



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONSTRUKCE PODAVAČE PRÁŠKU PRO MULTI-MATERIÁLOVÝ KOVOVÝ 3D TISK

POWDER FEEDER DESIGN FOR MULTI-MATERIAL METAL 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Kulda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Filip Grygar

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Martin Kulda
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Filip Grygar
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce podavače prášku pro multi–materiálový kovový 3D tisk

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době je na Ústavu konstruování vyvíjeno zařízení pro nanášení více druhů kovových prášků pro kovový SLM 3D tisk. Samotné zařízení je vybaveno jen malým zásobníkem na kovový prášek a v průběhu tisku je potřeba jej dosypávat. Z toho důvodu je potřeba vyvinout automatický způsob doplňování prášku a implementovat ho do tiskové komory 3D tiskárny.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout způsob doplňování kovového prášku do zásobníků. a případně upravit samotné zásobníky.

Díličí cíle bakalářské práce:

- zpracovat rešerši dávkovacích zařízení a vhodných sensorových systémů,
- navrhnout doplňovací systém,
- odevzdat 3D data a případné skripty,
- realizace jednotlivých uzlů zařízení

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

WILSON, Jon S. Sensor Technology Handbook. 1. Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 0750677295.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7729-5.X5040-X>.

PLISKA, Jan. VÝVOJ MULTIMATERIÁLOVÉHO 3D TISKU KOVOVÝCH DÍLŮ TECHNOLOGIÍ SLM. B.m., 2020. BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.

ANDRIANI, C., K. C CHUA a H. Z LIU. Review on Melting of Multiple Metal Materials in Additive Manufacturing. In: Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing. ISBN 978-981-09-0445-6. Dostupné z: doi:10.3850/978-981-09-0446-3_134

SEIDEL, Christian a Christine ANSTÄTT. Next Step in Laser-Based Powder Bed Fusion - Multi Material Processing. Laser Technik Journal. ISSN 16137728. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201690025

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje problematice multi-materiálového kovového 3D tisku, konkrétně způsobu přenosu materiálu mezi zásobníky a nanášení prášku na pracovní plochu. Cílem této bakalářské práce je návrh, realizace a otestování dávkovacího zařízení na doplňování nanášecí hlavy pro multi-materiálový 3D tisk kovu a optimalizací konstrukce samotné nanášecí hlavy.

Na základě rešerše byly vypracovány koncepční návrhy, jež podstoupily řadu testů. Výsledky těchto testů vedly k vypracování konkrétního konstrukčního řešení, zahrnujícího jak nanášecí hlavy, tak dávkovací zařízení. Tato řešení byla následně realizována a otestována na klíčové funkce.

Realizované řešení umožňuje spolehlivý přesun materiálu jak mezi zásobníky, tak i na pracovní plochu. Umožňuje také jednoduchou a rychlou výměnu samotných zásobníků v případě tisku jiné sady materiálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, LPBF, multi-materiál, prášek

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of multi-material metal 3D printing, specifically the method of material transfer between containers and powder application on the work surface. The aim of this bachelor thesis is to design, implement and test a dispensing device for refilling the coating head for multi-material metal 3D printing and to optimize the design of the coating head itself.

Based on the research, conceptual designs were developed and subjected to a series of tests. The results of these tests led to the development of a specific design solution, including both the coating head and the dispensing device. These solutions were subsequently implemented and tested for key functions.

The implemented solution enables reliable material transfer between containers as well as to the work surface. It also allows easy and quick exchange of the magazines themselves in case of printing a different set of materials.

KEYWORDS

3d printing, LPBF, multi-material, powder

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KULDA, Martin. *Konstrukce podavače prášku pro multi-materiálový kovový 3D tisk*. Online, Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Filip Grygar. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157447>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Filipa Grygara a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Martin Kulda

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Filipu Grygarovi za jeho věcné a odborné rady, ochotu, a čas strávený konzultací této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

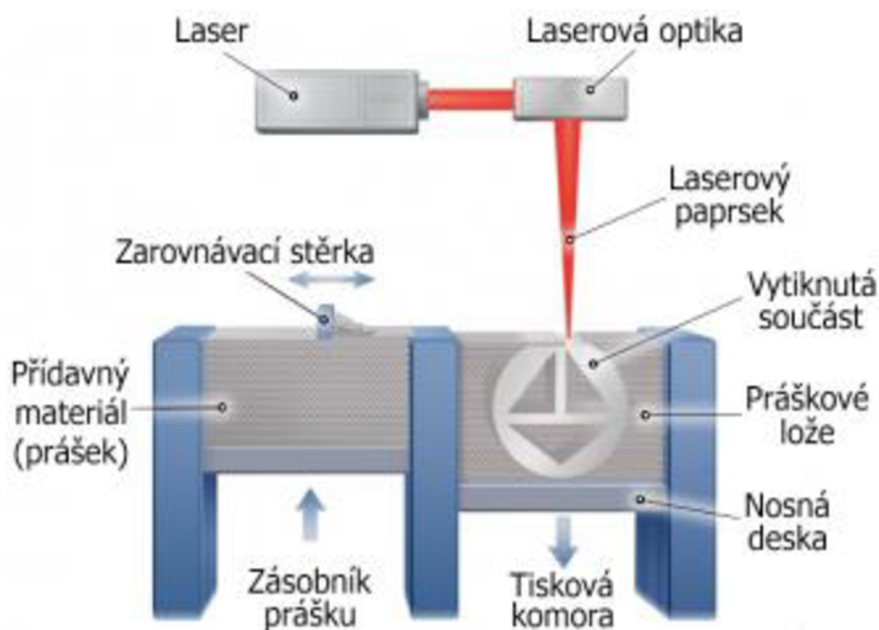
OBSAH

Úvod	11
1 Výchozí stav zařízení	12
2 Senzorové systémy	13
2.1 Tenzometrické senzory	14
2.2 Fotoelektrické senzory	15
2.3 Senzory kontinuity	16
2.4 Ultrazvukové senzory	16
3 Řízení toku materiálu	18
3.1 Lineární solenoid	18
3.2 Lineární solenoid s aretací	19
3.3 Servomotor	19
4 Řídící jednotka arduino	20
5 Koncepční řešení hlídání hladiny v zásobníku.....	21
5.1 Senzory kontinuity	21
5.1.1 Návrh senzoru kontinuity	21
5.1.2 Testování senzoru kontinuity	22
5.2 Fotoelektrické senzory	22
5.2.1 Návrh fotoelektrických senzorů.....	22
5.2.2 Testování fotoelektrických senzorů.....	23
6 Koncepční řešení dávkování materiálu	24
6.1 Dávkování na pracovní plochu	24
6.1.1 Lineární solenoid	24
6.1.2 Servomotor	25
6.2 Přesun materiálu mezi zásobníky	26
6.2.1 Jehlový ventil.....	26
6.2.2 Rotační dávkovací systém	27
6.2.3 Testování rotačního dávkovacího systému.....	27
7 Testování aretační síly hlavy	29
8 Konstrukční řešení nanášecí hlavy	31
8.1 Sestava nanášecí hlavy.....	31
8.2 Základní deska	32
8.3 Zdvihací mechanismus	32
8.3.1 Lineární vedení	33
8.3.2 Magnetická aretace a kalibrační mikrometr	33
8.3.3 Servomotor zdvihu	34
8.4 Hlavní zásobníky a nosné profily	35
8.5 Systém pro sledování hladiny materiálu	36
8.6 Ovládání a vedení jehlového ventilu	36

9	Konstrukční řešení přídatných zásobníků	38
9.1	Zásobníky a vedení jehly	39
9.2	Dávkovací zařízení	39
9.3	System pro výměnu zásobníků	40
10	Testování realizovaného prototypu	41
10.1	Senzorový systém	41
10.2	Dávkování nanášecí hlavy	41
10.3	Dávkování přídatných zásobníků	42
11	Závěr.....	43
	Použité informační zdroje	44
	Seznam použitých zkratk a symbolů	46

ÚVOD

Metoda LPBF (Laser Powder Bed Fusion), neboli laserové tavení založené na práškové lóži, představuje techniku 3D tisku kovu, při které se výrobek formuje pomocí intenzivního laserového záření a jemného prášku, nanášeného ve formě tenkých vrstev. Tyto vrstvy jsou aplikovány pomocí zarovnávací stěrky, která přenáší kovový prášek ze zásobníku do tiskové komory. Po nanášení vrstvy je tvar požadovaného obrazce vypálen do nanášené vrstvy pomocí silného laseru, viz Obr. 1-1. Touto metodou lze vyrábět i tvarově složité prvky, které nejsou možné vyrobit jinými konvenčními metodami. Metoda ale umožňuje nanášení pouze jednoho druhu materiálu [11].



Obr. 1-1 Základní schéma 3d tisku metodou LPBF [12]

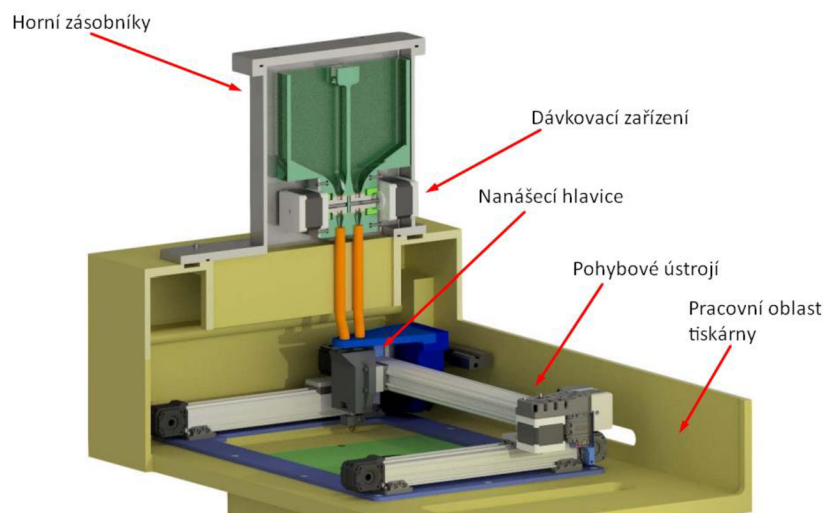
Tato metoda aditivních technologií umožňuje tisk kovových a nekovových materiálů jako jsou například měď, směsi na bázi železa, niklu nebo titanu. V současné době jsou všechny LPBF tiskárny (až na výjimky) schopny tisknout jen jeden typ materiálu v rámci jednoho výtisku. Dalším logickým krokem ve vývoji této technologie je proto možnost nanášet více druhů materiálu v rámci jednoho výtisku, což by znamenalo významné rozšíření aplikací, při kterých by metoda multi-materiálového tisku kovu mohla najít své uplatnění.

Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh a konstrukce nanášecí hlavičky, která by umožňovala nanášení dvou druhů materiálu (železa a mědi) v rámci jednoho výtisku. Společně k této hlavičce je potřeba vytvořit i hlavní zásobníky, které by doplňovaly nanášecí hlavičku potřebným materiálem. Zařízení zároveň musí obsahovat potřebné senzory pro vytvoření automatického systému, který se bude starat o doplňování materiálu do nanášecí hlavičky.

1 VÝCHOZÍ STAV ZAŘÍZENÍ

V metodě multi-materiálového 3D tisku kovu je nutné nanášet více druhů materiálu v jedné vrstvě, tím pádem není možné využít zarovnávací stěrky ani zásobníku prášku, které jsou používány při jedno-materiálovém tisku. Zásobník umožňuje uchování pouze jednoho druhu materiálu, a tím pádem není možné touto metodou nanášet více typů materiálů v jedné vrstvě. Materiál je tedy nutné na pracovní plochu nanášet alternativním způsobem. Jednou z možností je využití nanášecí hlavy, která má vlastní pohybové vedení a je umístěna v pracovní komoře tiskárny.

Touto metodou se již v minulosti zabývali studenti VUT a z jejich prací vzniklo zařízení umožňující multi-materiálový tisk. V současné době je právě toto zařízení umístěno v laboratořích SLM na VUT FSI. Zařízení obsahuje dva samostatné zásobníky s tryskami, ze kterých je materiál dávkován na pracovní plochu, viz Obr 1-2. Tato nanášecí jednotka obsahuje také potřebné senzory, které vyhodnocují množství materiálu v samotných zásobnících a v případě nedostatku materiálu upozorní obsluhu, která musí materiál doplnit [18].



Obr. 1-2 Nanášecí hlava s pohybovým vedením v pracovním prostoru tiskárny [13]

Jednou z velkých nevýhod této verze zařízení je jeho nespolehlivé a nerovnoměrné nanášení prášku. Důvodem je malá tuhost zařízení a také nedokonalost konstrukce dorazu, který umožňuje kalibraci nanášecí hlavy vůči tiskové podložce. Je proto potřeba celou sestavu zpevnit, například použitím jiných materiálů při výrobě, a zdokonalit konstrukci dorazu. Druhou nevýhodou je přehřívání dávkovacího zařízení, které slouží k dávkování prášku na pracovní plochu. Tento problém je často příčinou selhání tisku, protože při vyšších teplotách začne zařízení ztrácet přesnost dávkování, nebo úplně selže a dávkovací ventil se neuzavře, případně neotevře.

Celé nanášecí zařízení je umístěno v tiskárně SLM280HL. Spolupráce nanášecího zařízení a tiskárny je nutná, protože jedno bez druhého nefunguje. Zařízení nanese požadované materiály na pracovní plochu a tiskárna poté pomocí laseru vypálí požadovaný tvar do naneseného materiálu. Tiskárna také udržuje v celém svém prostoru ochrannou atmosféru, aby při vypalování laserem nedocházelo k oxidaci materiálu [18].

2 SENZOROVÉ SYSTÉMY

Součástí této bakalářské práce je vytvoření automatizovaného systému na sledování stavu materiálu. Tento systém obsahuje množství senzorů, které jsou klíčové pro správné fungování celého zařízení. Účelem této kapitoly je seznámit se s problematikou senzorových systémů, jejich typy a základními principy fungování.

Principem senzorových systémů je detekce změny v okolním prostředí a převod těchto změn na elektrické signály, které může zpracovat počítač nebo jiné elektronické zařízení. Sensory reagují na různé fyzikální změny, jako jsou například teplota, tlak, osvětlení, pohyb nebo zvuk [1].

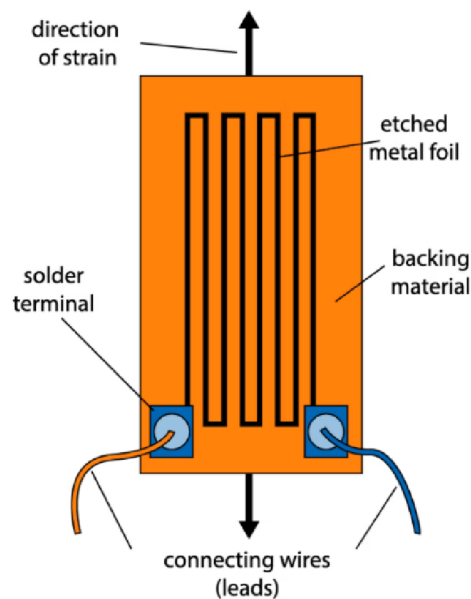
Sensory jako takové můžeme rozdělit dle několika kritérií. Základním kritériem pro klasifikaci těchto systémů je rozdělení na aktivní a pasivní. Aktivní senzor potřebuje externí buzení, jinými slovy musí být napájený pomocí vnějšího zdroje energie. Příkladem tohoto typu senzoru mohou být senzory založené na změně odporu, jako jsou termistory, tenzometrické snímače, nebo například RTD (resistance temperature detectors). Aby bylo možné určit hodnotu změřenou těmito senzory, musí jimi protékat proud a zároveň měřit odpovídající napětí. Na rozdíl od aktivních senzorů, pasivní senzory nepotřebují žádné vnější napájení a jejich výstupní signál je generován samotnými senzory. Zástupci těchto senzorů jsou například termočlánky a fotodiody, jež generují termoelektrické napětí, které není závislé na externích odvodech a zapojení [1].

Dalším kritériem pro rozdělení může být jejich výstupní signál. Tento signál dělíme na analogový a digitální, podle jeho charakteristiky. Analogové senzory vytvářejí spojitý signál, který je úměrný velikosti měřené veličiny. Nejčastěji se tyto senzory používají pro měření tlaku, intenzity světla, hlasitosti zvuku, teploty atd. Tyto vnější faktory jsou pomocí senzoru převáděny na analogový signál, jenž má nejčastěji rozpětí od 0 do 5 V. Nevýhodou analogových senzorů oproti digitálním je šum, který může často způsobovat problémy s jejich používáním, a je tedy potřeba signály filtrovat. Naopak digitální senzory produkují diskrétní hodnoty, často označované jako digitální nebo binární signály (0 a 1). Tím, že pracují s diskrétními hodnotami, digitální senzory spotřebovávají méně energie na své fungování a prakticky nevykazují šum, což je významný rozdíl oproti analogovým senzorům [2].

V další části této bakalářské práce bude uvedeno pár typů senzorů, které by mohly být použity při monitorování stavu naplnění zásobníků pro kovový prášek.

2.1 TENZOMETRICKÉ SENZORY

Tyto senzory pracují na základě převodu deformace snímače na analogový elektrický signál. Skládají se z tenkého vodiče nalepeného na základnu (nosič) senzoru (Obr. 2-1), který je pomocí speciálních lepidel přilepen na měřenou součást. Nejčastěji je používán tenzometr fóliový, kde základnu tvoří tenká fólie z polyamidu, nebo sklem vyztuženého fenolového filmu [3][4]. Při správném umístění těchto senzorů na měřenou součást jsou vodiče v senzoru při deformaci prodlužovány a tím mění svůj elektrický odpor. Tuto změnu odporu můžeme pomocí externích zařízení měřit. Jejich hlavním příkladem použití jsou snímače zatížení (hmotnostní čidla), měření deformace objektů, měření zatížení nosníků, mostů apod. [4].



Obr. 2-1 Schéma jednoosého tenzometrického snímače [3]

Tenzometrické senzory mohou být používány jako samostatné jednotky, které se lepí přímo na testovaný povrch. Tento postup se často volí v případě vyvíjení prototypů a v případech, kde nehrozí poškození samotných senzorů. Druhou možností je využití těchto senzorů společně s kovovými pouzdry, do kterých je senzor zabudován. Pouzdra jsou zpravidla určena k přichycení pomocí montážních otvorů pro šrouby, tudíž není potřeba je lepit na měřenou součást. Instalace a případná demontáž je tak jednodušší. Pouzdro může také tvořit ochranný obal kolem senzoru, viz Obr. 2-2. Není potom tak náchylný na poškození od vnějších jevů jako je vlhkost, znečištění a mechanické poškození [4].



Obr. 2-2 Tenzometrický senzor pro průmyslové použití [4]

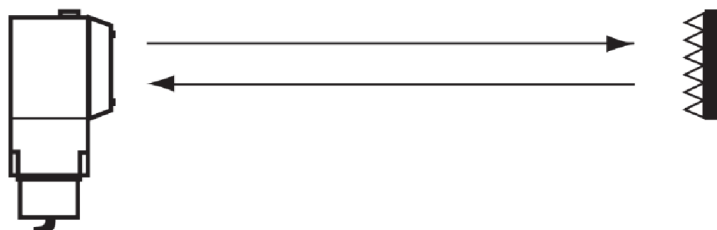
2.2 FOTOLEKTRICKÉ SENZORY

Fotoelektrické senzory jsou schopny reagovat na přítomnost různých typů objektů, bez ohledu na jejich velikost, průhlednost, povrchovou úpravu nebo pohybový režim. Tyto senzory jsou schopny detekovat cíle v rozsahu vzdálenosti od několika milimetrů až do 100 metrů [1].

Fotoelektrické senzory fungují ve dvou základních konfiguracích. Prvním typem je konfigurace, kdy jsou vysílač a přijímač na stejné straně. V tomto případě je světelný paprsek odražen od reflexní plochy a dopadá zpět na přijímač, viz Obr. 2-4. Druhým typem je konfigurace, kdy jsou vysílač a přijímač přímo proti sobě, viz Obr. 2-3. V obou případech vysílač vysílá světelný paprsek, který je zachycen přijímačem. Když je tento paprsek přerušen, přijímač signalizuje "přerušeni" [1].



Obr. 2-3 Použití přímé detekce bez reflexní plochy [1]



Obr. 2-4 Použití senzoru s reflexní plochou [1]

Světelným zdrojem v emitoru je modulovaná LED dioda. Tento světelný zdroj, může být infračervený, červený nebo zelený, a je aktivován krátkými impulsy vysokého proudu. Tato konfigurace umožňuje generování vysokoenergetických impulsů, což dává senzoru schopnost snímat objekty na velké vzdálenosti a provádět detekci v náročných podmínkách. Toto pulzování zároveň zajišťuje nízkou energetickou spotřebu [1].

V přijímači senzoru je umístěn fototranzistor, který generuje napětí při osvětlení světlem. Fototranzistory jsou preferovány díky jejich optimální spektrální shodě s LED diodou, rychlé reakci a teplotní stabilitě. Ladění obvodů přijímače tak, aby reagovaly na úzká frekvenční pásma pulzace LED diody, umožňuje senzoru reagovat i za vysokého okolního osvětlení a v prostředí s elektrickým šumem. Dále je možné optimalizovat reakci senzoru na určité fáze pulzního paprsku, což zvyšuje jeho schopnost detekce [1].

2.3 SENZORY KONTINUITY

Jednoduchý způsob sledování hladiny materiálu v zásobnících využívá princip vodivosti měřeného materiálu. Tento postup zahrnuje měření kontinuity, které lze snadno provést i pomocí multimetru, viz Obr. 2-5. Při měření odporu mezi dvěma body v obvodu se sleduje, zda naměřená hodnota klesne pod stanovenou hranici, obvykle kolem 40Ω . Pokud k tomu dojde, měřicí obvod to vyhodnotí jako kontinuitu, což je signalizováno například zvukovým signálem u multimetru [17].

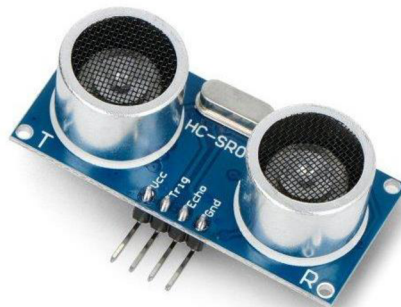


Obr. 2-5 Nastavení multimetru Fluke pro měření kontinuity [17]

Senzory fungující na tomto principu mají obvykle digitální výstup. Pokud je obvod propojen, senzor generuje digitální 1. V případě, že dojde k rozpojení obvodu, například kvůli úbytku materiálu ve sledovaném prostoru, senzor svůj výstup nastaví na digitální 0. Tyto senzory mají tedy prakticky nulový šum, který je jinak často nutné zohledňovat u analogových senzorů.

2.4 ULTRAZVUKOVÉ SENZORY

Ultrazvukové senzory pracují na principu vysílání ultrazvukových vln a jejich zpětné registraci po odrazení od měřeného povrchu. Senzor určuje vzdálenost k cíli měření časovými intervaly mezi vysláním a přijetím ultrazvukového signálu [9]. Existují dva typy tohoto senzoru. Prvním je konfigurace, kde má vysílač i přijímač vlastní součástku v obvodu, viz Obr. 2-6. Druhým typem je konfigurace, kde je vysílač i přijímač spojen do jednoho prvku, viz Obr. 2-7. Tento typ je často používán například jako parkovací čidlo u automobilů.



Obr. 2-6 Ultrazvukový senzor s odděleným vysílačem a přijímačem [15]



Obr. 2-7 Ultrazvukový senzor kombinovaný [14]

Senzory pracují v několika frekvenčních intervalech. Průmyslové ultrazvukové senzory, které měří vzduchem, obvykle vysílají v rozmezí 30 kHz až 500 kHz. Senzory s nízkou frekvencí (do 80 kHz) jsou účinnější a častěji používané pro měření větších vzdáleností. Senzory s vyšší frekvencí (80-500 kHz) jsou naopak používány pro měření kratších vzdáleností. Důvodem tohoto rozdělení je fyzikální vlastnost zvuku. Vyšší frekvence zvukových vln při šíření se vzduchem slábnou rychleji, než frekvence nižší. Proto jsou nižší frekvence (do 80 kHz) používány pro větší vzdálenosti [9].

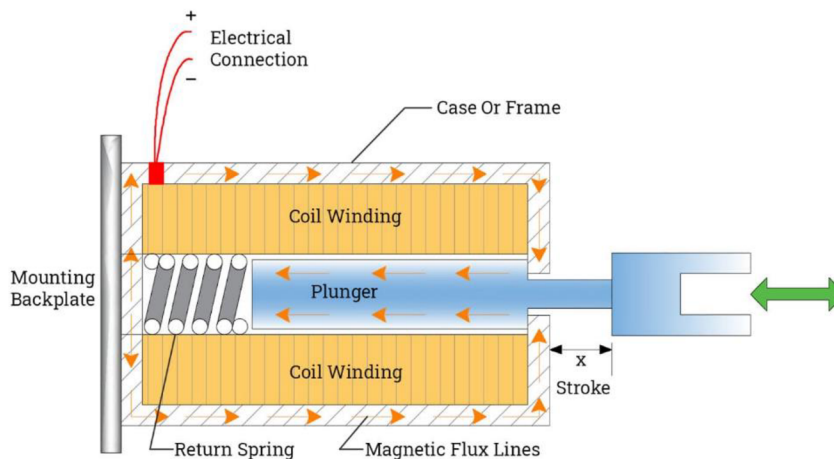
Výhodou těchto senzorů je možnost jejich fungování v prašném a zakouřeném prostředí. Mohou také spolehlivě fungovat za tmy a nezáleží ani na barvě měřeného materiálu. Nevýhodou jsou jejich větší rozměry v porovnání například se senzory fotoelektrickými nebo senzory kontinuity. Tyto senzory také nemohou měřit materiály, které pohlcují zvukové vlny, jako je například vlna. [10].

3 ŘÍZENÍ TOKU MATERIÁLU

Materiál je na pracovní plochu dávkován prostřednictvím trysky, která je uzavíratelná pomocí elektropohonu. Trysku je nutné řídit elektrickým signálem vyslaným řídicí jednotkou.

3.1 LINEÁRNÍ SOLENOID

Základním principem fungování všech lineárních solenoidů je převod elektrického proudu na mechanický pohyb, v tomto případě na pohyb lineární. Při přivedení proudu do toho zařízení se v něm pomocí cívky indukují magnetická síla, která přitáhne či odtlačí jádro solenoidu. Po odpojení od napětí se jádro vrátí do původní pozice pomocí vratné pružiny, často umístěné uvnitř těla solenoidu, viz Obr. 3-1 [5].



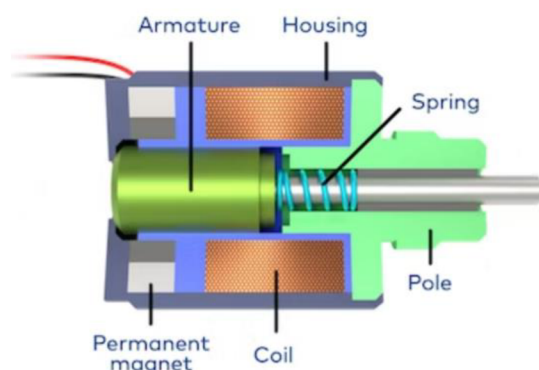
Obr. 3-1 Lineární solenoid s vratnou pružinou [6]

Při použití lineárních solenoidů je důležité brát v úvahu jejich pracovní cyklus, který je ovlivněn tepelnými vlastnostmi cívky. Při přivedení napětí na cívku dochází k jejímu zahřívání, což může v krajních případech vést k přehřátí cívky a nevratnému poškození celého zařízení.

Pracovní cyklus lineárního solenoidu se vyjadřuje v procentech a označuje poměr mezi dobou, po kterou je solenoid v aktivním režimu (kdy je napětí přivedeno na cívku) a dobou, po kterou probíhá jeden celý cyklus (doba zapnutí + doba vypnutí) [8]. Je důležité zajistit, aby pracovní cyklus byl řádně dimenzován v souladu s požadavky aplikace. Příliš vysoký pracovní cyklus může způsobit přehřátí cívky a snížení spolehlivosti solenoidu.

3.2 LINEÁRNÍ SOLENOID S ARETACÍ

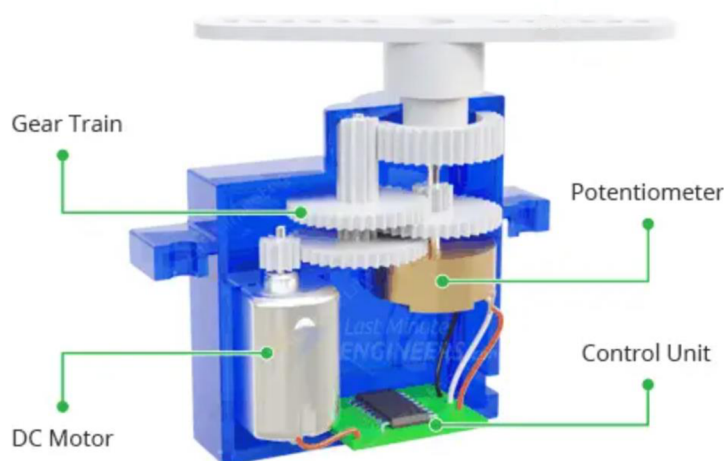
Lineární solenoid s aretačním magnetem funguje na stejném principu jako běžný solenoid. Na rozdíl od běžného solenoidu se ale po odpojení napájení od cívky jádro nevrací do původní polohy pružinou, ale zůstává ve stejné poloze díky aretačnímu magnetu, umístěnému v těle zařízení, viz Obr. 3-2. Při připojení obrácené polarity napětí se jádro vrátí do původní polohy [5]. Stačí tedy pouze krátké elektrické impulzy na přepínání mezi stavy solenoidu. To může být užitečné v systémech, kdy je potřeba minimalizovat spotřebu energie či případně omezit generování tepla.



Obr. 3-2 Lineární solenoid s aretačním magnetem [6]

3.3 SERVOMOTOR

Servomotory jsou speciálními typy elektromotorů, které dokáží přesně nastavit natočení své výstupní hřídele, podobně jako krokové motory. Tyto zařízení jsou nedílnou součástí různých aplikací od aut na dálkové ovládání až po průmyslové stroje. Skládají ze tří základních částí, stejnosměrného elektromotoru s převodovým mechanismem, potenciometru a řídicího obvodu, viz Obr. 3-3 [21].



Obr. 3-3 Řez servomotorem [22]

Potenciometr je připojen přímo k výstupní hřídeli motoru a dokáže tak odečítat její přesnou polohu. Řídicí jednotka porovnává požadovaný úhel a úhel získaný prostřednictvím potenciometru a v případě potřeby roztočí elektromotor v požadovaném směru, aby došlo k nastavení správného úhlu [21].

4 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA ARDUINO

Řízení celého nanášecího zařízení umožňuje programovatelná deska Arduino. Existuje mnoho typů těchto desek, jako například Arduino UNO, Nano, Micro, Mega, atd. Liší se v počtu vstupních a výstupních pinů, ve velikosti vnitřní paměti, nebo například v rychlosti procesoru. Jejich základní myšlenka je ale vždy stejná [16]. Základní funkce těchto zařízení je možné rozšířit i například bezdrátovým rozhraním WiFi nebo Bluetooth, jako je třeba v případě desky na Obr. 4-1. Jedná se o ARDUINO UNO WiFi REV2, a obsahuje vedle základního mikro-kontroléru také čipy umožňující již zmíněné bezdrátové připojení k ostatním zařízením [19].



Obr. 4-1 Programovatelná deska ARDUINO UNO WiFi REV2 [19]

Programovatelná deska v sobě potřebuje mít nahraný skript, pomocí kterého vyhodnocuje přijímané informace. Tento skript je vytvořen například pomocí softwaru Arduino IDE (v podobě řádků kódu), který je potom nahrán na samotnou desku. Velkou nevýhodou těchto zařízení je, že po nahrání skriptu do zařízení již není možné tento skript dostat zpět, neboli není možné tento nahraný kód upravovat, pokud operátor nemá jeho kopii [16].

K desce je nutné připojit vstupní periferie, jako jsou senzory, přepínače, potenciometry, pohybové čidla, atd. Deska na základě nahraného programu vyhodnocuje stav těchto periférií a podle toho nastavuje stav připojených výstupních zařízení. Mezi často používané výstupní zařízení patří například displeje, LED, elektromotory, krokové motory, ventily nebo relé moduly [20].

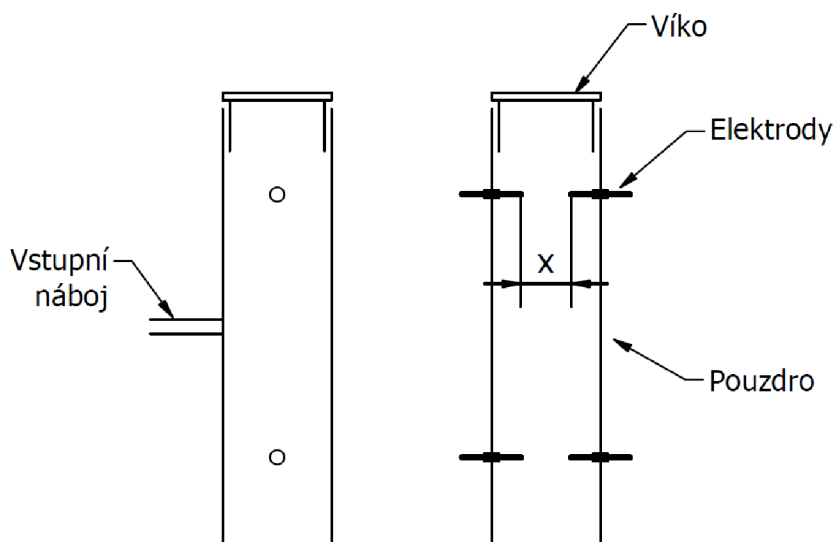
5 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ HLÍDÁNÍ HLADINY V ZÁSOBNÍKU

V této kapitole byly vytvořeny tři koncepční návrhy pro hlídání množství materiálu v zásobníku v pracovním prostoru. Zásobníky v pracovní části jsou v průběhu tisku doplňovány a je proto nutné znát jejich úroveň naplnění. Tento systém je kritický pro správné fungování celého nanášecího zařízení, a je proto velmi důležité zajistit jeho spolehlivé a přesné měření.

5.1 SENZORY KONTINUITY

5.1.1 NÁVRH SENZORU KONTINUITY

V tomto návrhu jsou do zásobníku přivedeny dva páry elektrod (v horní a spodní části zásobníku, viz Obr. 5-1). Prototyp je naplněn materiálem tak, aby došlo k zasypání elektrod a pomocí externího obvodu je měřena kontinuita mezi jednotlivými páry.



Obr. 5-1 Prototyp na testování kontinuity

Prototyp je připevněn na krokový motor Nema 17 přímo na výstupní hřídel motoru, která koná pouze rotaci vždy o 180 stupňů. Cílem testování tohoto prototypu je ověření, že při zasypání elektrod materiálem dojde spolehlivě k uzavření elektrického obvodu. Dále je při testování tohoto prototypu měřena ideální vzdálenost mezi elektrodami (označena jako „x“).

Tato metoda je vhodná pro sledování pouze vodivých materiálů. Velkou výhodou je jednoduchost implementace tohoto systému, malá zastavená plocha a také možnost přímého zapojení systému na programovatelnou desku. Není tak nutné řešit další obvodové desky nutné k řízení tohoto systému.

Nevýhodou této metody může představovat riziko vzniku elektrického výboje při kontaktu materiálu s měřicí elektrodou. V případě tohoto výboje by mohlo dojít ke vznícení jemného prášku v tiskové komoře stroje. Je tedy žádané volit co nejmenší možné napětí, které by umožňovalo spolehlivé výsledky.

5.1.2 TESTOVÁNÍ SENZORU KONTINUITY

Konstrukce tohoto systému vycházela z předpokladu, že prášek používaný pro tisk je vodivý. Nicméně během testování bylo zjištěno, že prášek má na svém povrchu pasivační vrstvu, která znemožňuje měření pomocí kontinuity. Pasivační vrstva slouží především k optimalizaci sypných vlastností materiálu, ale svým elektrickým odporem brání v přímém elektrickém spojení.

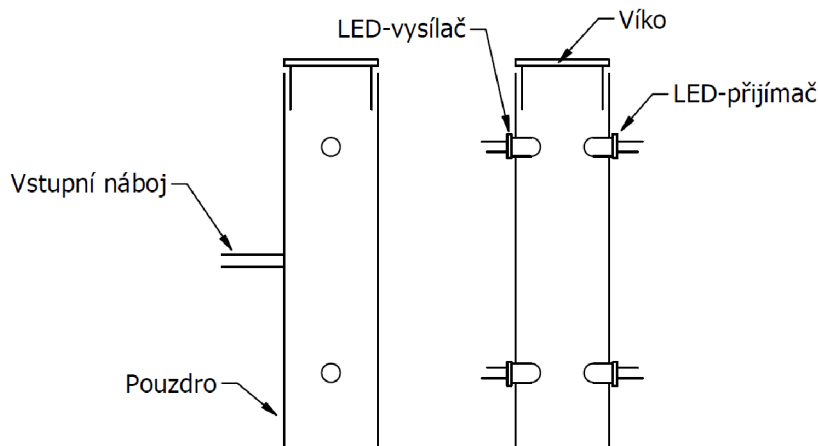
Při prvním testování bylo použito napětí 5 V a vzdálenost mezi elektrodami byla 20 mm. Po neúspěšném pokusu bylo napětí postupně zvyšováno až na 30 V, což bylo maximální napětí limitované použitým laboratorním zdrojem. Navíc byly elektrody přiblíženy na vzdálenost 0,5 mm, avšak ani v této blízkosti nedošlo k jejich propojení.

Při dalším pokusu zvýšit napětí, s využitím jiného zdroje, hrozilo riziko vzniku elektrického výboje, což by mohlo vést k vznícení testovaného prášku. Z tohoto důvodu bylo od tohoto koncepčního řešení upuštěno.

5.2 FOTOELEKTRICKÉ SENZORY

5.2.1 NÁVRH FOTOELEKTRICKÝCH SENZORŮ

Prototyp funguje na stejném principu jako při měření kontinuity, ale elektrody jsou nahrazeny diodami na obou stranách zásobníku, viz Obr. 5-2. V tomto případě dioda vysílá světelný paprsek a snímací dioda na opačné straně zásobníku na něj reaguje. V případě zasypaní diody materiálem dojde k přerušování světelného paprsku a to systém dále vyhodnocuje.



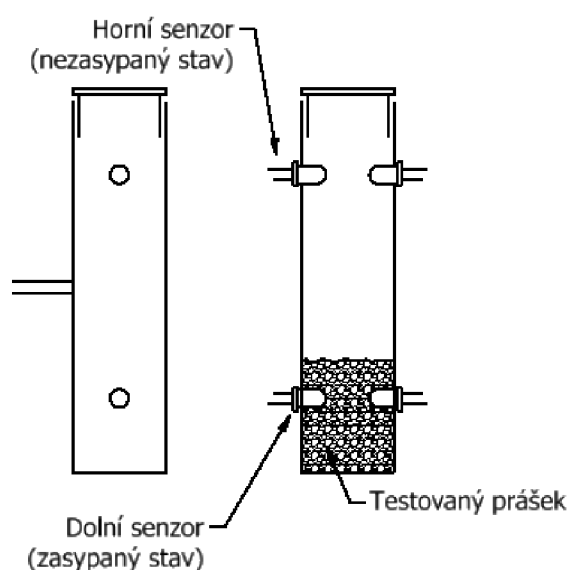
Obr. 5-2 Prototyp na testování pomocí páru LED

Při použití diod na tento typ měření představuje velkou výhodou relativní jednoduchost a možnost použití tohoto systému na velké množství různých typů materiálů. Výhodou oproti ostatním koncepčním řešením může být také fakt, že materiál nedojde k přímému styku s měřicí elektronikou, ale jen s ochranným obalem diody. Tímto klesá riziko vzniku elektrického výboje, jako je například u konceptu pro měření materiálu kontinuitou.

5.2.2 TESTOVÁNÍ FOTOELEKTRICKÝCH SENZORŮ

Prototyp je připojen na výstupní hřídel krokového motoru Nema 17, díky kterému se testovaný zásobník otočí vždy o 180°. Pro testování byly do pouzdra zabudovány infračervené LED o vlnové délce 940 nm a výkonu 30 mW. Tyto diody byly také použity jako přijímače na druhé straně zásobníků. Důvodem použití diod s touto vlnovou délkou je jejich schopnost pronikat prachovými částicemi a zvýšit tak přesnost měření. Zároveň jsou tyto diody méně citlivé na viditelné světlo, které by mohlo pronikat do zásobníků, což opět zvyšuje jejich spolehlivost a přesnost.

Zásobníky byly naplněny nad úroveň spodních senzorů, viz Obr. 5-3. Test byl proveden na 500 cyklů. V jednom cyklu došlo o otočení zásobníku o 180° (k přesypání prášku) a k zápisu hodnoty odečtené snímací diodou. Hodnoty, které senzory odečítaly, jsou v mV (milivoly) a představovaly množství světla, které prošlo přes testovaný prášek a dopadlo na snímací diodu.



Obr. 5-3 Úroveň naplnění testovacího prototypu

Po ukončení testování byly výsledky vyhodnoceny zvláště pro měděný prášek a pro prášek z maraging oceli. V obou případech lze z výsledků jednoznačně určit, že došlo k zasypaní senzorů testovaným materiálem, viz Tab. 1. V tabulce jsou zvýrazněny důležité hodnoty, které slouží k určení hranice registrace materiálu. Pokud je tedy v zásobníku například měděný prášek, tak při naměření 120 mV na snímací diodě můžeme jednoznačně určit, že materiál omezuje světelný paprsek a dosahuje tak do úrovně snímačů.

Tab. 1 Naměřené hodnoty

		Průměr [mV]	Maximum [mV]	Minimum [mV]
Měděný prášek	Zasypaný stav	85,1	108	8
	Nezasypaný stav	136,3	156	114
Prášek z maraging oceli	Zasypaný stav	99,75	138	11
	Nezasypaný stav	172,8	201	143

6 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ DÁVKOVÁNÍ MATERIÁLU

V rámci zařízení pro nanášení prášku pro multi-materiálový 3D tisk kovových materiálů je nutné řídit tok materiálu na dvou místech. Prvním místem je tryska, ze které je materiál dávkován na pracovní plochu stroje. Zde je klíčovým požadavkem rychlé a spolehlivé uzavření materiálového toku s cílem zabránit nežádoucímu sypání materiálu, zejména když je ventil zavřený. Tato vlastnost je důležitá pro přesnost tiskového procesu a také pro udržení materiálu v kontrolovaném prostředí. Druhým místem pro řízení je doplňování materiálu do zásobníků v pracovní části stroje, kde požadavky na přesnost a spolehlivé uzavření ventilu nejsou tak náročné.

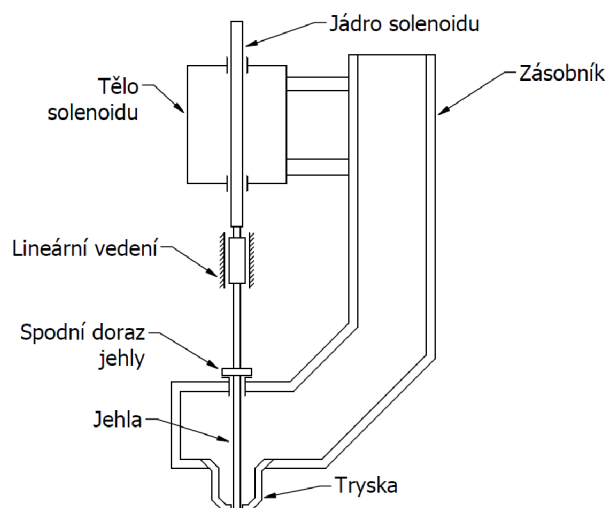
6.1 DÁVKOVÁNÍ NA PRACOVNÍ PLOCHU

Materiál je dodáván na pracovní plochu pomocí trysky, což představuje klíčové místo pro řízení toku materiálu. V této situaci se jako optimální řešení nabízí využití jehlových ventilů, které mají potenciál poskytnout spolehlivý a rychlý uzavírací mechanismus. Při použití těchto ventilů se také minimalizuje možnost sypání materiálu při zavřeném stavu ventilu.

6.1.1 LINEÁRNÍ SOLENOID

Jednou z možností pro řízení jehlového ventilu je použití lineárního solenoidu. Velkou výhodou jehlového ventilu řízeného lineárním solenoidem je jeho rychlost a prakticky nulová odezva mezi vysláním signálu a uzavřením či otevřením jehlového ventilu. Další výhodou lineárních solenoidů je jejich jednoduchá konstrukce, spolehlivost a široká dostupnost na trhu.

V současné verzi nanášecího zařízení testovaném v laboratořích SLM na VUT FSI je tento systém použit pro dávkování materiálu na pracovní plochu. Zařízení je složeno z trysky, jehly, zásobníku a lineárního solenoidu s upínacím mechanismem, viz Obr. 6-1



Obr. 6-1 Zdvih jehly pomocí lineárního solenoidu

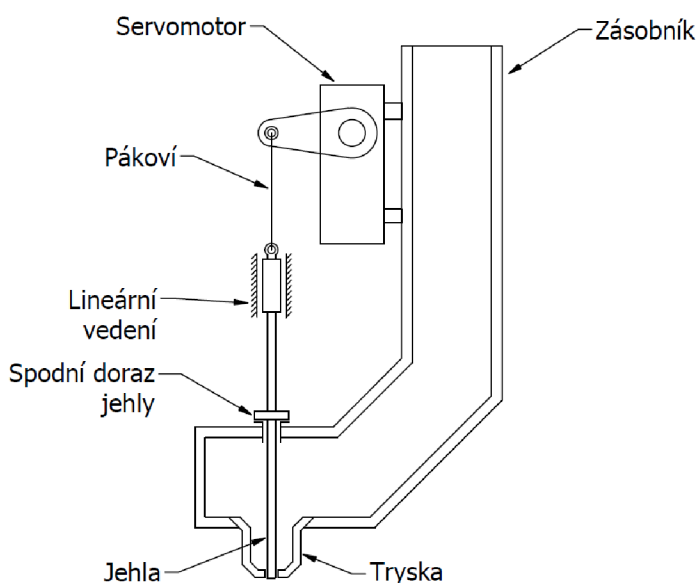
Tento způsob dávkování umožňuje rychlé otevření a uzavření jehlového ventilu, a tím zvyšuje přesnost dávkovacího zařízení. V případě pomalého otevírání a zavírání tohoto ventilu by docházelo k nerovnoměrnému dávkování materiálu v průběhu otevírání nebo zavírání ventilu.

Velkou nevýhodou tohoto systému ale představuje zahřívání cívky samotného solenoidu. Maximální provozní teplota je 80°C . V aktuální verzi nanášecího zařízení je tento problém vyřešen pomocí PWM modulu, který řídí solenoid. Toto řešení sice sníží množství přebytečného tepla, ale i tak je nutné cívku chladit pomocí externích ventilátorů.

S tímto řešením je spojeno složitější řízení systému, neboť je zapotřebí pečlivě nastavit parametry PWM modulu tak, aby bylo sníženo množství vygenerovaného tepla bez narušení funkčnosti solenoidu. Navíc, i přes použití externího chlazení, může při přehřívání dojít ke snížení výkonu solenoidu. Tento stav může následně způsobit neotevření jehlového ventilu a tím se snižuje spolehlivost celého systému.

6.1.2 SERVOMOTOR

Pro tento koncept byl vymyšlen nový způsob zdvihu jehly. Tento systém využívá pro zdvih jehly jednoduchý servomotor, který umožňuje natáčení výstupní hřídele do přesné polohy pomocí řídicí elektroniky a potenciometru umístěného na výstupní hřídeli motoru (viz kap. 4.3). Jehla je v tomto případě pomocí pákovi připojena na rameno, které je přímo spojeno s hřídelem motoru. Na Obr. 6-2 je tento systém schematicky zakreslen společně se zásobníkem pro testovaný prášek.



Obr. 6-2 Zdvih jehly pomocí servomotoru

Velkou výhodou představuje v tomto systému samotný servomotor, které díky své vnitřní převodovce dokáže vyvinout krouticí moment $0,16\text{ Nm}$ i při malém příkonu elektromotoru. Tím pádem by nemělo docházet ke vzniku nadbytečného tepla, jako je například u systému, který pro zdvih jehly využívá lineární solenoid.

Tím, že převodové ústrojí v servomotoru je převod na sílu, tak sice na výstupní hřídeli vzniknou relativně velké krouticí momenty, ale zároveň klesne rychlost otáček výstupní hřídele. To může představovat problém v rychlosti otevření a uzavření jehly. Je žadané, aby byla jehla otevřena nebo uzavřena ve velmi krátkém časovém intervalu od vyslání signálu. V opačném případě může dojít k nerovnoměrnému sypání materiálu přes trysku.

6.2 PŘESUN MATERIÁLU MEZI ZÁSOBNÍKY

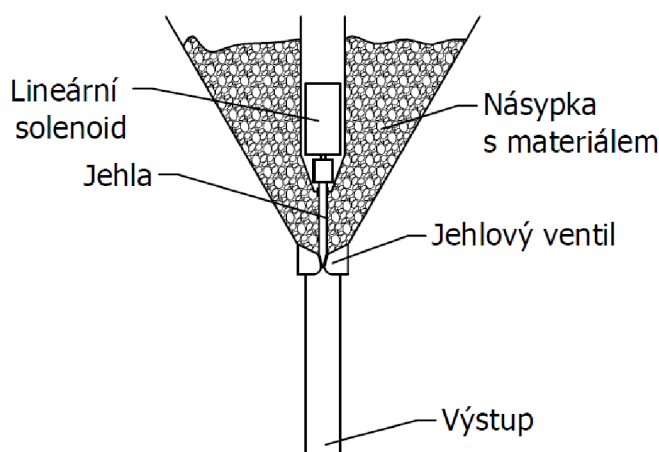
Zásobníky v pracovním prostoru stroje mají vždy dost materiálu pro nanesení jedné vrstvy, ale nejsou dost velké na to, aby uchovaly veškerý potřebný materiál na výtisk. Je proto potřeba do nich materiál v průběhu tisku dosypávat z externích zásobníků. Tento systém by měl fungovat automaticky bez nutného zásahu obsluhy, tzn. obsahovat říditelný prvek, který umožní otevření a uzavření výstupního otvoru.

V horní části stroje jsou umístěny zásobníky, které v sobě uchovávají většinu materiálu a v případě potřeby doplňují zásobník v pracovní části stroje. V pracovní části stroje je udržována konstantní teplota a komora je naplněna směsí inertních plynů, které zamezují oxidaci materiálu při natavení. Přesun materiálu mezi zásobníky tedy musí být navržen tak, aby nebylo nutné otevírat pracovní komoru stroje.

Požadavky na těsnost dávkovacího systému v tomto případě nejsou tak náročné, jako při dávkování materiálu na pracovní plochu. V případě, že by dávkovací systém dokonale netěsnil, materiál by pouze propadl do pracovní části stroje, ale nijak by neohrozil kvalitu tisku. Přesnost dávkovacího systému také nepodléhá náročným požadavkům. V případě, že bude potřeba doplnit zásobník v pracovní části stroje, bude materiál z horních zásobníků dávkován do té doby, dokud se zásobníky nenaplní na požadovanou úroveň. Není tedy potřeba přímo znát, kolik materiálu systém nadávkuje za určitý časový úsek.

6.2.1 JEHLOVÝ VENTIL

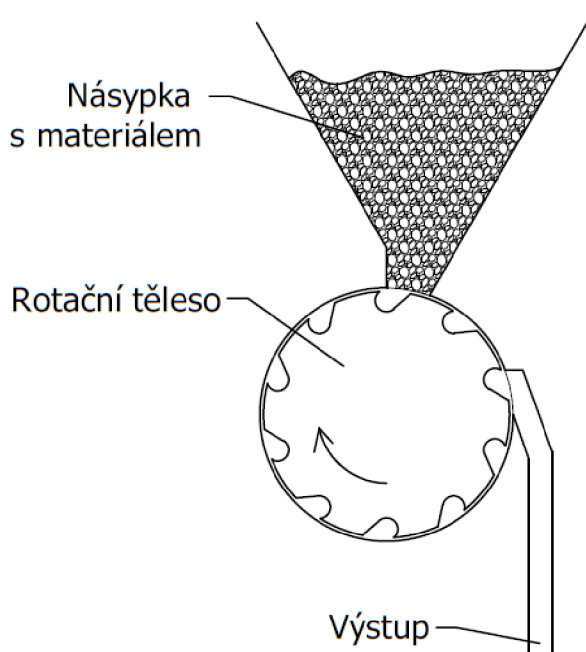
Jednou z možností je použití stejného systému, jako u dávkování materiálu na pracovní plochu, tedy užitím jehlového ventilu, Obr. 6-3. Řízení ventilu je provedeno pomocí lineárního solenoidu, který v případě přivedení elektrického signálu otevře jehlový ventil. Pracovní cyklus tohoto solenoidu se pohybuje v řádech jednotek procent a nehrozí tak přehřívání solenoidu. Odpadá tedy potřeba zajišťovat přídavné chlazení.



Obr. 6-3 Koncept s jehlovým ventilem

6.2.2 ROTAČNÍ DÁVKOVACÍ SYSTÉM

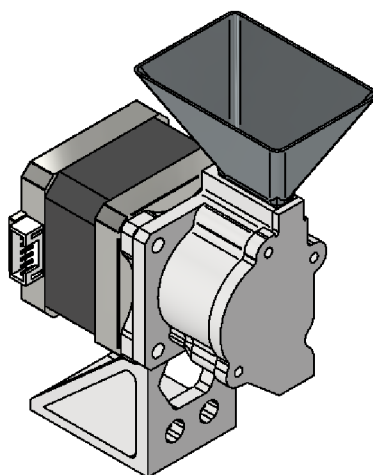
Druhou možností je užití rotačního válce, který má v sobě drážky pro dopravování materiálu, viz Obr. 6-4. Válec je přímo připojen na výstupní hřídel krokového motoru, a je tedy možné řídit jeho otáčky a tím rychlost dávkování.



Obr. 6-4 Koncept s rotačním válcem

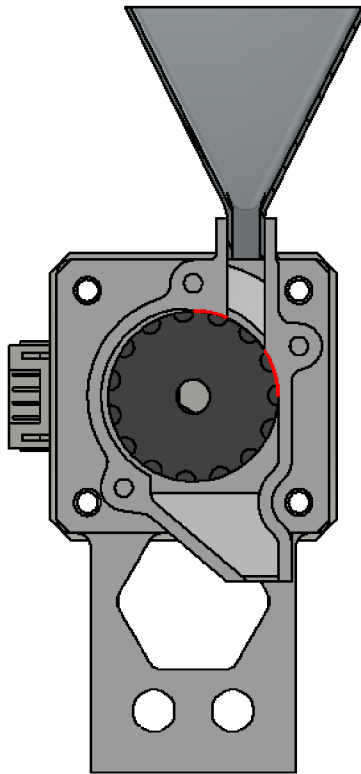
6.2.3 TESTOVÁNÍ ROTAČNÍHO DÁVKOVACÍHO SYSTÉMU

Při testování byl horní zásobník, viz Obr. 6-5, naplněn práškem z maraging oceli a poté měděným práškem. Pod dávkovač byla umístěna záchytná nádoba. Motor byl řízen pomocí potenciometru, díky kterému bylo možné řídit jeho otáčky. Při otáčení motoru byl materiál spolehlivě dávkován do záchytné nádoby a při zastavení motoru nedocházelo k samovolnému prosypávání prášku přes dávkovač. Ani při vytvoření vibrací pomocí krokového motoru nedocházelo k prosypávání prášku. Můžeme tedy říct, že tento způsob dávkování materiálu může fungovat při správné konstrukci.



Obr. 6-5 Sestava s rotačním válcem

Nevýhodou může být tření mezi válcem a tělem dávkovače. Na Obr. 6-6 jsou červeně vyznačeny plochy, na kterých dochází ke tření mezi válcem a tělem dávkovače. Tyto plochy ale také zajišťují těsnost dávkovače. Je tedy nutné správně určit jejich vzájemnou vzdálenost a samotnou délku těsnící plochy. Zároveň může při dávkování docházet k otěru těchto ploch a vzniku kousků plastu, který by mohl kontaminovat kovový prášek.

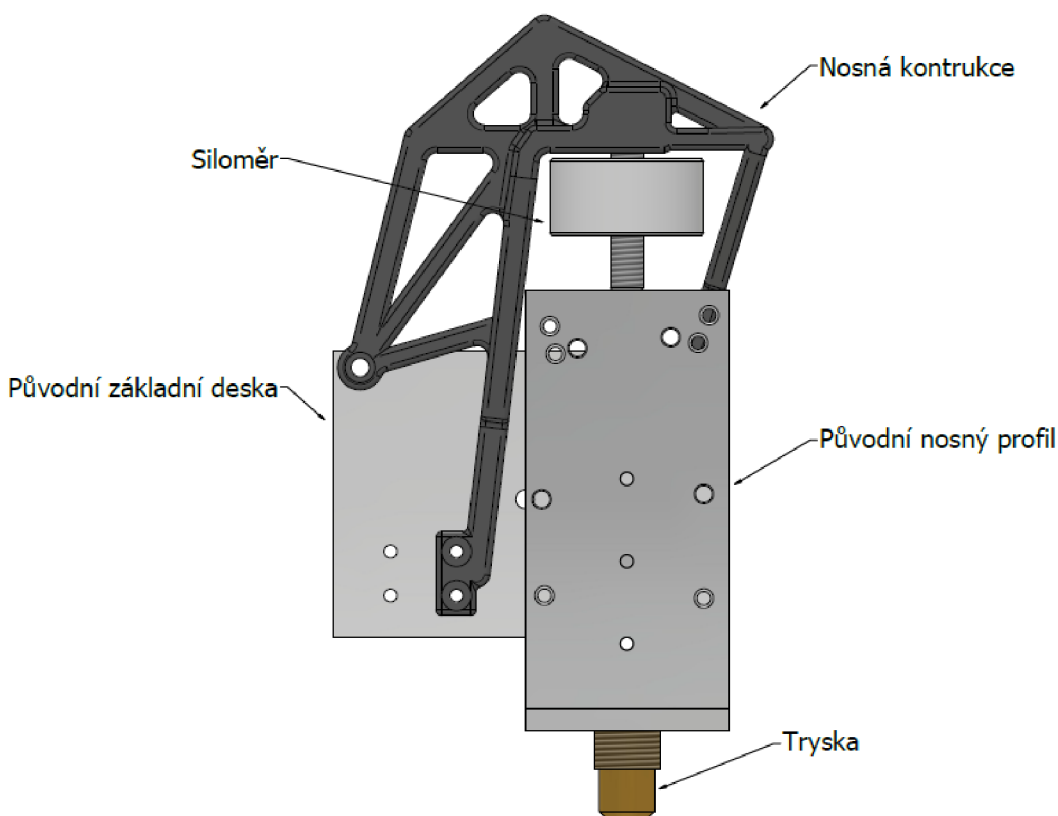


Obr. 6-6 Řez dávkovacím zařízením

7 TESTOVÁNÍ ARETAČNÍ SÍLY HLAVY

U původní verze nanášecí hlavy docházelo k problému, kdy se při přejezdu nerovností nanášecí hlavice nadzvedávala. Tento problém byl způsoben absencí systému, který by udržoval hlavu ve spodní poloze. Jedním z faktorů, které přispívaly k této nežádoucí situaci, bylo uložení nanášecí hlavy na lineárním vedení. Tento způsob uložení je ale nutný pro správnou kalibraci nanášecí hlavy vůči tiskové podložce na začátku tisku. Jediné, co drželo nanášecí hlavu ve správné poloze, byla její vlastní váha.

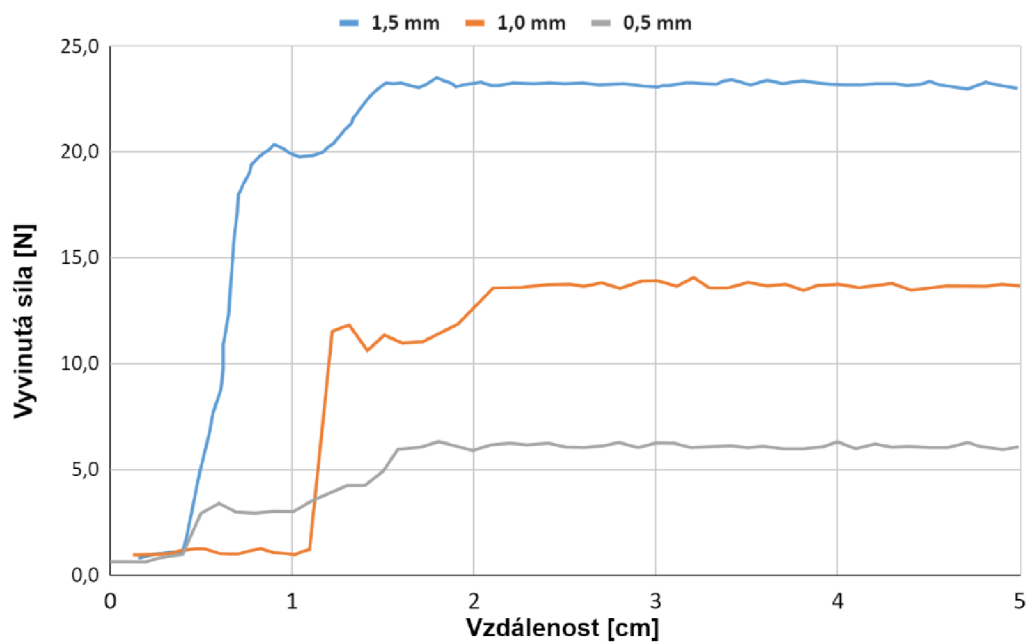
Bylo proto potřeba vytvořit systém, který by udržoval nanášecí hlavu ve spodní poloze. Pro zjištění potřebné přídržné síly byl zrealizován test, který pomocí hmotnostního senzoru měřil sílu vzniklou při přejezdu nerovností. Pro tento test byla použita ještě původní konstrukce nanášecí hlavy. Jeden ze zásobníků nanášecí hlavy byl nahrazen konstrukcí, která sloužila k uchycení siloměru, viz Obr. 7-1.



Obr. 7-1 Přípravek na testování síly

Konstrukce k uchycení siloměru byla vytvořena na základě topologické optimalizace, aby byla zaručena co nejmenší deformace při daném zatížení. Odhadovaná síla, na kterou byla konstrukce dimenzována, je 50 N. Při tomto zatížení byla deformace v místě umístění siloměru 0,2 mm. Tato hodnota je důležitá pro zjištění přesné hodnoty síly.

Testování probíhalo pomocí uměle vytvořených nerovností, přes které přejížděla tryska nanášecí hlavy. Během testu byla zaznamenávána síla, která vznikala vlivem těchto nerovností, a to pomocí hmotnostního senzoru. Celá tato testovací sestava byla přidělána na pojezdy nanášecí hlavy a byla přednastavena na předpětí 3 N na hmotnostním čidlu, aby byla eliminována vůle. Toto testování se opakovalo pro tři různé velikosti nerovností. Z hodnot těchto testů byl poté vykreslen graf, viz Obr. 7-2. Z grafu lze vyčíst, že největší naměřená síla 23 N vznikla při přejezdu 1,5 mm vysoké nerovnosti. Tato hodnota je tedy stěžejní pro návrh aretačního systému.

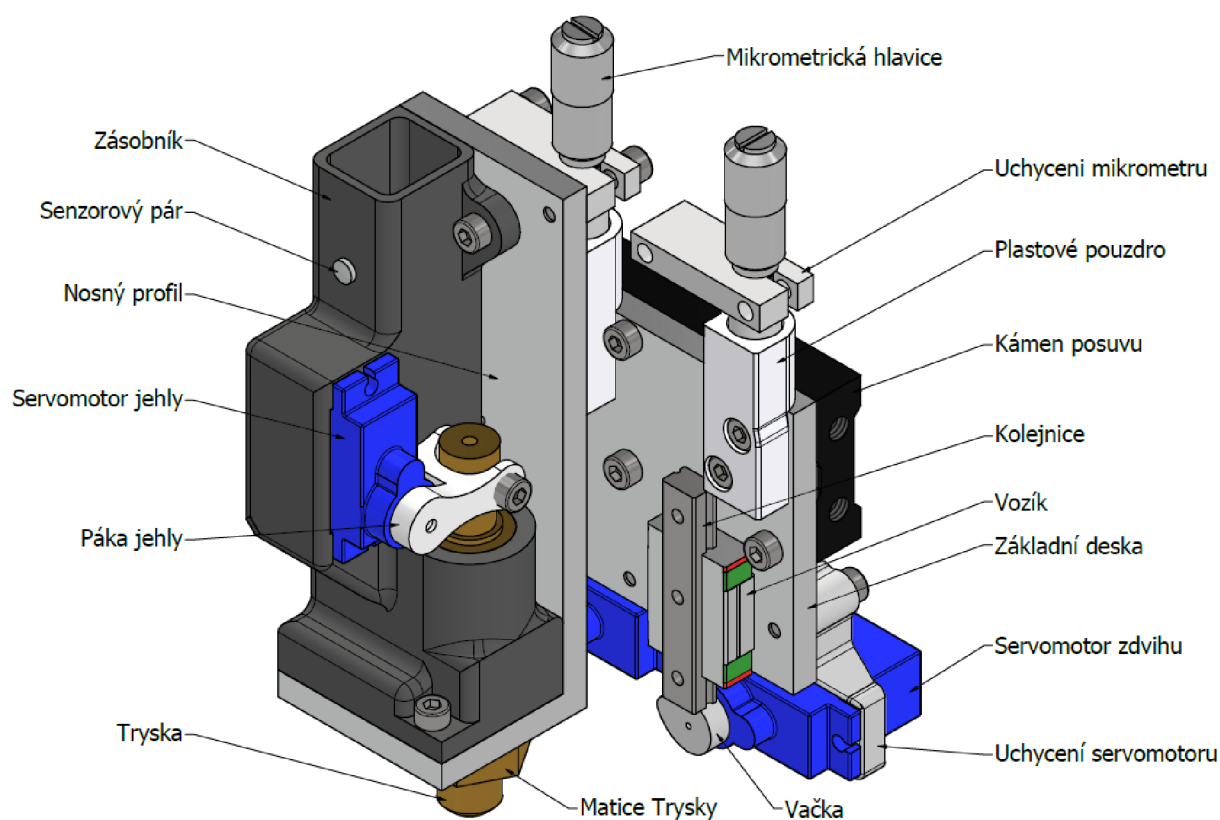


Obr. 7-2 Graf maximální vyvinuté síly pro různé nerovnosti

8 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NANÁŠECÍ HLAVY

8.1 SESTAVA NANÁŠECÍ HLAVY

Nanášecí hlava je složena ze dvou samostatných jednotek, každá pro jiný materiál, viz Obr. 8-1. Základem každé jednotky je zásobník na materiál, umístěný na nosném profilu. Zásobník slouží k uchování materiálu používaného při tisku a jeho objem je 13 cm^3 , jedna vrstva přitom potřebuje přibližně $0,5 \text{ cm}^3$ celkového množství nanášeného materiálu. K tomuto zásobníku jsou dále připojeny komponenty řídící tok materiálu na pracovní plochu a komponenty pro sledování hladiny materiálu v zásobníku. Nosný profil slouží k přichycení zásobníku na kolejnici lineárního vedení a k přichycení objímky mikrometrické hlavice. Tato hlavice slouží ke kalibraci výšky nanášeč hlavy od tiskové podložky na začátku tisku. Otáčením mikrometrického šroubu dochází k vysouvání nebo zasouvání stopky na spodní straně hlavice a tím k nastavení výšky celé nanášeč hlavy vůči základní desce, o kterou je stopka opřena.

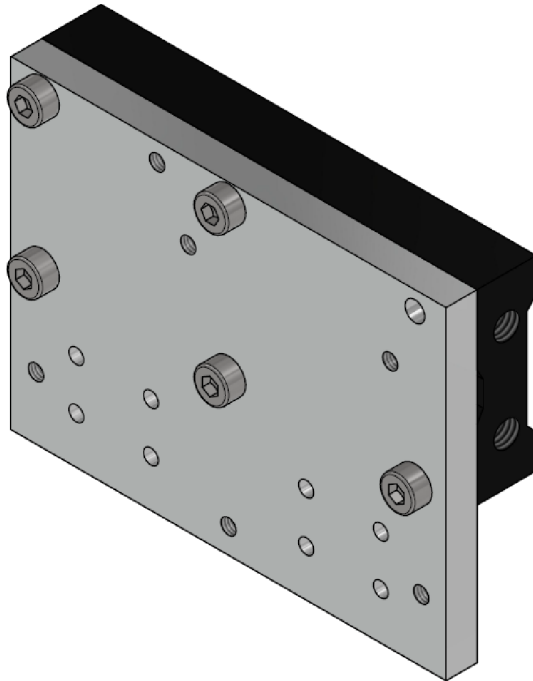


Obr. 8-1 Kompletační náhled nanášeč hlavy

Výhodou oproti původnímu zařízení je použití jiného mechanismu pro zdvih jehly, díky kterému odpadá nutnost přídavného chlazení použitého v původní verzi zařízení. Další výhodou představuje možnost velmi jednoduché výměny samotných zásobníků, například nanášení jiné sady materiálů. V neposlední řadě toto zařízení obsahuje aretační systém, který zajišťuje správnou polohu nanášeč hlavy vůči základní desce, i při přejezdu nerovnosti.

8.2 ZÁKLADNÍ DESKA

Základ celé nanášecí hlavy je tvořen kamenem umístěným na supportu pojezdového mechanismu nanášecího zařízení. K tomuto kamenu je pomocí pěti šroubů M3x8 přichycena základní deska, viz Obr. 8-2, ke které je přidělán zbytek komponent nanášecí hlavy. Tuhost celé nanášecí hlavy je silně závislá právě na této komponentě, a proto je tato deska vyrobena z nerezi skupiny A2, na rozdíl od hliníku, použitého v původní verzi zařízení. Vzhledem ke komponentám, které jsou k desce přidělané, bylo nutné vytvořit dvacet přesně umístěných děr, případně děr se závity.



Obr. 8-2 Základní deska nanášecí hlavy

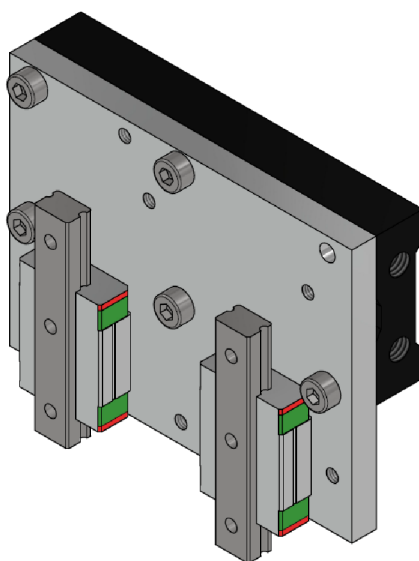
8.3 ZDVIHACÍ MECHANISMUS

Při konstrukci nové nanášecí hlavy byly stanoveny dvě podmínky. První podmínkou je, že nepoužívané hlavy musejí mít možnost se nezávisle na sobě nadzvednout. Tato podmínka vznikla ze zkušeností při používání původní nanášecí hlavy. Pokud se pod trysku při pohybu dostala nečistota, tak při přejetí již nanesené vrstvy prášku docházelo k jejímu poškození. Stejný problém nastal i při nesprávné kalibraci obou trysek. V případě, že jedna z trysek byla seřizena níž než druhá, tak při přejezdu již nanesené vrstvy ji poškodila. Možnost nadzvednutí trysek by měla tomuto problému předejít.

Druhou podmínkou je nutnost aretace nanášecí hlavy ve spodní poloze. Síla potřebná k udržení byla zjištěna v kapitole 7. Na základě těchto výsledků bylo potřeba navrhnout systém, který by tuto sílu dokázal udržet. V případě absence tohoto systému, jako tomu bylo u původní verze nanášecí hlavy, se při přejezdu nerovnosti hlavice nadzvedla a způsobila nerovnoměrné nanesení prášku. Tato chyba se přenášela i do dalších vrstev a způsobovala selhání tisku. Systém aretace nanášecí hlavy je tedy kritický pro správné a spolehlivé fungování celého zařízení.

8.3.1 LINEÁRNÍ VEDENÍ

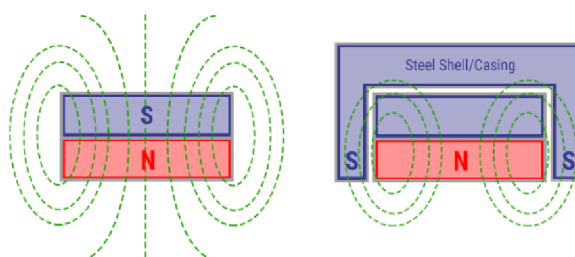
Základ zdvihacího mechanismu tvoří lineární vedení, které dává nanášecí hlavě možnost výškové stavitelnosti vůči tiskové podložce. Základní podmínkou při výběru lineárního vedení jsou zástavbové rozměry vozíku a kolejnice. Už v původní verzi nanášecího zařízení bylo zvoleno miniaturní kuličkové vedení MGN-07C od firmy HIWIN. Toto vedení se již v praxi osvědčilo a je proto použito i v nové verzi nanášecího zařízení. Velkým problémem pro tato lineární vedení ale představuje samotný prášek, který se v průběhu tisku víří a dostává do vozíků, kde způsobuje zvýšené opotřebení a zadírání. Tyto součásti tedy vyžadují častější údržbu, aby byla zachována jejich přesnost a hladkost chodu. Vozík lineárního vedení má na zadní straně čtyři montážní otvory, pomocí kterých je přidělán přímo k základové desce, viz Obr. 8-3.



Obr. 8-3 Lineární vedení nanášecí hlavy

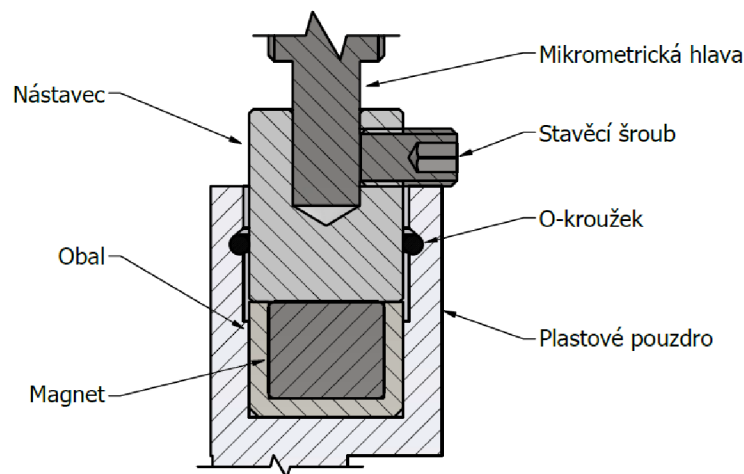
8.3.2 MAGNETICKÁ ARETACE A KALIBRAČNÍ MIKROMETR

V původní verzi nanášecího zařízení chyběl systém, který by udržoval nanášecí hlavu ve spodní poloze, a při přejezdu nerovností se celé zařízení nadzvedávalo. To mělo za následek nerovnoměrné nanesení prášku a v krajních případech znehodnocení vyráběné součásti. V nové verzi nanášecí hlavy je využito magnetů, které svou silou udržují nanášecí hlavu ve správné poloze. Potřebná síla těchto magnetů byla zjištěna pomocí testů v kapitole 7. Za účelem snížení rozptylu magnetického pole byl magnet navíc umístěn do ocelového obalu, který usměrňuje magnetické pole, jako na Obr. 8-4. Tato úprava byla provedena za účelem snížení vlivu magnetického pole na feromagnetické prášky používané při tisku.



Obr. 8-4 Zobrazení rozptylu magnetického pole (vlevo bez obalu, vpravo s obalem) [24]

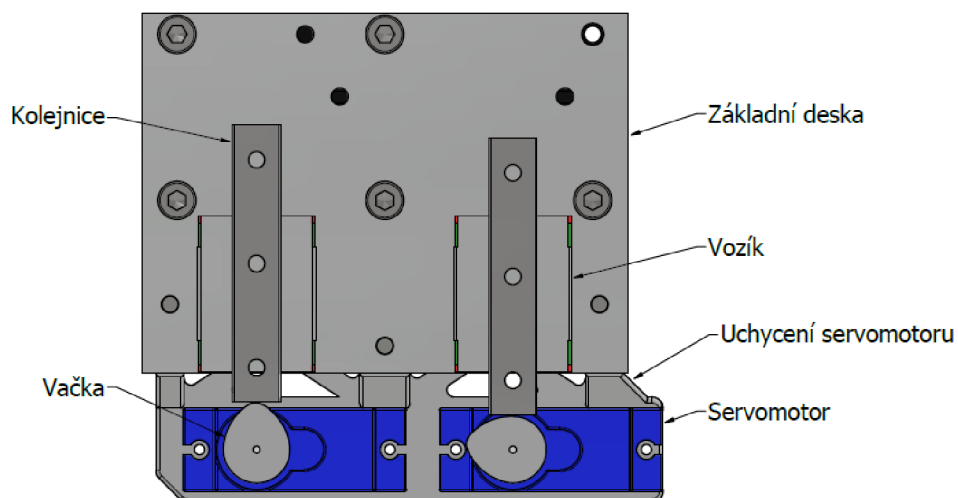
Magnet přitahuje upravenou stopku mikrometrické hlavice, pomocí které se nastavuje přesná výška trysky od tiskové podložky. Stopku mikrometrické hlavice bylo nutné upravit z důvodu, že původní stopka o průměru 3,5 mm nemá dostatečnou plochu pro využití plné síly magnetu. Byl na ni proto přidělán nástavec, který umožňuje využít plného potenciálu použitého magnetu. Nástavec byl vyroben z oceli S235JR. Magnet společně s obalem byly dále vloženy do plastového pouzdra, které umožňuje přichycení k základní desce. Do pouzdra byl vložen i těsnící o-kroužek, viz Obr. 8-5. Důvodem bylo zamezení průniku prášku mezi magnet a stopku mikrometru. Finální rozsah nastavení, který umožňuje tato mikrometrická hlavice, jsou 4 mm od nejnižší po nejvyšší polohu od tiskové podložky. Síla magnetu, který přitahuje již zmíněnou upravenou stopku, je 27 N.



Obr. 8-5 Detail magnetického dorazu

8.3.3 SERVOMOTOR ZDVIHU

Pro zdvih nanášecích hlav je využito servomotorů, které mají na své výstupní hřídeli umístěnou vačku. Tato vačka se při zdvihu nanášecí hlavy otočí a opře se o spodní stranu kolejnice lineárního vedení. Po otočení vačky zpět se kolejnice lineárního vedení vrátí zpět do původní polohy. Na Obr. 8-6 lze vidět oba dva stavy vačky. Tento systém nemá za účel udržovat lineární vedení ve spodní poloze, ale slouží pouze k jeho nadzvednutí. Servomotor s vačkou musí tedy při zvedání překonávat váhu vlastních zásobníků a sílu aretačního magnetu.



Obr. 8-6 Stavy servomotorů zdvihu

8.4 HLAVNÍ ZÁSOBNÍKY A NOSNÉ PROFILY

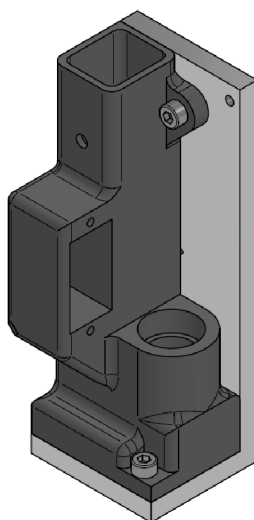
Samotné zásobníky byly vyrobeny pomocí 3D tisku metodou FDM a jako materiál byl zvolen ABS plast. Problém součástek vyrobených metodou FDM je ten, že povrch po vytištění není hladký, ale obsahuje strukturu jednotlivých vrstev, které můžou v tomto případě způsobit zasekávání prášku v zásobníku a je proto nutné je odstranit.

Jednou z možností pro vyhlazení povrchu součásti je použití brusného plátka k zbroušení výtisku. Avšak kvůli rozměrům a složitým vnitřním tvarům zásobníků by tato metoda mohla způsobit komplikace. Druhou alternativou je chemické leštění povrchu. Tato metoda využívá výparů acetonu, které rozpouštějí povrchovou strukturu vytvořenou metodou FDM a povrch tím sjednocují a leští, viz Obr. 8-8. Tato povrchová úprava také dodává celému výtisku pevnost, primárně tedy soudržnost jednotlivých vrstev. Chemické leštění je vhodné pouze pro součásti vyrobené z ABS.



Obr. 8-8 Chemické leštění (vlevo před, vpravo po leštění) [23]

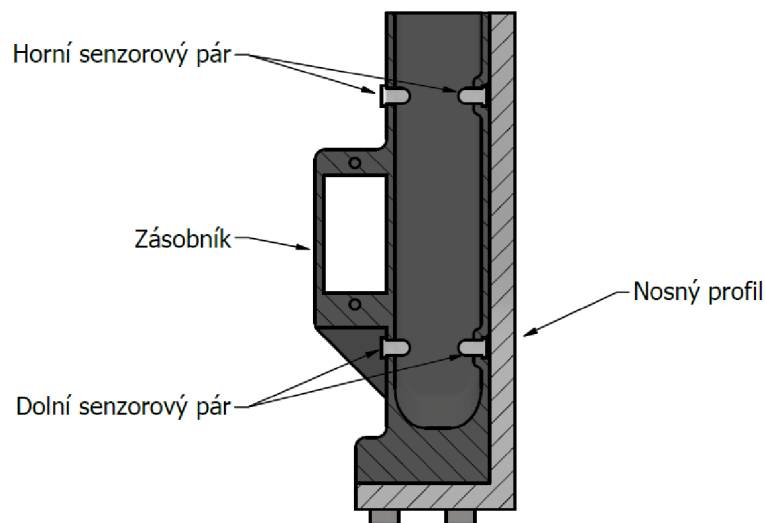
Pro přidání tuhosti a zjednodušení konstrukce zásobníků jsou tyto zásobníky přidělány k nosným profilům, viz Obr. 8-7, které jsou vyrobeny z hliníkových profilů tvaru „L“. Tyto profily také umožňují spolehlivější a jednodušší připojení dalších komponent k zásobníkům. Pokud by se měli komponenty přidělovat do samotných zásobníků, bylo by potřeba využít závitové vložky a to by výrazně zkomplikovalo konstrukci zásobníků.



Obr. 8-7 Zásobník na nosném profilu

8.5 SYSTÉM PRO SLEDOVÁNÍ HLADINY MATERIÁLU

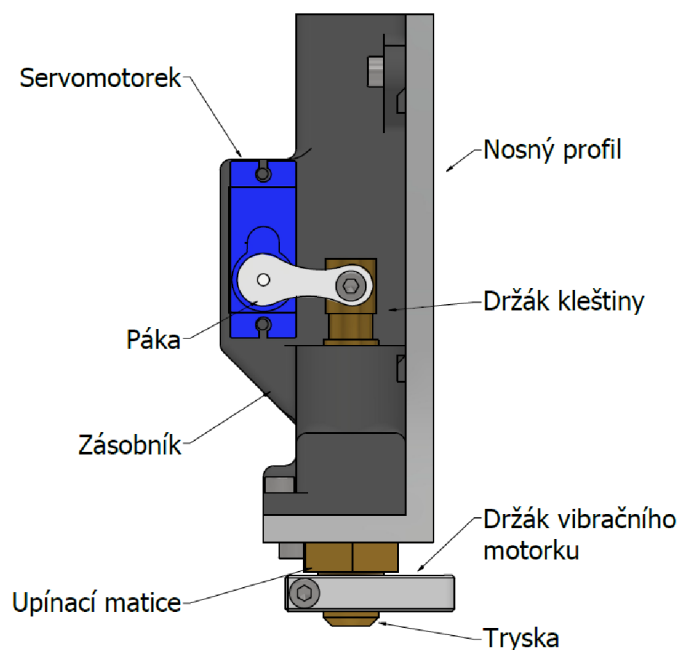
V zásobnících je potřeba sledovat hladinu nanášeného prášku za účelem případného doplnění těchto zásobníků. Na základě poznatků z kap. 5 bylo zvoleno hlídání materiálu v zásobníku pomocí fotoelektrických senzorů. Toto řešení se při testování v kap. 5.2.2 ukázalo jako spolehlivé a byly také zjištěny mezní hodnoty registrace materiálu pro řídicí systém nanášecí hlavice. Jako zdroj světelného paprsku byly využity infračervené LED s vlnovou délkou 940 nm a výkonu 30 mW. Jako přijímače byly využity stejné diody, a to z důvodu jejich spektrální shody s vysílacími diodami. Do zásobníku byly umístěny dva páry těchto senzorů (Obr. 8-9). V případě poklesu materiálu pod spodní sensorový pár je řídicí jednotkou zajištěno automatické doplnění materiálu a to až do úrovně horního sensorového páru.



Obr. 8-9 Řez zásobníkem (poloha senzorů)

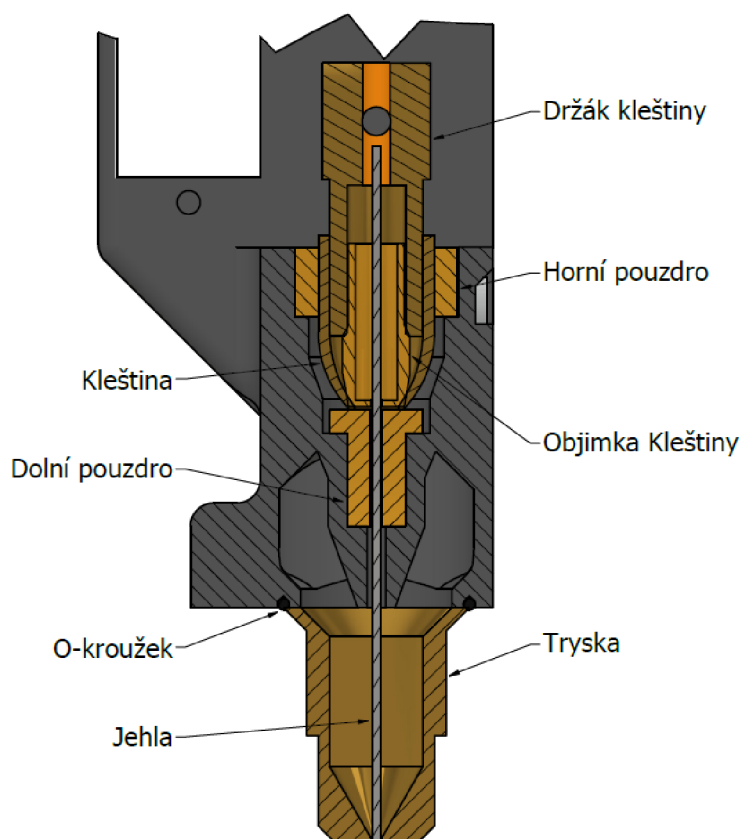
8.6 OVLÁDÁNÍ A VEDENÍ JEHLOVÉHO VENTILU

Pro dávkování materiálu na pracovní plochu je opět použit jehlový ventil, stejně jako v původní verzi zařízení. Na rozdíl od původní verze je ale pohyb jehly zajištěn servomotorem, který přináší řadu výhod oproti lineárnímu solenoidu. Jednou z hlavních výhod je generování prakticky nulového tepla, které v minulosti představovalo problém. Další výhodou může být zjednodušení řídicího obvodu, neboť servomotor může být poháněn přímo z programovatelné desky, což eliminuje potřebu řídicích jednotek, viz kap. 6.1.1. Na výstupní hřídeli servomotoru je umístěna páka, která je přímo spojena s držákem kleštiny jehlového ventilu, viz Obr. 8-10. Hlavním důvodem tohoto propojení je minimalizace třecích ztrát v pákovém mechanismu.



Obr. 8-10 Zdvihový mechanismus jehly

Vedení jehly je provedeno pomocí mosazných pouzder, zalisovaných přímo do zásobníku, viz Obr. 8-11. Jedno z pouzder vede samostatnou jehlu a druhé vede objímku kleštiny.

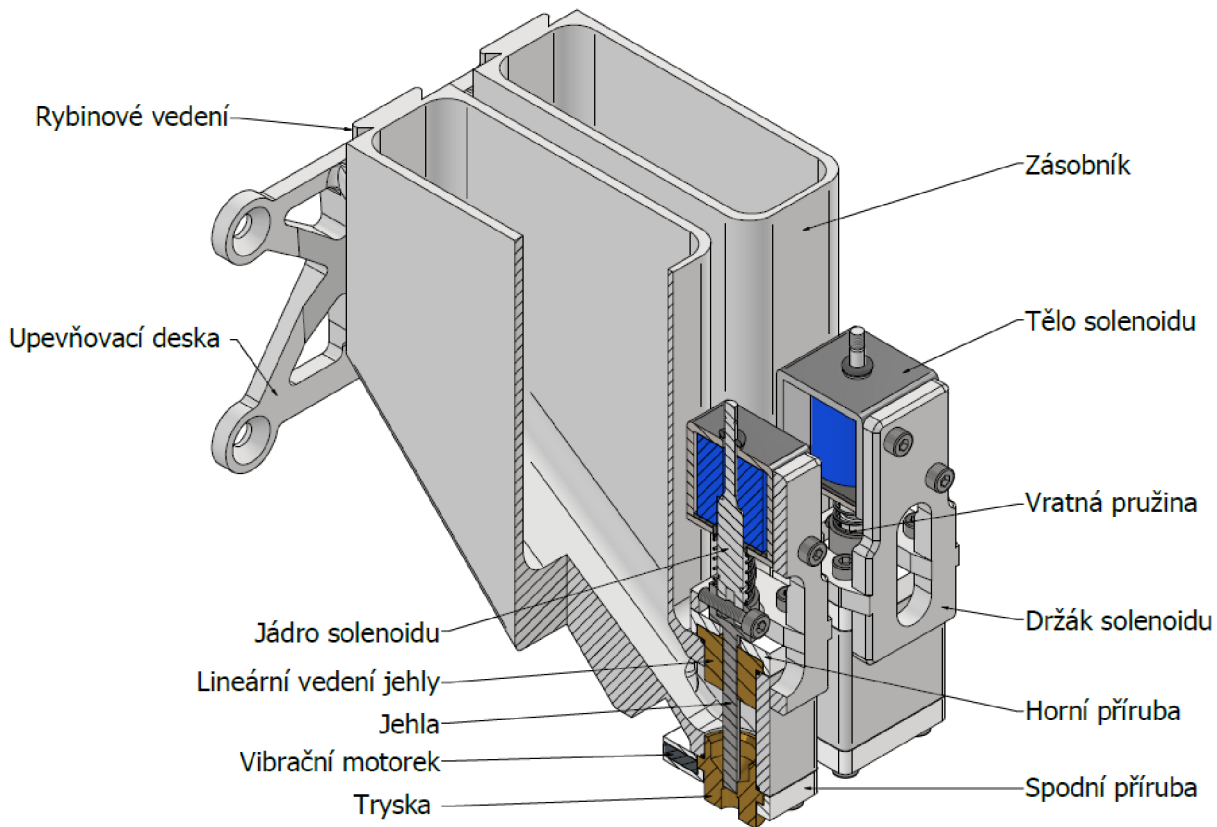


Obr. 8-11 Řez vedení jehly (otevřený stav jehlového ventilu)

9 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ PŘÍDAVNÝCH ZÁSObNÍKŮ

Přídavné zásobníky slouží k doplnění zásobníků v nanášecí hlavě. Pro řízení toku materiálu mezi zásobníky je nutné využít říditelný prvek, umožňující otevření a uzavření ventilu. V tomto případě se jako nejlepší možné řešení ukázalo využití jehlového ventilu řízeného lineárním solenoidem, viz Obr. 9-1. Doplnění zásobníku v nanášecí hlavě neprobíhá kontinuálně, ale po dávkách. V případě úbytku materiálu v zásobnících nanášecí hlavy je tato hlava pomocí pohybového mechanismu přesunuta pod přídavné zásobníky, kde je následně přesunuto správné množství materiálu mezi zásobníky.

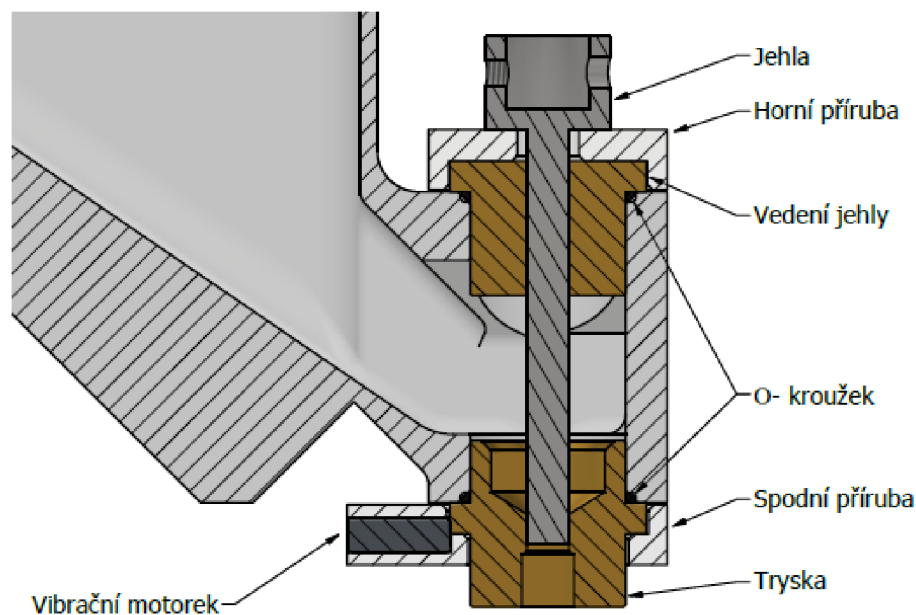
Velkým faktorem při návrhu těchto zásobníků je jejich vnitřní objem. Při konstrukci byla stanovena podmínka na jejich minimální vnitřní objem, a to 150 cm^3 . Finální vnitřní objem každého zásobníku je 155 cm^3 . Toto množství materiálu umožňuje maximální výšku výtisku cca 1,5 cm. V případě potřeby je v pracovním prostoru tiskárny SLM280HL dostatek místa pro zvětšení těchto zásobníků, například pro tisk objemnějších součástí.



Obr. 9-1 Kompletační náhled přídavných zásobníků

9.1 ZÁSOBNÍKY A VEDENÍ JEHLY

Přídavné zásobníky jsou, stejně jako zásobníky na nanášecí hlavě, vyrobeny pomocí 3D tisku metodou FDM a jako materiál byl zvolen ABS plast. Tyto zásobníky bylo také nutné chemicky vyleštit, aby bylo dosaženo hladkého povrchu zásobníku. Do zásobníku je z horní části zalisováno mosazné vodící pouzdro, které je dále zajištěno přírubou. Do spodní části je zalisována tryska, která je také pojištěna přírubou. Příruba ve spodní části obsahuje také vibrační motorek, který zabraňuje klenbování materiálu v trysce. Mezi zalisované komponenty a zásobník je ještě vložen o-kroužek, viz Obr. 9-2, který utěšňuje materiál v zásobníku a zabraňuje tak nekontrolovanému pronikání materiálu ven ze zásobníku.

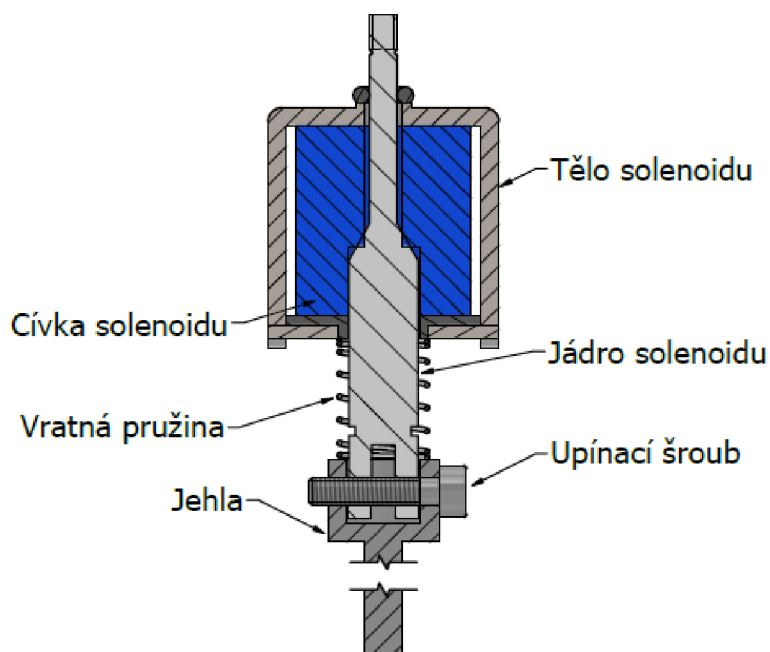


Obr. 9-2 Řez horním zásobníkem (detail vedení jehly)

9.2 DÁVKOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Pro tento systém bylo zvoleno dávkování pomocí jehlového ventilu a lineárního solenoidu. I když lineární solenoid má tendenci generovat nadbytečné teplo v aktivním stavu, jak je popsáno v kapitole 6.1.1, v této konkrétní aplikaci tato vlastnost není zásadním problémem. S ohledem na nízký pracovní cyklus solenoidu, kdy bude aktivován pouze krátce, nedojde k vygenerování významného množství tepla. Solenoid bude také po většinu času v neaktivním stavu, což umožní jeho přirozené ochlazování.

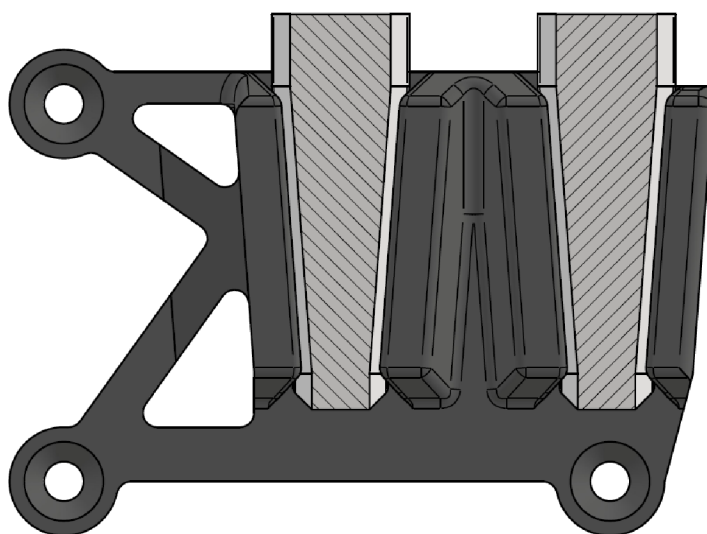
Jádro lineárního solenoidu je umístěno v jehle jehlového ventilu a spojeno pomocí šroubku, jak je znázorněno na Obr. 9-3. Jádro je navíc uloženo volně, což umožňuje korekci případných nesouosostí.



Obr. 9-3 Detail spojení jehly a jádra solenoidu

9.3 SYSTÉM PRO VÝMĚNU ZÁSOBNÍKŮ

Do konstrukce přídatných zásobníků byl přidán systém pro jejich jednoduchou výměnu, například při změně tisknutého materiálu. Na stěnu pracovní komory tiskárny SLM280HL, ve které je vloženo nanášecí zařízení, je umístěna upevňovací deska s rybinovým spojem. Na samotných zásobnících je druhá část rybinového spoje, díky kterým je možné zásobníky jednoduše vysunout a zasunout do upevňovací desky. Rybinový spoj je navíc kónicky zúžen, takže slouží i jako spodní doraz pro správnou polohu přídatných zásobníků, viz Obr. 9-4.



Obr. 9-4 Detail rybinového vedení

10 TESTOVÁNÍ REALIZOVANÉHO PROTOTYPU

Po dokončení konstrukce obou uzlů byly tyto prototypy realizovány a podrobeny sérii testů, zaměřených na ověření těsnosti a spolehlivou funkci. Komponenty vytvořené metodou Fused Deposition Modeling (FDM) na 3D tiskárně byly zhotoveny z materiálu ABS, a to z důvodu následného chemického leštění. Tento proces umožnil vyhlazení povrchu tištěných součástí, který by jinak mohl způsobit problémy s ulpíváním materiálu na stěnách součástí.

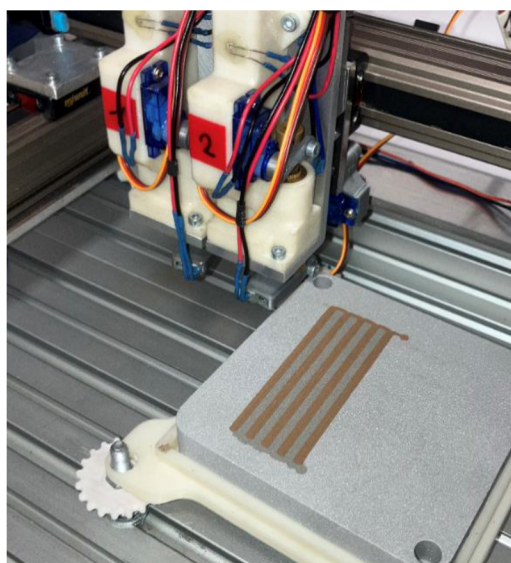
10.1 SENZOROVÝ SYSTÉM

Pro testování správné funkčnosti sensorového systému, byl zásobník postupně plněn práškem z maraging oceli a na senzorech bylo měřeno napětí. V případě zastínění senzorů doplňovaným práškem, měřené napětí pokleslo. Tato změna napětí indikuje, že hladina materiálu dosahuje po daný senzor. Při testování, se tento systém prokázal jako funkční a vždy spolehlivě zaregistroval hladinu materiálu. Byly také zjištěny mezní hodnoty pro registraci použitého prášku. Pro prášek z maraging oceli je tato hodnota cca 140 mV. Pro měděný prášek, který více ulpívá na snímací diodě, je tato hodnota 110 mV. V případě, že naměřená hodnota napětí je pod touto hranicí, systém vyhodnotí, že hladina materiálu se nachází nad sensorovým párem. v případě úbytku materiálu tato naměřená hodnota vzroste a překročí hraniční hodnotu.

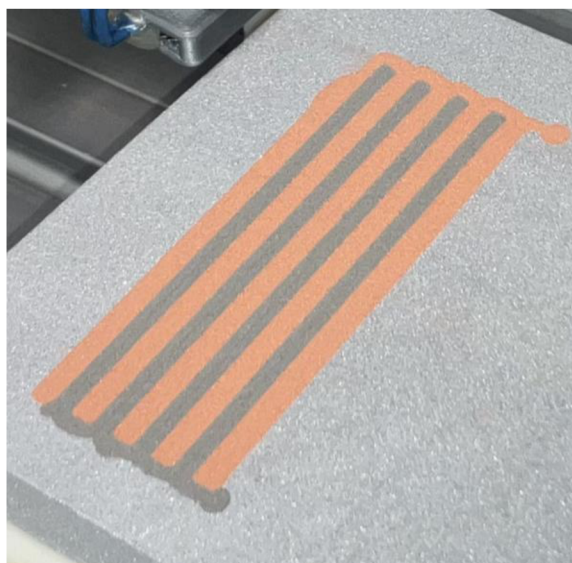
10.2 DÁVKOVÁNÍ NANÁŠECÍ HLAVY

Pro testování nanášecí hlavice byl vytvořen jednoduchý program, který řídil potřebné pohyby nanášecí hlavice. Nejprve byly zásobníky naplněny příslušným práškovým materiálem a poté bylo spuštěno dávkování. V průběhu testování se nanášecí hlavice pohybovala pomocí lineárních pojezdů po předem stanovené trajektorii. Během tohoto pohybu byl materiál dávkován na pracovní plochu a současně byla sledována šířka nanášené stopy. Cílem bylo zajistit, aby šířka stopy byla konzistentní po celou dobu nanášení.

Při testování, viz Obr. 10-1, byl nanášen prášek z maraging oceli a měděný prášek. I přes výrazně horší sypné vlastnosti měděného prášku byly oba tyto materiály nanášený bez jakéhokoliv defektu. Na Obr. 10-2 byl testován opět prášek z maraging oceli, ale v kombinaci s práškem CuCr1Zr. Při tomto testování byla opět sledována konstantní šířka nanášené vrstvy.



Obr. 10-1 Nanesená testovací vrstva



Obr. 10-2 Detail nanesené testovací vrstvy

Šířka nanášené linky byla v těchto případech nastavena na 1,5 mm. Tato hodnota byla zvolena na základě poznatků získaných z původní verze této nanášecí hlavy. Při nanášení testovacího vzorku byla také postupně měněna rychlost nanášecí hlavy. Pro prášek z maraging oceli byla nakonec vybrána rychlost 140 mm/s. Pro měděný prášek, vzhledem k jeho horším sypným vlastnostem, byla zvolena rychlost 100 mm/s. Je snaha prášek nanášet co nejrychleji ale při použití vyšších rychlostí nebyla šířka nanesené linky konstantní.

10.3 DÁVKOVÁNÍ PŘÍDAVNÝCH ZÁSOBNÍKŮ

Pro testování přídatných zásobníků byl vytvořen podobný řídicí program jako pro nanášecí hlavici, který umožnil aktivaci jednotlivých zásobníků. Nicméně v případě těchto zásobníků nebyla požadována tak vysoká přesnost dávkování jako u nanášecí hlavy. Proto byly přídatné zásobníky testovány především na spolehlivost uzavření výstupní části dávkovacího zařízení. Cílem bylo zajistit, aby se výstupní části zásobníků správně uzavřely a zamezily tak nežádoucímu úniku materiálu mimo aktivní dobu.

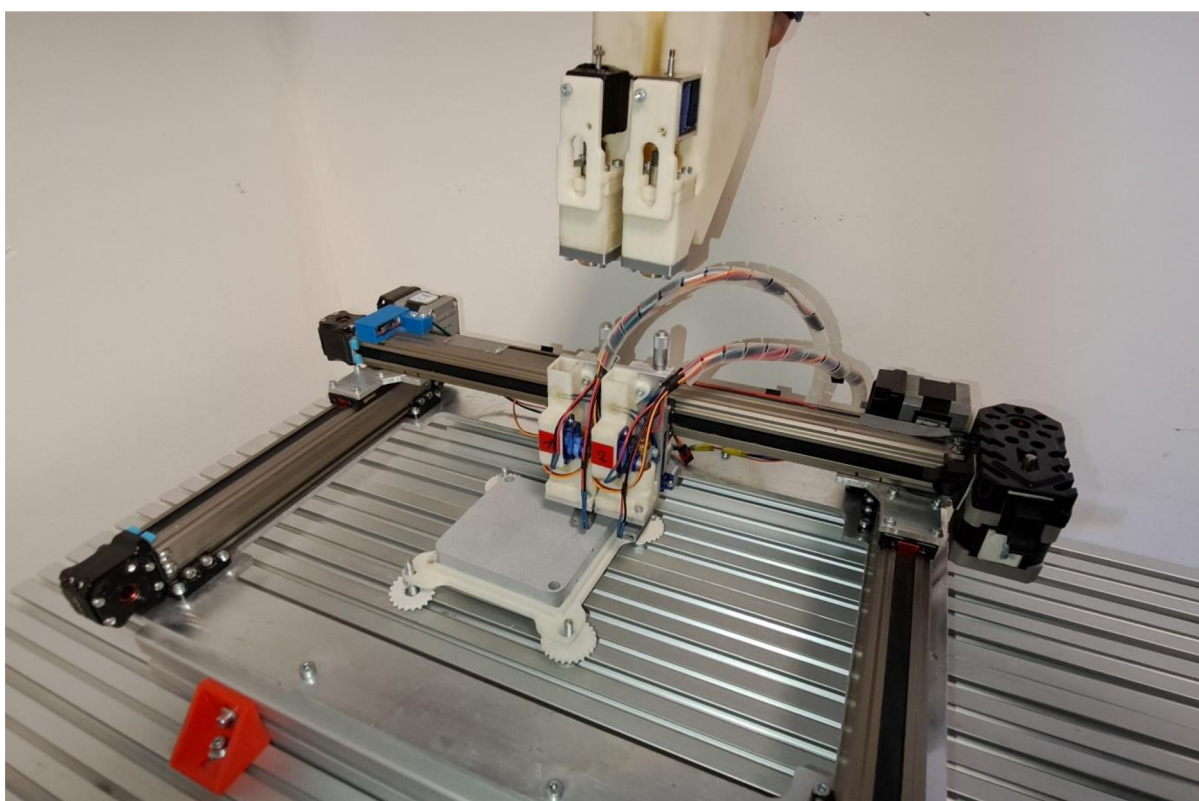
Při testování tyto zásobníky bez problému dávkovaly materiál do nanášecí hlavy a zároveň při zavření výstupní trysky nedocházelo k samovolnému sypání materiálu. Díky chemickému leštění povrchu také nedocházelo k ulpívání materiálu na stěnách zásobníků, což výrazně zlepšilo chování samotného materiálu v zásobnících.

11 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat rešerši na systémy potřebné pro správné fungování nanášecí hlavy a přídavných zásobníků. Byla proto zpracována rešerše na senzorové systémy, dávkovací zařízení a řídicí systém. Následně byly vypracovány koncepční řešení, které umožnily lepší porozumění dané problematice a především chování dávkovaného materiálu v různých podmínkách. Na základě testování těchto konceptů byly vytvořeny přídavné zásobníky a byla vylepšená konstrukce nanášecí hlavy.

Všechny potřebné součásti byly vyrobeny a celé zařízení, včetně přídavných zásobníků, bylo zkompletováno, viz Obr. 11-1. Následovalo testování tohoto zařízení na materiálech, které mají být primárně nanášeny, a to maraging ocel a měděný prášek. Prášek z maraging oceli má velmi dobré sypné vlastnosti, a tak je jeho dávkování bezproblémové. Měděný prášek má horší sypné vlastnosti a při navlhnutí může docházet k hrudkování. Tato vlastnost v krajních mezích představuje problém, ale po přesetí prášku přes filtrační síto je možné prášek spolehlivě dávkovat. Byl také testován materiál CuCr1Zr, který může být použit jako nástupce měděného prášku z důvodu lepších mechanických a sypných vlastností.

Nanášecí hlava tedy umožňuje spolehlivé dávkování testovaných materiálů. Byly také zrealizovány přídavné zásobníky, které umožňují doplnění nanášecí hlavy v případě, že senzory v nanášecí hlavě zaregistrují pokles hladiny materiálu. Celé zařízení je možné řídit stejným řídicím systémem, jako pohybové ústrojí celého zařízení.



Obr. 11-1 Kompletní sestava zařízení

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] WILSON, Jon S., ed. *Sensor technology handbook*. Burlington: Newnes, c2005. ISBN 0-7506-7729-5.
- [2] SINGH, Tarun. Analog-vs-digital-sensors. SUNRISE MENTORS PVT. LTD. Codingninjas.com [online]. 2023, 29. 9. 2023 [cit. 2023-11-01]. Dostupné z: <https://www.codingninjas.com/studio/library/analog-vs-digital-sensors>
- [3] SMITH, Grant. Strain Gauge Applications - Practical Uses of Strain Gauge Sensors. *DEWEsoft* [online]. 2023, 13.01.2022 [cit. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://dewesoft.com/blog/strain-gauge-applications>
- [4] VOJÁČEK, Antonín. Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. Automatizace.hw [online]. 2022, 19.03.2017 [cit. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [5] LINEAR SOLENOIDS – THE TYPES AND THEIR USES. OEM AUTOMATIC [online]. 2023, 08.02.2022 [cit. 2023-11-15]. Dostupné z: <https://www.oem.co.uk/resources/blog/linear-solenoids>
- [6] Solenoid Coils. IQS Directory [online]. 2023 [cit. 2023-11-15]. Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-coil/solenoid-coils.html>
- [7] Latching Solenoid Theory. TLX Technologies [online]. 2023 [cit. 2023-11-15]. Dostupné z: <https://www.tlxtech.com/solenoid-theory/latching-solenoid-theory>
- [8] HANEY, Robert M. Solenoid Valve Duty Cycle. Electric Solenoid Valves [online]. 2023, 18.10.2022 [cit. 2023-11-15]. Dostupné z: <https://www.electricsolenoidvalves.com/blog/solenoid-valve-duty-cycle/>
- [9] HOW DO ULTRASONIC SENSORS WORK? Senix [online]. © 2023 [cit. 2023-11-27]. Dostupné z: <https://senix.com/how-do-ultrasonic-sensors-work/>
- [10] How Ultrasonic Sensors Work. MaxBotix [online]. © 2023, 1.3.2023 [cit. 2023-11-27]. Dostupné z: <https://maxbotix.com/blogs/blog/how-ultrasonic-sensors-work>
- [11] KAUPPILA, Ile. Selective Laser Melting (SLM 3D Printing) – The Ultimate Guide. All3DP [online]. © 2023, 1.2.2023 [cit. 2023-11-28]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/>
- [12] ŠPLÍČHAL, Jan. 3D tisk kovových materiálů. Technickytydenik.cz [online]. 2020 [cit. 2023-11-28]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/3d-tisk-kovovych-materialu_50018.html
- [13] GURÁŇ, Radoslav. Konstrukce nanášecího systému pro zpracování dvou kovových prášků pomocí 3D tisku. B.m., 2019. Vysoké učení technické v brně. Dostupné z: <https://dSPACE.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/179021>

- [14] Ultrazvukový snímač vzdálenosti ME007YS. Botland [online]. © 2023 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <https://botland.cz/ultrazvukove-snimace-vzdalenosti/15715-ultrazvukovy-snimac-vzdalenosti-me007ys-28-450cm-vodotesny-dfrobot-sen0312-6959420915743.html>
- [15] Ultrazvukový snímač vzdálenosti HC-SR04. Botland [online]. © 2023 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <https://botland.cz/ultrazvukove-snimace-vzdalenosti/1420-ultrazvukovy-snimac-vzdalenosti-hc-sr04-2-200-cm-justpi-5903351241366.html>
- [16] Opensource.com [online]. 2024 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://opensource.com/resources/what-arduino>
- [17] Comprehensive guide to using a continuity tester. Fluke.com [online]. c2024 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/digital-multimeters/how-to-test-for-continuity>
- [18] KAFKA, Richard, Jan FOLTÝN, Filip GRYGAR, Jiří ŽÁČEK a Matej KUHAJDIK. Návrh a realizace nanášedce pro 3D tisk ze dvou kovových prášků. 2020.
- [19] Arduino Uno WiFi REV2. Arduino Official Store [online]. c 2021 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/collections/boards-modules/products/arduino-uno-wifi-rev2>
- [20] IOT výstupní periferie. Drátek.cz [online]. [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://dratek.cz/179-arduino-vystupni-periferie/>
- [21] How Servo Motors Work. In: Jameco Electronics [online]. c2002-2024 [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.jameco.com/Jameco/workshop/Howitworks/how-servo-motors-work.html>
- [22] How Servo Motor Works & Interface It With Arduino. In: Last Minute Engineers [online]. c2024 [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/servo-motor-arduino-tutorial/>
- [23] Open Source desktop 3D print smoother [online]. 2019 [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.geeky-gadgets.com/3d-print-smoother-05-08-2019/>
- [24] NORTH & SOUTH GOOD TO KNOWS [online]. 2020 [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.first4magnets.com/blog/north-south-good-to-knows/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ABS	Akrylonitril Butadien Styren
FDM	Fused Deposition Material
LED	Light Emiting Diode
SLM	Selective Laser Melting