm	(4)
W_{kP}	Modul průřezu v krutu pro hřídel s drážkou	$1,44 \cdot 10^{-6}$	m^3	[40]
τ_{kP}	Napětí v krutu v hřídeli pod drážkou pro pero	37,78	kPa	(33)
R_{es}	Mez kluzu oceli ve smyku	248,5	MPa	(28)
k	Koeficient bezpečnosti	6,58	-	(34)

$$\tau_{kP} = \frac{M_{kš}}{W_{kP}} = \frac{54,4}{1,44 \cdot 10^{-6}} = 37,78 \text{ MPa} \quad (33)$$

$$k = \frac{R_{es}}{\tau_{kP}} = \frac{248,5}{37,78} = 6,58 \quad (34)$$

Další potenciálně nejslabší místo na hřídeli se nachází v místě příčného otvoru pro kolík. Nejprve bylo spočítáno napětí v krutu v místě s otvorem pro kolík dle příslušného výpočetního vztahu (35), který byl nalezen v literatuře.[40] Následně bylo vypočteno napětí v tlaku v místě dotyku kolíku a hřídele (36). Vzhledem k tomu, že v hřídeli působí napětí v krutu a v tlaku současně, bylo vypočítáno ekvivalentní napětí v hřídeli podle pevnostní hypotézy HMM (37). Následně mohl být vypočten koeficient bezpečnosti v místě díry pro příčný kolík (38).

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
$M_{kš}$	Krouticí moment na šneku	54,4	Nm	(4)
D_1	Vnitřní průměr spojky (hřídele)	30	mm	zvoleno
d_k	Průměr kolíku	8	mm	zvoleno
F_k	Výsledná síla působící na kolík	6 072	N	(26)
τ_{kK}	Napětí v krutu v hřídeli v místě kolíku	54,11	MPa	(35)
σ_d	Napětí v tlaku pod kolíkem	37,95	MPa	(36)
σ_{ekv}^{HMM}	Ekvivalentní napětí dle HMM	101,11	MPa	(37)
k	Koeficient bezpečnosti	3,73	-	(38)

$$\tau_{kK} = \frac{16 \cdot M_{kš}}{\pi \cdot D_1^3 \cdot (1 - 0,9 \cdot \frac{d_k}{D_1})} = \frac{16 \cdot 54,4}{\pi \cdot 0,02^3 \cdot (1 - 0,9 \cdot \frac{0,008}{0,02})} = 54,11 \text{ MPa} \quad (35)$$

$$\sigma_d = \frac{F_k}{a_k \cdot D} = \frac{6\,072}{0,008 \cdot 0,02} = 37,95 \text{ MPa} \quad (36)$$

$$\sigma_{ekv}^{HMH} = \sqrt{\sigma_d^2 + 3 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{37,95^2 + 3 \cdot 54,11^2} = 101,11 \text{ MPa} \quad (37)$$

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{ekv}^{H-M-H}} = \frac{355}{101,11} = 3,51 \quad (38)$$

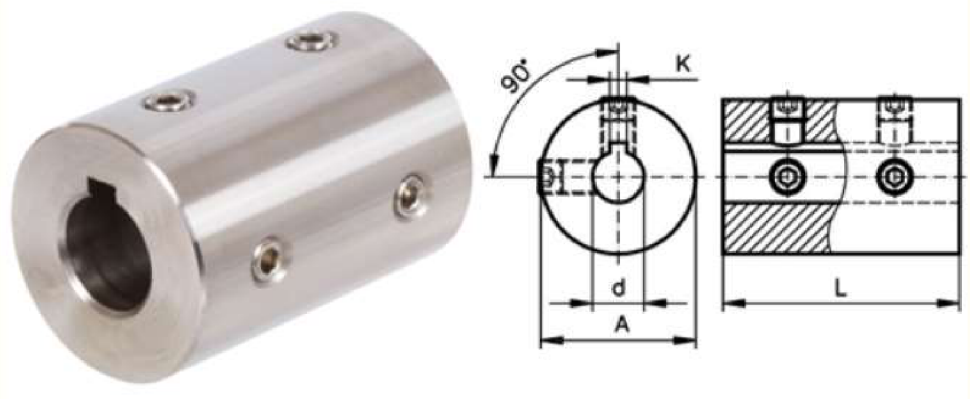
Jak již bylo uvedeno, pro hřídel bylo využito identické pero jako v případě zakoupené převodovky o rozměrech 6×6×28 mm. Dá se tak přepokládat, že by toto pero mělo zvládnout přenášet maximální krouticí moment převodovky nicméně pro ujištění byla vypočtena minimální délka pera (39). Dovolенý tlak byl zvolen dle dostupné literatury [40] pro neposuvný ocelový náboj. Z výsledné minimální délky je tak patrné, že délka pera, zvolená výrobcem převodovky, je pro danou aplikaci zcela dostatečná.

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
p_D	Dovolенý tlak u pera	120	MPa	[40]
a	Výška pera	6	mm	[40]
d	Průměr hřídele	20	mm	zvoleno
$l_{p \min}$	Minimální délka pera	15,1	mm	(39)

$$l_{p \min} = \frac{4 \cdot M_{kš}}{p_D \cdot a \cdot d} = \frac{4 \cdot 54,4}{120 \cdot 10^6 \cdot 0,006 \cdot 0,02} = 15,11 \text{ mm} \quad (39)$$

5.6.3. Spojka mezi spojovacím hřídelem a převodovkou

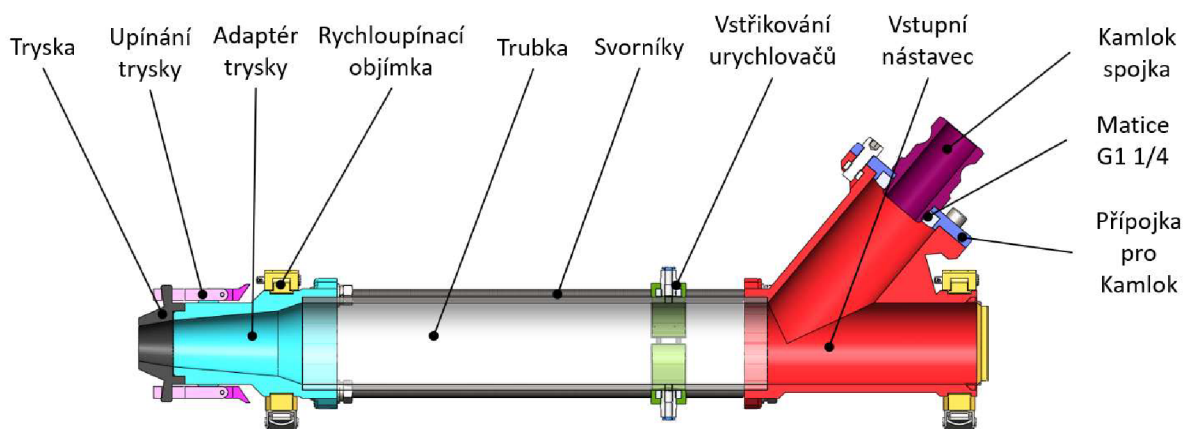
Tato spojka spojuje spojovací hřídel s planetovou převodovkou. Vzhledem k tomu, že výstupní hřídel zakoupené převodovky je již od výrobce opatřen drážkou pro pero, viz Obr. 5.3 vpravo, bylo usouzeno, že i spojovací hřídel by měl být ideálně vybaven tímto spojovacím systémem. Axiální síly od šneku jsou na spojovacím hřídeli zachytávány ložisky, ve kterých je uložen. Díky tomuto řešení je pak mezi spojovacím hřídelem a hřídelem převodovky přenášen pouze krouticí moment. V souladu s těmito okolnostmi tak může být mezi hřídeli použita jednoduchá pevná hřídelová spojka s drážkou pro pero. Po průzkumu možností vyráběných spojek byla nalezena vhodná spojka pro tuto aplikaci. Jedná se o pevnou spojku s drážkou od firmy AMECO, viz Obr. 5.21. Tato spojka je navíc opatřena čtyřmi šrouby otočenými vůči sobě o 90°. Díky těmto šroubům bude možné jejich dotažením proti hřídeli axiálně zafixovat pozici spojky na hřídeli. V případě navrženého ložiskového domku bude spojka nejprve nasazena a utažena na hřídeli převodovky. Následně bude převodovka zasunuta do ložiskového domku a spojka tak bude nasazena na spojovací hřídel, který bude rovněž osazen perem. Po zasunutí už ale spojka nebude přístupná, tudíž její axiální fixace bude pouze na hřídeli převodovky. Vzhledem k předpokládaným minimálním zatížením tohoto spoje lze ale považovat toto axiální zajištění za dostatečné.



Obr. 5.21 Pevná hřídelová spojka s drážkou pro pero od firmy AMECO [46]

5.7. Návrh pracovní části hlavy

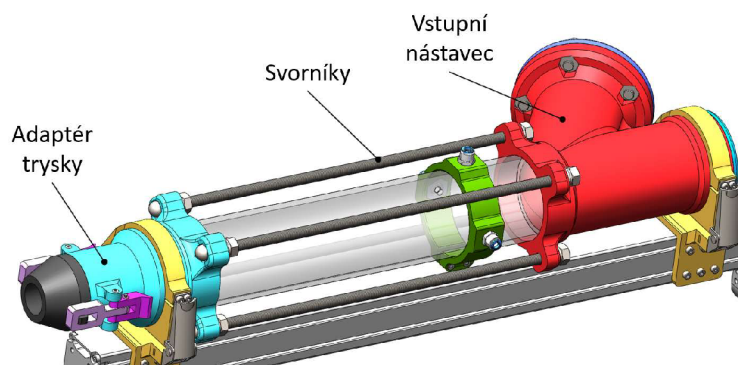
V rámci teoretické rešerše bylo nalezeno několik možných provedení pracovní části hlavy. Jako nejčastější řešení se vyskytuje celokovové (nejčastěji svařované) provedení hlavního pracovního válce. Toto řešení je výhodné zejména pro svou velkou únosnost a životnost. Zásadní nevýhodou, a v tomto případě i důsledkem proč nebylo pro návrh nanášecí hlavy právě toto řešení zvoleno, je vyšší hmotnost takové konstrukce a současně horší možná upravitelnost v případě potřeby. S ohledem na výše uvedené okolnosti byla zvolena plastová konstrukce, která bude tvořena vstupním nástavcem, pracovním válcem a adaptérem pro trysky, viz. Obr. 5.22. Vstupní nástavec spojuje samotný pracovní prostor válce se vstupem stavební směsi z čerpacího systému nebo ze zásobníku směsi. Následně směs vstupuje do pracovního válce. V horní části pracovního válce jsou pak po obvodu umístěny injektážní vstříky, které vstříkují do směsi urychlovač tuhnutí. Pracovní válec je pak zakončen adaptérem trysky. Adaptér trysky je uzpůsoben tak, aby bylo možné jednoduše měnit typ nebo velikost trysky dle potřeby.



Obr. 5.22 Pracovní část hlavy

Pro spojení jednotlivých základních součástí (vstupního nástavce, trubky, adaptéru trysky) bylo zvažováno několik provedení. Jako pracovní válec byla zvolena čirá trubka z PMMA o vnitřním průměru 70 mm a tloušťce stěny 5 mm. Dle dostupné literatury [33] bylo zjištěno, že vůle mezi šnekem a pracovním válcem (nebo žlabem) by se měla v případě šnekového dopravníku pohybovat od 5 do 10 mm. Z tohoto důvodu byl zvolen vnitřní průměr trubky o 10 mm větší, než je průměr šneku. Hlavní výhodou použití této trubky je, že v průběhu míchání směsi šnekem bude možné pozorovat chování směsi ve válci. S ohledem na poměrně malou otěruvzdornost PMMA se dá předpokládat, že po čase dojde k obroušení povrchu a snížení jeho průhlednosti. Nicméně v úvodní testovací fázi by bylo významně praktické mít možnost pozorovat chování směsi ve válci. Další nespornou výhodou je bezesporu nízká hmotnost.

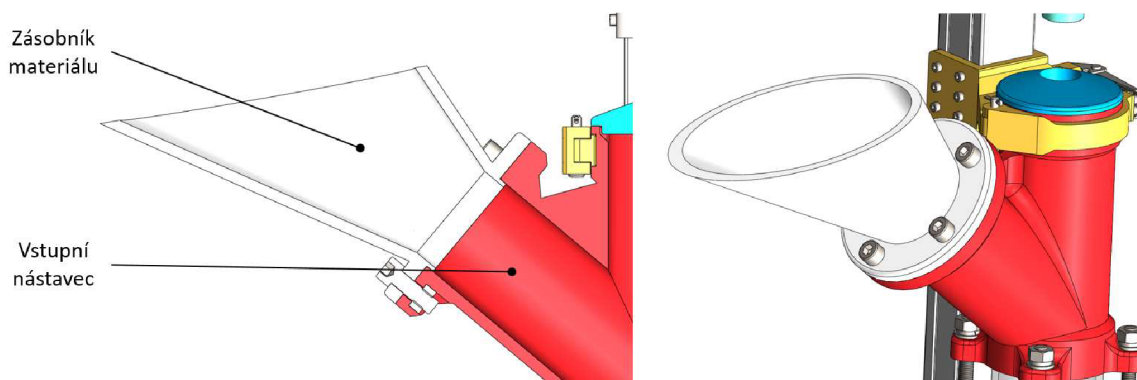
Vstupní nástavec i adaptér směsi byly navrženy tak, aby je bylo možné vyrobit pomocí aditivních technologií. Pro jejich spojení s trubkou bylo zvažováno několik možností. Původně bylo uvažováno například o spojení vruty do plastu po obvodu jednotlivých součástí. V tomto případě však vznikl problém s možnými zásahy vrutů do pracovního prostoru válce. Dalším problémem byla relativně krátká zašroubovaná (nosná) plocha závitu. Dalším zvažovaným způsobem spojení bylo lepení. Jednotlivé součásti by mohly být po obvodu slepeny. Vzhledem ke kvalitě spojů vytvořenými moderními lepidly se jevílo toto řešení jako možné východisko. Zásadní nevýhodou tohoto spoje by pak ale byla nemožnost jednoduchého a nedestrukčního demontování jednotlivých komponentů v případě potřeby. Nakonec byla zvolena konstrukce, kdy je na jeden konec trubky nasazen do příslušného osazení adaptér trysky a na druhý vstupní nástavec. Tyto komponenty jsou pak spojeny svorníky, viz Obr. 5.23. Jako svorníky budou použity závitové tyče. V adaptéru budou tyče pevně zašroubovány v uzavřených maticích. Následně budou tyto závitové tyče z druhé strany předepruty druhou maticí, aby samotný svorník byl zajištěn proti samovolnému povolání. Pro zajištění matic bude ještě pod maticí umístěna standardní podložka v kombinaci s pružnou podložkou. V horní části pak bude vstupní nástavec přišroubován ke svorníkům dalšími maticemi. Utažením těchto matic dojde k předeprnutí trubky. Tím bude zajištěna její fixace mezi adaptérem a vstupním nástavcem. Výhodou tohoto řešení je zejména spolehlivé spojení jednotlivých komponent a současně zajištění jednoduché demontáže pracovní části hlavy v případě potřeby.



Obr. 5.23 Zvolená konstrukce se svorníky

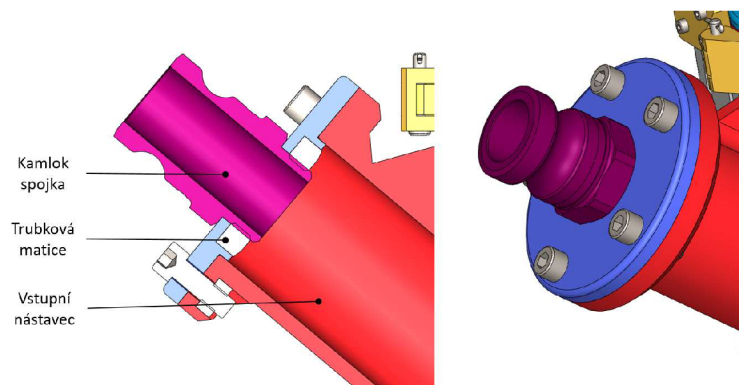
5.7.1. Vstup materiálu do pracovní části

Materiál do pracovní části vstupuje přes vstupní nástavec. Tento nástavec je opatřen přírubou s vloženými maticemi pro přišroubování potřebných komponent. Jedním z požadavků na vyvíjenou nanášecí hlavu je možnost provozu jak v režimu ručního doplňování materiálu do hlavy, tak v režimu automatického čerpání směsi např. z maltového čerpadla. Pro případ ručního doplňování byl navržen jednoduchý zásobník ve tvaru kónické nálevky, který bude možno jednoduše namontovat na vstupní nástavec. Do tohoto zásobníku pak bude možné přidávat menší množství směsi (například za účelem provedení testovacího tisku), viz Obr. 5.24.



Obr. 5.24 Vstupní nástavec opatřen zásobníkem

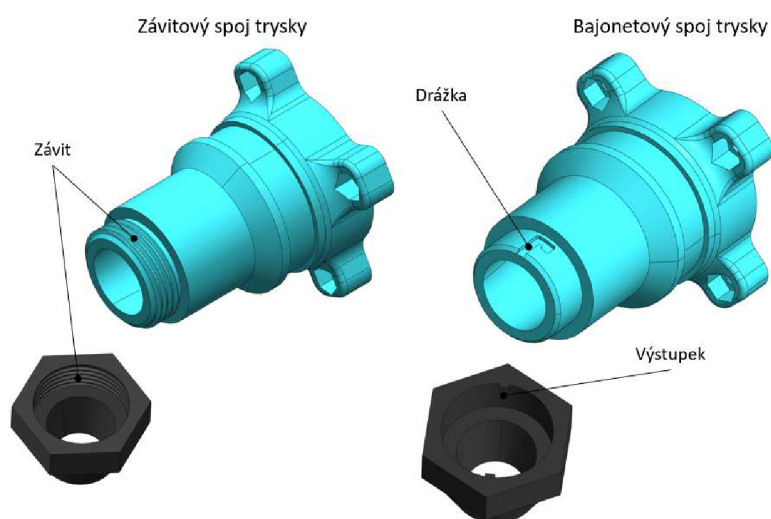
V případě provozu nanášecí hlavy v kombinaci s maltovým čerpadlem byl navržen přípojný díl s hadicovou spojkou. Pro vyvíjené zařízení PM bylo již nalezeno míchací čerpadlo duo-mix connect. Toto zařízení používá pro připojení hadic určených pro čerpání betonu systém hadicových rychlospojek Kamlok DN 35. Z tohoto důvodu byla přípojná část pro hadici vybavena právě šroubením pro tento typ spojky. V samotném dílu je pak toto šroubení našroubováno do vložené matice s trubkovým závitem G 1 ¼, viz Obr. 5.25.



Obr. 5.25 Uchycení spojky Kamlok

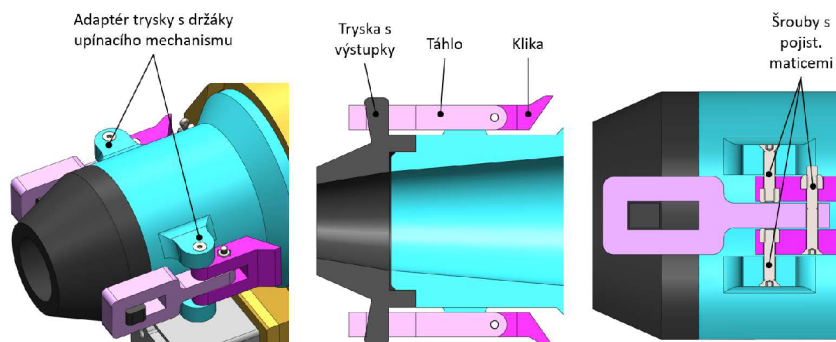
5.7.2. Systém uchycení trysek

Pro nanášecí hlavu byl zvolen systém výměnných trysek. Díky tomu tak bude možnost tisku různé šířky tiskových stop, ale například i užití atypických tvarů trysek. U tohoto komponentu bude nutné zajistit jednoduchou výměnu obsluhou. Jako možný systém upínání bylo zvažováno použití závitů, bajonetového spoje nebo přezkového mechanismu. Všechny tyto mechanismy je možné v relativně dobré kvalitě vytisknout na 3D tiskárně. V případě závitů by byl samotný profil závitů vymodelován přímo v prostředí CAD, viz Obr. 5.26 vlevo. Bajonetový spoj by obnášel tvarovou drážku v adaptéru trysky s výstupkem na trysce, viz Obr. 5.26 vpravo. K uchycení by pak došlo nasunutím trysky na adaptér trysky tak, aby výstupek byl veden v drážce. Následně by pak potočením trysky došlo v důsledku navedení výstupku do šroubově vedené drážky k přitažení trysky. Oba tyto systémy uchycení by byly relativně jednoduché na výrobu, protože se dají vyrobit přímo prostřednictvím 3D tisku. Hlavním důvodem, proč ale nebyl ani jeden z těchto systémů pro upínání trysek zvolen, je náchylnost obou těchto systémů na přítomnost nečistot. Například v případě zanesení závitů nebo drážky bajonetového spoje stavební směsí by zcela určitě došlo k omezení správné funkce spoje.



Obr. 5.26 Možnosti uchycení trysek

Na základě těchto okolností byl nakonec pro upínání trysek vybrán systém přezkového mechanismu, viz Obr. 5.27. Tento mechanismus se skládá z jedné kliky a táhla. Jako čepy mezi klikou a táhlem byly zvoleny zápustné šrouby v kombinaci s maticí. Ačkoliv se může jevit použití prvků se závitem jako os otočných prvků nevhodné, s ohledem na velmi malé zatížení celého mechanismu je však toto řešení bez problému použitelné. Samotná tryska je pak po obvodu opatřena výstupky pro zachycení otočných táhel. Montáž pak bude probíhat nasunutím trysky na adaptér a zachycením výstupků na trysce do ok táhel. Následně dojde otočením kliky k napnutí táhla a tím i k předepnutí celého spoje. Tím je zaručena velmi rychlá i spolehlivá výměna trysky i v případě přítomnosti nečistot. Z důvodu předpětí jsou např. v CAD sestavě tyto komponenty ve vzájemné kolizi (Obr. 5.27), protože je nutné počítat s deformací materiálu v důsledku tohoto předpětí. Tryska bude v tomto případě kruhového průřezu. Při návrhu trysky byl také brán ohled na plynulý přechod mezi adaptérem a samotnou tryskou, aby zpracovávaná směs měla co nejplynulejší průchod celým systémem.

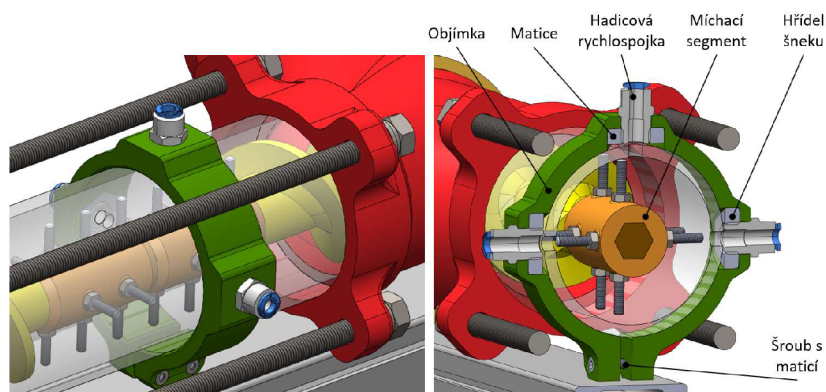


Obr. 5.27 Zvolený upínací mechanismus trysek

5.7.3. Vstřikování urychlovačů tuhnutí

Jako vedlejší funkce, kterou bude nanášecí hlava realizovat, je vstřikování a následné vmíchávání urychlovačů tuhnutí do směsi. Díky tomu tak bude možné zajistit včasné ztuhnutí směsi po její vytlačení z trysky. Tato funkce bude realizována pomocí třech injektážních otvorů po obvodu horní poloviny trubky. Pro upevnění hadic k pracovnímu válci bude použito rychloupínacích nástrčných spojek, které jsou používány pro hadice se stlačeným vzduchem. K uchycení těchto spojek byla navržena 3D tištěná svěrná objímka, která je po obvodu opatřena otvory pro zašroubování spojek. Z vnitřní stěny objímky pak budou šestihřanné otvory pro zasunutí matic s trubkovým závitem pro zašroubování spojek. Následně bude objímka nasunuta na trubku tak, aby otvory ve spojkách byly soustředné s otvory vyvrtanými do trubky. Poté bude objímka na místě stažena pomocí šroubu. Následně mohou být přivedeny hadice do kterých bude z externího čerpacího systému vlačována tekutina urychlující tuhnutí směsi. Pro zajištění správné funkčnosti tohoto systému je nutné, aby hadice byla prostrčena skrz spojku a aby její konec byl z části zasunut až v samotném prostoru pracovního válce.

Díky tomu pak bude zajištěno, že zpracovávaná směs nevnikne do mechanismu spojky a nedojde tak k narušení správné funkce spojek. Jak již bylo uvedeno, v místě, kde bude vstřikována urychlovací tekutina tuhnutí, bude možné šnek vybavit míchacím segmentem pro dobré vmíchání urychlovačů tuhnutí do směsi.



Obr. 5.28 Vstřikování urychlovačů tuhnutí směsi

5.7.4. Rychloupínací systém

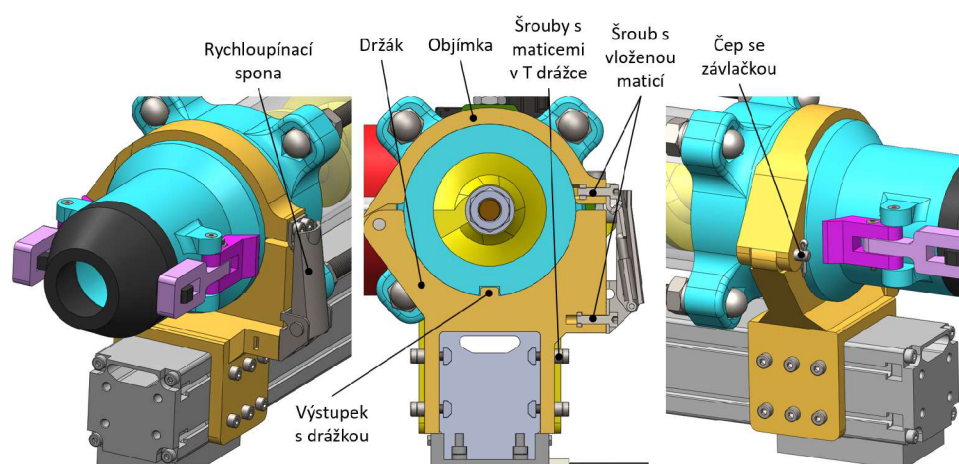
Jako již bylo několikrát zmíněno, s ohledem na co nejlepší údržbu celé nanášecí hlavy bude potřeba zajistit, aby celá pracovní část byla relativně jednoduše demontovatelná z lineární osy zařízení PM. Původně byly zvažovány některé průmyslově vyráběné rychloupínací systémy. V rámci průzkumu průmyslově vyráběných řešení pak byly nalezeny například objímky pro uchycení trubek, viz Obr. 5.29 vlevo. S ohledem na vnější válcovitý tvar navržené hlavy se jevílo toto řešení jako vhodné. Nevýhodou však bylo, že pro samotné sevření je používáno šroubového spoje. Toto řešení by již mohlo být poněkud méně praktické než například pákový rychloupínací mechanismus.



Obr. 5.29 Objímka na trubku (vlevo) [47], rychloupínací spona od firmy KIPP (vpravo) [48]

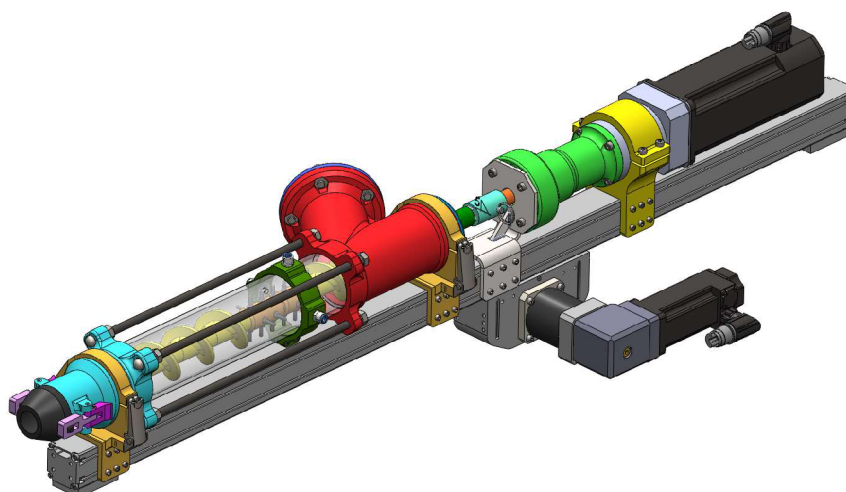
Po dalším hledání možností upínání byl nalezen systém rychloupínacích spon. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že samotná objímka bude vyrobena prostřednictvím aditivních technologií a samotné sevření bude realizováno prostřednictvím zakoupené rychloupínací spony K0046.1420721 od firmy KIPP, viz Obr. 5.29 vpravo. Navržený rychloupínací se tak bude skládat z 3D tištěného držáku, který bude připevněn k tištěnému profilu prostřednictvím šroubů, které budou zašroubovány do T matic, umístěných do T drážky profilu.

Držák bude z vnitřní části opatřen výstupkem, aby byla vymezena vhodná poloha pracovní části v objímkách. Součástí tohoto komponentu pak bude přišroubovaný upínací mechanismus (spona) s nastavitelným předpětím upínání. Pro přichycení pracovní části pak bude vyrobena 3D tištěná objímka. Tato objímka bude rotačně spojena s držákem pomocí čepu, zajištěného závlačkou. Na druhém konci bude objímka vybavena protikusem pro zachycení táhla rychloupínací spony. Díky použití spony s nastavitelnou délkou táhla bude možné nastavit vhodnou upínací sílu v objímce dle potřeby přímo na stroji. To se jeví jako zásadní výhoda v případě, kdy již dojde k částečné deformaci plastové objímky v důsledku dlouhodobého působení mechanického napětí, která by mohla mít za následek nesprávnou funkci svěrného spoje. Dodatečným nastavením rychloupínací spony tak bude možné obnovit správnou funkci spoje. Výsledné řešení je pak zobrazeno na Obr. 5.30.



Obr. 5.30 Rychloupínací systém pracovní části

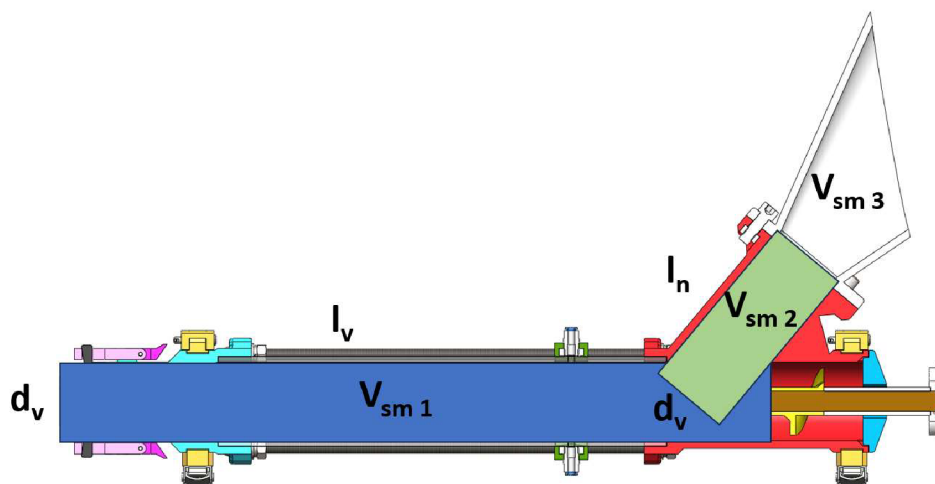
5.8. Výsledný návrh



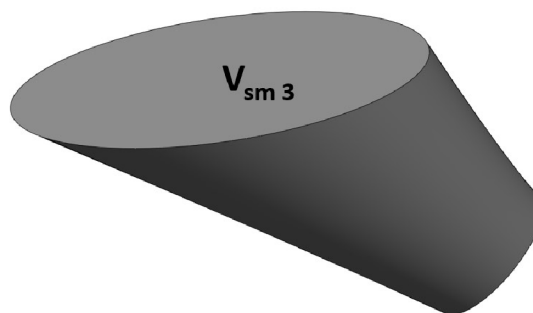
Obr. 5.31 Celkový pohled na navrženou nanášecí hlavu

5.8.1. Hmotnostní bilance navržené hlavy

Několikrát zmíněným limitujícím parametrem navržené nanášecí hlavy v této práci je celková hmotnost. Celková hmotnost hlavy se skládá z hmotnosti jednotlivých komponent a hmotnosti vytlačované stavební směsi, která zaplní nanášecí hlavu (včetně zásobníku), viz rov. (42). V průběhu návrhu nanášecí hlavy byly v prostředí CAD jednotlivým komponentům přiřazovány skutečné materiály. Díky tomu bylo možné získat souhrnnou hmotnost všech komponent hlavy přímo z CAD softwaru. V tomto případě hmotnost samotné prázdné hlavy činí 14,6 kg. V případě hmotnosti směsi bylo zapotřebí určit maximální možný objem směsi v hlavě. Vyšší hmotnost směsi bude v případě použití nanášecí hlavy v konfiguraci se zásobníkem směsi, proto byl výpočet maximální hmotnosti proveden právě v této konfiguraci. Objem směsi se tak skládá z objemu pracovního válce po vstupní nástavec, dále objemu vstupní části nástavce a objemu zásobníku. Pro zjednodušení výpočtu budou první dva zmíněné objemy uvažovány jako plné válce směsi a např. objem vřetena šneku bude vzhledem k podílu na celkovém objemu pracovního válce zanedbán, viz Obr. 5.32. Objem zásobníku pak bude zjištěn přímo z prostřední CAD pomocí vytvoření 3D modelu objemu zaplněné směsi, viz Obr. 5.33.



Obr. 5.32 Jednotlivé objemy směsi v hlavě



Obr. 5.33 3D model objemu směsi v zásobníku

Nejprve byla vypočtena hmotnost směsi v hlavě, viz rov. (40) a (41). Pro výpočet byla použita hustota betonu nalezená v literatuře.[40] Nutno podotknout, že v případě výpočtu objemu pracovního válce byla použita jistá zjednodušení, díky kterým je vypočtený objem rozhodně větší než reálný. Z tohoto důvodu vypočtená maximální hmotnost hlavy je vyšší než reálná maximální hmotnost. Po získání přibližné hmotnosti směsi v hlavě mohla být vypočtena celková hmotnost hlavy, viz rovnice (42). Jako limitující hmotnost při návrhu hlavy byla v zadání stanovena hodnota 35 kg. Z tohoto důvodu je celková provozní hmotnost 21,4 kg naprosto vyhovující a dostatečně pod maximálním hmotnostním limitem.

Značka	Parametr	Hodnota	Jednotka	Zdroj
ρ_{sme}	Hustota betonu	2 200	kg m ⁻³	[40]
d_v	Vnitřní průměr pracovního válce	70	mm	kap. 5.7
l_v	Délka pracovního válce po vstupní nástavec	632	mm	CAD
l_n	Délka vstupní části nástavce	15,1	mm	CAD
m_{hl}	Hmotnost prázdné nanášecí hlavy	14,6	kg	CAD
m_{sme}	Hmotnost směsi v hlavě	6,8	kg	(41)
m_c	Celková provozní hmotnost nanášecí hlavy	21,4	kg	(42)

$$m_{sme} = \rho_{sme} \cdot (V_{sm1} + V_{sm2} + V_{sm3}) = \rho_{sme} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \cdot l_v + \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \cdot l_n + V_{sm3} \right) \quad (40)$$

$$m_{sme} = 2\,200 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,07^2}{4} \cdot 0,632 + \frac{\pi \cdot 0,07^2}{4} \cdot 0,173 + 1,14 \cdot 10^{-9} \right) = 6,8 \text{ kg} \quad (41)$$

$$m_c = m_{hl} + m_{sme} = 14,6 + 6,8 = 21,4 \text{ kg} \quad (42)$$

6. Diskuze navrženého řešení a naplnění cílů práce

V rámci praktické části této diplomové práce bylo vyvinuto konstrukční řešení nanášecí hlavy pro zařízení PM. Pro toto řešení byl zvolen koncept šnekové hlavy, kdy je tisknutá stavební směs čerpána do místa aplikace prostřednictvím šneku. Bylo tak rozhodnuto na základě faktu, že toto řešení přináší vhodnou kombinaci vlastností, které budou pro dané zařízení přínosné (relativně nízká hmotnost, možnost provozovat se zásobníkem i bez atd.). Samotná konstrukce se pak skládá z pohonné části, která bude pevnou součástí svislé lineární osy umístěné na konci robotického ramene zařízení PM. Díky tomu tak nebude zapotřebí při manipulaci s hlavou (např. z důvodu údržby) manipulovat i s těžkou pohonnou částí. V případě údržby (čištění po ukončení tisku) pak bude zapotřebí manipulace pouze s pracovní částí nanášecí hlavy, jejíž hmotnost se díky použitím velkého podílu plastových komponent pohybuje do 6 kg. Pro zajištění snadné obsluhovatelnosti jsou jednotlivé součásti, které je třeba často demontovat (pracovní část, trysky, spojka), vybaveny rychloupínacími systémy.

Samotná navržená konstrukce hlavy by měla bez problémů plnit svou základní funkci tj. nanášení zpracovávané stavební směsi. Současně je tato hlava vybavena systémem pro vmíchávání aditiv do směsi přímo v tiskové hlavě. Celá tato nanášecí hlava je modulární konstrukce a lze ji tak velice jednoduše upravit dle potřeb dalšího vývoje. Například tak bude možné v dalších fázích vývoje vybavit hlavu nekruhovými tryskami s hladítky (a s tím souvisejícím systémem otáčení trysky) nebo například systémem pro přidávání výztuže ve formě drátu. Tyto jednotlivé prvky nebyly s ohledem na požadavek co možná nejjednodušší konstrukce pro úvodní testy na zařízení PM v této práci prakticky realizovány. S tím se pojí také fakt, že návrh těchto pokročilejších funkcí by vyžadoval množství praktických testů na již fungujícím zařízení, které nebylo v době vypracování této diplomové práce k dispozici. Nicméně v teoretické části práce jsou nastíněny principy, které by bylo možné využít při realizaci těchto pokročilejších funkcí. Po zhodnocení výše uvedeného se dá předpokládat, že výsledné řešení by tak mohlo dobře plnit funkci prvního prototypu nanášecí hlavy pro zařízení PM.

Při zpětném ohlédnutí lze konstatovat, že hlavní cíl práce navrhnout nanášecí hlavu pro zařízení PM byl naplněn. Bylo tak provedeno po předchozím zhodnocení možných konceptů, seznámení se s projektem na který tato práce navazuje a definování základních parametrů nanášecí hlavy včetně možných nástaveb. Výstupem této práce je pak kompletní technická dokumentace pro výrobu funkčního prototypu. V rámci zadání bylo dále definováno vypracování podkladů pro odborných článků. Vzhledem k tomu, že v této diplomové práci je velmi podrobně popsán postup návrhu konstruované nanášecí hlavy, dá se samotná tato práce považovat za vhodný podklad pro vypracování odborného článku.

7. Závěr

Aditivní technologie, někdy zjednodušeně označované jako 3D tisk, se v poslední době prosazují v nejrůznějších odvětví průmyslu, ale i mimo něj. Jednou z oblastí, kde jsou tyto technologie stále v počátku vývoje, je oblast stavebnictví. A právě do této oblasti je zacílena tato diplomová práce. V rámci této práce byl popsán aktuální stav vývoje v oblasti 3D tisku ve stavebnictví, ale i výhled do budoucnosti. Dále zde byla popsána jednotlivá nalezená technická řešení nanášecích hlav. Po zhodnocení těchto koncepčních řešení bylo vybráno nejvhodnější, které bylo následně rozpracováno do podoby konstrukčního návrhu.

V této práci byl proveden kompletní konstrukční návrh prototypu nanášecí hlavy, která bude součástí již vyvinutého zařízení Printing Mantis. Navržené řešení odpovídá zadaným parametrům, které vyplývají přímo ze zadání diplomové práce nebo byly stanoveny v průběhu jejího řešení. Výsledná konstrukce pak kombinuje různá inovativní řešení, která byla nalezena při rešerši podkladů zabývajících se nejen problematikou 3D tisku ve stavebnictví, ale i jiných odvětví průmyslu. Navržené zařízení pak tvoří kompaktní celek těchto řešení, která umožňují naplnění zadaných parametrů nanášecí hlavy, a navíc je doplňuje například o dobrou obsluhovatelost a údržbu celého zařízení. Při návrhu samotné konstrukce bylo také přihlédnuto k aktuálnímu stavu technologických možností výroby strojních komponent, kdy byl u mnoha navržených součástí využit potenciál např. dnes již v průmyslu stále více využívaných aditivních technologií. Při návrhu všech částí navržené konstrukce byly zohledněny jak technologické, tak i ekonomické možnosti pracoviště, pro které byl tento konstrukční návrh prováděn (katedra výrobních systémů a automatizace). Výstup z této diplomové práce pak naplňuje zadání a hlavní cíle, které byly vytyčeny v úvodní části této diplomové práce.

Literatura a použité zdroje

- [1] 3D STAR [online]. [vid. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://www.fs.tul.cz/op-projekt-3d-star>
- [2] Fotodokumentace projektu 3D STAR
- [3] PERROT, Arnaud. 3D printing of concrete: state of the art and challenges of the digital construction revolution. London: ISTE, 2019. ISBN 978-1-78630-341-7.
- [4] GARET, Lucie. 3D printing for construction: What is Contour Crafting? 3D Printing Blog: Tutorials, News, Trends and Resources | Sculpteo [online]. [vid. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/06/27/3d-printing-for-construction-what-is-contour-crafting>
- [5] SALETTA, Morgan. The First Moon Base Will Be Printed. Discover Magazine [online]. [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.discovermagazine.com/the-sciences/the-first-moon-base-will-be-printed>
- [6] TIMES, Tasmanian. 3D Printed Homes Coming to Aus - Tasmanian Times [online]. 15. červen 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://tasmaniantimes.com/2022/06/3d-printed-homes-coming-to-aus/>
- [7] BAUMIT. Co je beton a co je potěr? baumit.cz [online]. [vid. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://baumit.cz/reseni/betonove-smesi/co-je-beton-a-co-je-poter>
- [8] ZÁMEČNÍK, Michal. 3D tisk z betonu ve stavebním průmyslu | Ebeton [online]. 17. březen 2022 [vid. 2023-01-30]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2022_1_4_3d-tisk-z-betonu-ve-stavebnim-prumyslu/
- [9] KOČÁRKOVÁ, Jaroslava. INFO@SABRE.CZ, Sabre, www sabre cz, e-mail: Geopolymery – materiál 21. století? Přinejmenším, tvrdí vědci | Technický týdeník [online]. 19. květen 2020 [vid. 2023-02-01]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/geopolymery-material-21-stoleti-prinejmensim-tvr-di-vedci_50361.html
- [10] Směšovací čerpadla - omítací stroje. m-tec [online]. [vid. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.m-tec.cz/vyrobky/technika-na-stavenisti/stroje/smesovaci-cerpadla/>
- [11] ToughTek P30HT Bare Rotor Stator Pump System, 230V, 30A, 1Ph [online]. [vid. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.graco.com/us/en/contractor/product/25m032-toughtek-p30-ht.html>

- [12] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. Konstrukce robotů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7.
- [13] SERVICES, ICE Industrial. ICE Coral. ICE Industrial Services [online]. [vid. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.ice.cz/en/ice-coral>
- [14] 3D Potter - Real Clay 3D Ceramic Printers. 3D Potter [online]. [vid. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://3dpotter.com>
- [15] World leader in 3D construction printing | COBOD International [online]. [vid. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://cobod.com/>
- [16] MM Desk. COBOD enables interior Malaysia to get its first 3D Printed House. Machine Maker [online]. 28. říjen 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://themachinemaker.com/technology/cobod-enables-interior-malaysia-to-get-its-first-3d-printed-house>
- [17] EVERETT, Hayley. WASP showcases 3D printed bio-building at „We Are Nature” event. 3D Printing Industry [online]. 1. říjen 2020 [vid. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/wasp-showcases-3d-printed-bio-building-at-we-are-nature-event-176687/>
- [18] Saudi Arabia Embraces 3D Printing Technology for Construction Work. SSF [online]. 11. srpen 2021 [vid. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://saudisc scaffolding.com/blog/saudi-arabia-embraces-3d-printing-technology-for-construction-work/>
- [19] Concrete 3D Printer Delta WASP 3MT CONCRETE [online]. [vid. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.3dwasp.com/en/concrete-3d-printer-delta-wasp-3mt-concrete/>
- [20] Constructions-3D - L'imprimante 3D de bâtiments. Constructions-3D [online] [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.constructions-3d.com>
- [21] ADMIN. Concreteo3D Homepage. Concreteo3D [online]. [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://concreteo3d.com/?lang=en>
- [22] 3D Printed Concrete Is Key to This Smart Wall | The Cool Parts Show #40 [online]. 2022 [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=W7t3hRBvRww>
- [23] POST, Brian K., LOVE, Lonnie J., LIND, Randall F., CHESSER, Phillip C., ROSCHLI, Alex C.. Cable-driven additive manufacturing system [online]. US11230032B2. 25. leden 2022.[vid. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US11230032B2/en?q=US11230032B2>

- [24] 111. Betonářské ONLINE odpoledne na téma EXPERIMENTÁLNÍ VÝVOJ 3D TISKU V RÁMCI PROJEKTU 3D STAR [online]. 2022 [vid. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=aQTKRYVq1Dk>
- [25] LEAL DE SILVA, Wilson. 3D Concrete Printing - Technological issues in concrete mix design and extrusion [online]. In: . Danish technological institute, 2017, s. 13 [cit. 2018-04-14].
- [26] Cao, X.; Yu, S.; Cui, H.; Li, Z. 3D Printing Devices and Reinforcing Techniques for Extruded Cement-Based Materials: A Review. Buildings 2022, 12, 453. <https://doi.org/10.3390/buildings12040453>
- [27] NOSKIEVIČ, Jaromír. Vřetenová čerpadla. Praha: SNTL, 1961.
- [28] VOJÁČEK, Antonín. Principy průmyslových čerpadel – 8.díl - vřetenová čerpadla | Automatizace.HW.cz [online]. [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-8dil-vretenova-cerpadla>
- [29] Additive manufacturing: KR QUANTEC provides support for 3D concrete printing. KUKA AG [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/ende/company/press/news/2021/05/besix-3d>
- [30] MOLITCH-HOU, Michael. Olaf Diegel's Mobile Concrete 3D Printer. 3D Printing Industry [online]. 30. červenec 2015 [vid. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-guitarmaker-leads-students-in-building-mobile-concrete-3d-printer-54546/>
- [31] KAUPPILA, Ille. 3D Concrete Printing – The Ultimate Guide | All3DP Pro [online]. [vid. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-concrete-printing-guide/>
- [32] LOUDA, Ondřej. Využití technologického odpadu polyamidu 12 z technologie Multi Jet Fusion pro vstřikované díly vystavené atmosférickému stárnutí. Liberec, 2021. TUL. Bakalářská práce
- [33] DRAŽAN, František a Karel JEŘÁBEK. Manipulace s materiálem. Praha: SNTL, 1979.
- [34] Šnekové dopravníky [online]. [vid. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://spido.cz/snekove#pid=8>
- [35] Dopravníky šnekové | Aweld [online]. [vid. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.aweld.net/cs/dopravniky-snekove>
- [36] SLAVÍČEK, Jakub. Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk velkorozměrových dílů z betonové směsi. Brno., 2018. VUT. Bakalářská práce

- [37] SORDYL, Martin. Vertikální šnekový dopravník. Brno., 2017. VUT. Bakalářská práce
- [38] Tabulka hodnot úhlu DELTA pro různá rozhraní | Tření mezi zemínou a rubem konstrukce | GEO5 | Online nápověda [online]. [vid. 2023-03-19]. Dostupné z:
<https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/tabulka-hodnot-uhlu-delta-pro-ruzna-rozhrani-01/>
- [39] HOŠEK, Stanislav. Katodová ochrana železobetonových konstrukcí. ASB Portal [online]. 11. leden 2012[vid. 2023-05-13]. Dostupné z:
<https://www.asbportal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/katodova-ochrana-zelezobetonovych-konstrukci>
- [40] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. Strojnické tabulky 1. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-312-6.
- [41] MOP_prehled_vlastnosti_S235JR.pdf [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z:
https://bbolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_prehled_vlastnosti_S235JR.pdf
- [42] Čep s hlavou DIN 1444B 16x45x39x4 pozink | Prumex.cz [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.prumex.cz/cep-s-hlavou-din-1444b-16x45x39x4-pozink/>
- [43] KIPP-Zástrčné čepy s klíčovým kroužkem [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Produkty/Ovl%C3%A1dac%C3%AD-prvky-normovan%C3%A9-d%C3%ADly/Pru%C5%BEen%C3%A9-tla%C4%8Dn%C3%A9-op%C4%9Brky-areta%C4%8Dn%C3%AD-%C4%8Depy-%C4%8Depy-s-kuli%C4%8Dkami/Z%C3%A1str%C4%8Dn%C3%A9-%C4%8Depy/Z%C3%A1str%C4%8Dn%C3%A9-%C4%8Depy-s-kl%C3%AD%C4%8Dov%C3%BDm-krou%C5%BEkem.html>
- [44] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. Strojnické tabulky 2. 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [45] Materiálový list oceli S355J2. Kovintrade [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z:
<https://www.kovintrade.cz/s355j2/>
- [46] Pevné spojky TR, nerez, s drážkou. Ameco, Maedler distributor [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://eshop.ameco.cz/products/cz/2593/g329/>
- [47] STABILO Sanitär Objímka na trubku 40 - 43 mm 1 1/4". DEMAshop.cz [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.demashop.cz/objimky-potrubi/stabilo-sanitar-objimka-na-trubku-40-43-mm-1-14-13739.html>

- [48] KIPP-Stahovací spony nastavitelné, viditelné otvory pro přišroubování, provedení A [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z:
<https://www.kipp.cz/cz/cs/Produkty/Ovl%C3%A1dac%C3%AD-prvky-normovan%C3%A9-d%C3%ADly/Stahovac%C3%AD-spony-z%C3%A1padkov%C3%A9-uz%C3%A1v%C4%9Bry/Stahovac%C3%AD-spony/Stahovac%C3%AD-spony-nastaviteln%C3%A9-otvory-pro-p%C5%99i%C5%A1roubov%C3%A1n%C3%AD-viditeln%C3%A9/Stahovac%C3%AD-spony-nastaviteln%C3%A9-viditeln%C3%A9-otvory-pro-p%C5%99i%C5%A1roubov%C3%A1n%C3%AD-proveden%C3%AD-A.html>

Seznam příloh

Příloha 1: Technické informace k použitému motoru

Příloha 2: Technický list použité převodovky

Volně vložené přílohy:

- **Hlavní sestavný výkres:** 1-KSA-21000240-00 SESTAVA NANÁŠECÍ HLAVY
- **Kusovník:** 4-KSA-21000240-00-SP KUSOVNÍK
 - **Výkres podsestavy svařence:** 4-KSA-21000240-01 DRŽÁK LOŽISKOVÉHO DOMKU
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-01-01 DRŽÁK
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-01-02 ŽEBRO
 - **Výkres podsestavy svařence:** 4-KSA-21000240-02 HŘÍDEL ŠNEKU SE SPOJKOU
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-02-01 HŘÍDEL ŠNEKU
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-02-02 KOLÍKOVÁ SPOJKA
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-00-01 SPOJOVACÍ HŘÍDEL
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-00-02 PRACOVNÍ VÁLEC
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-00-03 LOŽISKOVÝ DOMEK HORNÍ
 - **Výrobní výkres:** 4-KSA-21000240-00-04_LOZISKOVY_DOMEK_SPODNI

Příloha 1: Technické informace k použitému motoru

8LSA37.DA030S200-3

Technical Data	
Basic Information	
Downloads	
General information ▼	
Certifications	
CE	Yes
UL	cURus E360421 Servo and stepper motors - Component
Motor ▼	
Nominal speed n_N [rpm]	3000
Number of pole pairs	4
Nominal torque M_N [Nm]	3.4
Nominal power P_N [W]	1068
Nominal current I_N [A]	2.3
Stall torque M_0 [Nm]	3.6
Stall current I_0 [A]	2.5
Maximum torque M_{max} [Nm]	14.4
Maximum current I_{max} [A]	10.6
Maximum speed n_{max} [rpm]	9000
Torque constant K_T [Nm/A]	1.45
Voltage constant K_E [V/1000 rpm]	87.96
Stator resistance R_{SpH} [Ω]	6.98
Stator inductance L_{SpH} [mH]	37.5
Electrical time constant τ_{el} [ms]	5.4
Thermal time constant τ_{therm} [min]	38
Moment of inertia J [kgcm ²]	1.38
Weight without brake m [kg]	5.6
Holding brake ▼	
Holding torque of brake M_{br} [Nm]	4
Mass of brake [kg]	0.59
Moment of inertia of brake J_{br} [kgcm ²]	0.38
Recommendations ▼	
ACOPOS 8Vxxxxxx...	1045
ACOPOSmulti 8BVxxxx...	0028
ACOPOS P3 BExxxx...	4X5X
Cross section for B&R motor cables [mm ²]	0.75
Connector size	1
Options ▼	
Connection type	Single-cable solution
Connection direction	Swivel, SCS
Encoder	DA 2.2 inductive 32-line single-turn
Shaft end	Smooth shaft

8GP40-080 standard

Technical data



8GP40-080hh003klmm
 8GP40-080hh004klmm
 8GP40-080hh005klmm
 8GP40-080hh008klmm
 8GP40-080hh010klmm
 8GP40-080hh009klmm
 8GP40-080hh012klmm
 8GP40-080hh015klmm
 8GP40-080hh016klmm
 8GP40-080hh020klmm
 8GP40-080hh025klmm
 8GP40-080hh032klmm
 8GP40-080hh040klmm
 8GP40-080hh064klmm
 8GP40-080hh100klmm

Gearbox															
Number of gear stages	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Gear ratio i	3	4	5	8	10	9	12	15	16	20	25	32	40	64	100
Nominal output torque T_{2N} [Nm]	85	115	110	50	38	130	120	110	120	120	110	120	110	50	38
Max. output torque T_{2max} [Nm]	136	184	176	80	61	208	192	176	192	192	176	192	176	80	61
E-stop torque T_{2stop} [Nm]	180	240	220	190	200	260	240	220	240	240	220	240	220	190	200
Idle torque [Nm] at 20°C and 3000 rpm	0.35	0.35	0.25	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.15
Max. average drive speed $n_{IN50\%}$ [rpm] at 50% T_{2N} and S1	4000	3900	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Max. average drive speed $n_{IN100\%}$ [rpm] at 100% T_{2N} and S1	2700	2500	3000	4000	4000	3050	3750	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Max. drive speed n_{1max} [rpm]	7000														
Max. backlash J_t [arcmin]	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Reduced backlash J_r [arcmin] less than	0														
Torsional rigidity C_{2T} [Nm/arcmin]	6	6	6	6	6	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Tilting rigidity C_{2K} [Nm/arcmin]	0														
Max. breakdown torque M_{2Kmax} [Nm]	0														
Max. radial force F_{rmax} [N] for 30,000 h	650														
Max. radial force F_{rmax} [N] for 20,000 h	750														
Max. axial force F_{amax} [N] for 30,000 h	900														
Max. axial force F_{amax} [N] for 20,000 h	1000														
Operating noise L_{pA} [dB(A)]	60														
Efficiency at full load η [%]	96	96	96	96	96	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
Min. operating temperature $B_{Ttempmin}$ [°C]	-25														
Max. operating temperature $B_{Ttempmax}$ [°C]	90														
Mounting orientation	Any														
Protection	IP54														
Weight m [kg]	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
Moment of inertia J [kgcm ²]	0.77	0.52	0.45	0.39	0.39	0.74	0.72	0.71	0.5	0.44	0.44	0.39	0.39	0.39	0.39

NOTE – Output torque / Max. output torque: This refers to an output shaft speed of $n_2 = 100$ rpm and application factor $K_A = 1$ as well as S1 operating mode for electrical machines and $T = 30^\circ\text{C}$, depending on the diameter of the motor shaft. The maximum output torque is only permissible for 30,000 revolutions!

NOTE – E-stop torque: Approved for 1000x

NOTE – Axial / radial force: With reference to the middle of the output shaft, the entries refer to an output shaft speed of $n_2 = 100$ rpm and application factor $K_A = 1$ as well as S1 operating mode for electrical machines and $T = 30^\circ\text{C}$

NOTE – Running noise: Noise level at a distance of 1 m; at an output speed of $n_1 = 3000$ rpm without a load; $i = 5$

NOTE – Operating temperature: With reference to the middle of the housing surface

NOTE – Weight: Planetary gearbox including universal flange (specific weight upon request)