



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE KOMORY PRO ODSTRANĚNÍ
PRÁŠKU Z DÍLŮ VYROBENÝCH SLM TECHNOLOGIÍ**

DESIGN OF POWDER REMOVAL CHAMBER FOR PARTS MADE BY SLM TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Asszonyi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Ondřej Asszonyi**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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 komory pro odstranění prášku z dílů vyrobených SLM technologií

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie Selective Laser Melting (SLM) umožňuje výrobu tvarově složitých dílů z kovových materiálů aditivním způsobem. Pro plochy rovnoběžně nebo úhlem menším než 45° vůči základní platformě je nutné vytvořit podpůrné struktury. V těchto strukturách nebo v dutinách samotného dílu je po dokončení aditivní výroby zachycen volný prášek, který je třeba před dalšími operacemi odstranit. Při odstranění prášku z větších dílů ovšem není snadné s dílem manipulovat a shromáždit vysypaný prášek, aniž by byl kontaminován nečistotami.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je vyvinout komoru pro odstranění volného kovového prášku z SLM dílů, která bude splňovat tyto parametry: zabrání kontaminaci prášku, zajistí nešíření prachu do okolí, umožní polohování dílu, umožní čištění dílu, zajistí sběr prášku.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- navrhnout koncepční varianty řešení komory,
- navrhnout variantu pro práci s reaktivními materiály,
- zkonstruovat komoru pro manuální a automatický režim provozu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

YADROITSEV, I. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT:

Tato bakalářská práce je zaměřena na konstrukci zařízení pro odstranění prášku z dílů vyrobených SLM technologií. Toto zařízením by mělo usnadňovat a zvýšit bezpečnost práce v SLM laboratoři na FSI na VUT v Brně. Výsledné zařízení je popsáno v kapitolách zabývajících se konstrukčním a koncepčním řešením a následně je vše shrnuto v závěru.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Komora, kovový prášek, vibrační mechanismus, inertní atmosféra

ABSTRACT:

This bachelor's thesis aimed to design a powder removal device for parts made by SLM technology. This device should make work in SLM laboratory on FME on BUT. Final device is described in chapters four and five and everything is summarized in conclusion.

KEY WORDS:

Chamber, metal powder, vibration mechanism, inert atmosphere

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

ASSZONYI, O. *Konstrukce komory pro odstranění prášku z dílů vyrobených SLM technologií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně za použití citované literatury a zdrojů pod odborným vedením pana doc. Ing. Daniela Koutného Ph.D.

V Brně dne 17. května 2018

PODĚKOVÁNÍ:

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi s touto prací nějak pomohli, ať už radami, připomínkami nebo svou podporou. Zejména bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Danielovi Koutnému Ph.D. za jeho vedení, rady a konstruktivní připomínky.

OBSAH

OBSAH	13
1 ÚVOD	15
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	16
2.1 Zpracování výrobku po 3D tisku	16
2.1.1 Odstranění podpůrných struktur a přebytečného prášku	16
2.1.2 Uvolnění výrobku od platformy	17
2.2 Situace na trhu	17
2.2.1 Solukon	18
2.3 Vibrační motory	18
2.3.1 Pneumatické budiče vibrací	19
2.3.2 Hydraulické budiče vibrací	21
2.3.3 Mechanické budiče vibrací	22
2.3.4 Elektrodynamické budiče vibrací	22
2.3.5 Piezoelektrické budiče vibrací	23
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
3.1 Zhodnocení problematiky	24
3.1.1 Metoda odstraňování prášku z výrobku	24
3.1.2 Tiskový materiál	24
3.1.3 Kontaminace a reaktivnost prášku	24
3.1.4 Rozměry dílů	25
3.2 Cíle práce	25
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ.....	26
4.1 Pohyb výrobku v komoře	26
4.2 Komora	28
4.2.1 Tvar komory	28
4.2.2 Nosná konstrukce	29
4.3 Vibrační mechanismus	29
4.3.1 Vlastní navrhnutý mechanismus	29
4.3.2 Komerčně nabízené zařízení s přímočarým pohybem	30
4.3.3 Komerčně nabízený vibrační motor	31
4.4 Přívod plynu k vibračnímu motoru	32
4.5 Uchycení hřídele	33
5 KONSTRUČNÍ ŘEŠENÍ	35
5.1 Komora	35
5.1.1 Tvar a rozměry komory	35
5.2 Nosná konstrukce	36
5.3 Vnitřní mechanismus	37
5.3.1 Upevňovací platforma	37
5.3.2 Uchycení upevňovací platformy na rotační hřídel	37
5.3.3 Rotační hřídel	38
5.4 Inertní atmosféra	38
5.5 Utěsnění komory	39
5.6 Převodový motor	40
5.7 Pevnostní výpočet a analýza	40
5.7.1 Hřídel	40
5.7.2 Kolík	43

5.7.3 Vyztužení komory.....	44
6 DISKUZE	46
7 ZÁVĚR	47
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	48
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	50
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	51
11 SEZNAM PŘÍLOH.....	52

1 ÚVOD

1

3D tisk se stává nejen populárním nástrojem, ale především umožňuje inovativnější přístup k samotné konstrukci jednotlivých konstrukčních prvků. Má minimálně dvě velké výhody, oproti jiným, zatím používaným, postupům.

První výhoda je v tom, že konstruktérům usnadňuje práci a šetří tak čas. 3D tisk jednak umožňuje výrobu přesných modelů, za krátký čas, ale také lze touto technologií přímo vyrábět některé konstrukční součásti. Při výrobě takových součástí konstruktérovi stačí výrobek, který chce vyrobit, jen vymodelovat v CAD programu (např. Inventor, Solidworks), potom ho nahrát do slicer programu, který ten model zpracuje pro danou 3D tiskárnu a vytisknout. Nespornou výhodou je také skutečnost, že ovládání 3D tiskáren je nesrovnatelně jednodušší, a tak není, tento způsob výroby tolik náročný na obsluhu.

Druhou výhodou 3D tisku je možnost výroby tvarově složitých výrobků. Například umí vytvořit i vnitřní dutiny, které se jinými metodami velmi těžko vyrábějí.

Z ekonomického hlediska se však sériová výroba, 3D tiskem, v dnešní době ještě moc nevyplatí, proto se zatím tato technologie nejvíce využívá u výroby kusových dílů pro malovýrobu, pro designerské demonstrování modelů nebo k výrobě zmenšených prototypů.

3D tisk byl zpočátku představován výhradně procesem tavení plastového drátu a následného nanášení, roztaveného plastu, v jednotlivých vrstvách na pracovní platformu. Dnes se však stále více rozšiřuje 3D tisk i z jiných materiálů než jen z lehce tavitelných plastů. Pro strojírenský průmysl je významná technologie 3D tisku z kovových materiálů. Například, technologie Selective Laser Melting (SLM), pracuje na principu nanesení tenké vrstvy kovového prášku a následného natavení laserem na potřebných místech, základní platforma v každém kroku klesne o výšku jedné vrstvy a nanese se nová vrstva prášku, která se zase taví laserem. Celý proces se opakuje, dokud takto není vytvořen celý výrobek.

Jedním ze zařízení, využívající SLM technologii, je SLM 280 HL, které je využíváno ÚK, na FSI VUT v Brně. Stejně jako v případě jiných technologií 3D tisku, i u tohoto zařízení, jsou nutné některé dokončovací operace. Je potřeba díl zbavit přebytečného nespečeného prášku, díl odříznout ze základní platformy, zbavit nepotřebných podpurných struktur, případně ještě další operace, jako je broušení, leštění apod.

Na odstranění přebytečného prášku není doposud, na Ústavu Konstruování, efektivní způsob, a tak se používají prostředky a metody manuální, jako je oklepávání dílu kladívkem, či použití vysavače. Tyto metody jsou neefektivní nejen z hlediska časové náročnosti dokončovacích operací, ale i z důvodu toho, že se může prášek kontaminovat a zhoršit se tak jeho kvalita, pro případné další použití. Tato metoda navíc není vhodná z bezpečnostního hlediska, pro obsluhu. Jemný prášek se dostává do okolní atmosféry a může způsobit vdechnutí obsluhou. Obsluha proto musí používat respirační ochranné pomůcky. Dalším bezpečnostním rizikem je potenciální vznětlivost a výbušnost jemného kovového prášku v ovzduší.

Při zvážení těchto skutečností, vyvstala potřeba vyvinout technologii (zařízení), která proces dokončovacích operací, v oblasti odstranění kovového prášku, zefektivní a zároveň zajistí větší bezpečnost. Tuto potřebu řeší tato práce.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1

2.1 Zpracování výrobku po 3D tisku

Po vyhotovení výrobku 3D tiskem, je zapotřebí několika následných dokončovacích operací. Základní dokončovací operací je nutnost odstranění nezpracovaného tiskového média (u SLM 280 HL jde o kovový prášek). Dalšími dokončovacími operacemi jsou, uvolnění od základní platformy, odstranění nepotřebných podpůrných struktur, případně broušení, leštění, nanášení ochranných, či jiných povlaků atd. Tyto operace se liší podle použité technologie 3D tisku a výsledných požadovaných vlastností výrobku.

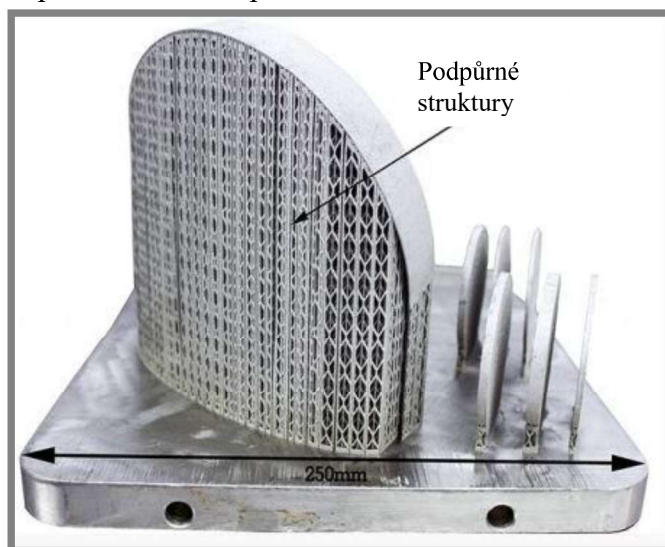
2.1.1

2.1.1 Odstranění podpůrných struktur a přebytečného prášku

Po vyhotovení dílu v 3D tiskárně, výrobek obsahuje materiál, který je z hlediska konečného tvaru a struktury výrobku přebytečný nebo nechtěný. Jedná se o podpůrné struktury a nezpracovaný materiál (u SLM 280 HL jde o kovový prášek).

Podpůrné struktury se odstraňují dvěma způsoby, a to podle toho, z jakého materiálu jsou tyto podpůrné struktury. Pokud jsou ze stejného materiálu jako výrobek, odstraňují se mechanicky (kleštěmi, bruskou, pilou atd.). Když jsou tyto struktury vyrobené z jiného materiálu (většinou u 3D tisku, je médiem tisku plast), mohou se odstraňovat chemickou metodou, např. ponořením výrobku do chemické lázně, která rozpouští pouze materiál, ze kterého jsou udělané podpůrné struktury.

Odstranění nezpracovaného prášku je náročný proces. Některé výrobky mají složité tvary, vnitřní dutiny, složitou stavbu podpůrných struktur, proto se z výrobků, nezpracovaný prášek, odstraňuje často obtížně. V dnešní době, pro tento proces, není známa žádná univerzální technologie, a proto se nezpracovaný materiál odstraňuje různými způsoby, podle technologických možností dané výrobní kapacity. Příkladem jsou technologie spočívající při použití vzduchotechniky, přetlakem a podtlakem. Používají se také mechanické postupy ruční nebo částečně mechanizované, jako oklepávání nebo použití vibračních stolů. Tyto procesy jsou však časově náročné a vytváří některá bezpečnostní rizika pro obsluhu.



Obr. 2.1 Výrobek na platformě s podpůrnými strukturami [5]

2.1.2 Uvolnění výrobku od platformy

2.1.2

To, jakým způsobem oddělíme výrobek z platformy, na které probíhá samotný 3D tisk, závisí na typu tiskárny a tiskového média.

U tiskáren, které nepracují s vysokými teplotami, se materiál obvykle nanáší na platformu skleněnou nebo keramickou, která je opatřena vhodným adhesivem. V těchto případech je, pro uvolnění výrobku od platformy, postačující mechanické oddělení lidskou silou. Někdy za pomoci ručních nástrojů, případně chemickým roztokem, rozpouštějícím použitá adhesiva. Těchto postupů se používá většinou u 3D tiskáren, kde tiskovým médiem je plast.

U tiskáren, které tisknou kovovým médiem, dojde většinou k natavení média na platformu, takže zhotovený výrobek je nutné od platformy následně odříznout (např. na pile).

2.2 Situace na trhu

2.2

V dnešní době existuje několik firem, které vyrábějí pracovní stoly, umožňující různé dokončovací operace pro 3D tisk, kde tiskovým médiem je plast. Tyto pracovní stoly jsou obvykle dodávány přímo s 3D tiskárnami, což umožňuje jednodušší manipulaci se zhotovenými výrobky, kde je možné také provádět všechny dokončovací operace po 3D tisku.



Obr. 2.2 Pracovní stůl od firmy 3D Platforms [7]



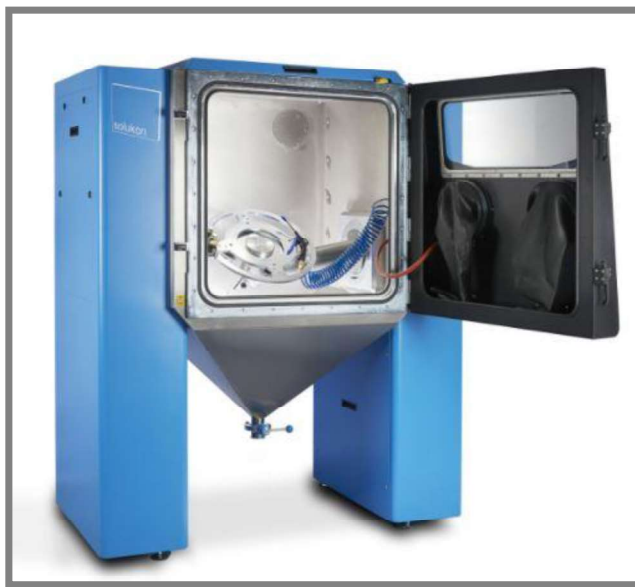
Obr. 2.3 3D tiskárna s krytovaným pracovním stolem [6]

V době, kdy byla zadána tato bakalářská práce, nebylo na trhu žádné zařízení, které by podobnou problematiku řešilo u 3D tisku kovovým práškem (např. pro SLM technologii). Tato skutečnost vedla k zadání této bakalářské práce.

2.2.1

2.2.1 Solukon

V prosinci roku 2017 však, německá firma Solukon, na jednom veletrhu předvedla zařízení, které tuto problematiku řeší. Jedná se o zařízení SFM, které vyrábí ve dvou verzích. SFM-AT300 pro díly s maximální hmotností 60 kg a SFM-AT800 pro díly s hmotností do 300 kg. Obě tyto varianty umožňují odstraňování kovového prášku při inertní atmosféře. Tyto zařízení využívají k odstranění prášku vibrace a rotaci. Jako sekundární možnost, je použito stačeného plynu [8].



Obr. 2.4 Zařízení SFM-AT300 [8]

2.3

2.3 Vibrační motory

Jednou z možností metod zbavení výrobku přebytečného prášku jsou tedy vibrace. Vibrací je možno dosáhnout několika způsoby. Komerčně nabízený způsob jsou vibrační motory (vibrátory), používající různé způsoby jako budiče vibrací. Vibrační motory jsou zařízení, které, při svém provozu, účelně vytváří, pravidelně měnící se sílu, což působí vibrace. Amplitudu a charakter těchto vibrací určuje to, jak se mění síla vytvářena motorem. Můžeme je rozdělit, podle principu na kterém budí vibrace, do několika základních skupin [1]:

- Pneumatické
- Hydraulické
- Mechanické
- Elektrodynamické
- Piezoelektrické

Další skupiny, do kterých můžeme tyto vibrační motory rozdělit, jsou, podle signálu, který produkují:

- sinusový (oscilátory);
- náhodný (generátory náhodného šumu);
- přechodový (zařízení, jež generuje pulzy nebo údery pomocí kladívka);
- periodický (generátor schopný produkovat specifický frekvenční obsah).

2.3.1 Pneumatické budiče vibrací

2.3.1

Pneumatické zařízení jako pohon na buzení vibrací využívá stlačený vzduch. Stlačený vzduch vytváří sílu, která působí na závaží, rozpohybuje ho, a to pak budí vibrace [2]. Mezi pneumatické vibrační motory se řadí:

- Kuličkové
- Turbínové
- Válečkové
- Pístové

Kuličkový budič vibrací

Kuličkový se využívá tam, kde je potřeba dosáhnout vysoké frekvence vibrací. Odstředivá síla, která budí vibrace, je vytvářena pomocí kuličky, která obíhá po broušené dráze, kolem jedné nevlastní osy. Kulička je obvykle vyrobena z oceli používané pro valivá ložiska. Kuličkový vibrátor má tu výhodu, že může pracovat ve všech polohách [2].



Obr. 2.5 Kuličkový vibrační motor [9]

Turbínový budič vibrací

Turbínový se používá tam, kde je ztížena možnost údržby, protože jsou často bezúdržbové. Pracuje tak, že stlačený vzduch pohání turbínové kolo, do kterého jsou vsazeny nevyvážené hmoty. Turbínový vibrátor může pracovat ve všech polohách a navíc, díky speciálnímu turbínovému profilu, se většinou hluková hranice běžícího vibrátoru nedostane nad 70 dB, proto patří mezi nejtišší pneumatické vibrační motory [2].



Obr. 2.6 Turbínové vibrační motory [10]

Válečkový budič vibrací

Válečkový vibrátor se používá tam, kde je potřeba dosáhnout velkých odstředivých sil. Odstředivou sílu vytváří váleček, který rotuje po broušené dráze kolek osy rovnoběžné s vlastní středovou osou. Váleček je rovněž vyroben z oceli používané pro valivá ložiska. Vzhledem k mechanismu může válečkový budič vibrací pracovat jen ve vertikální poloze. K pohonu se využívá lehce olejový stlačený vzduch, z důvodu mazání stykových ploch [2].



Obr. 2.7 Válečkové vibrační motory [11]

Pístový budič vibrací

Pístové vibrátory pracují na principu lineárního kmitání. Píst se uvádí do pohybu pomocí vodícího systému, který vytváří, na obou stranách pístu, vzduchové polštáře, které, díky rozdílu tlaků v jednotlivých polštářích, píst rozpohybují [2].



Obr. 2.8 Pístový vibrační motor [11]

2.3.2 Hydraulické budiče vibrací

2.3.2

Hydraulické budiče vibrací mají jednu významnou výhodu. Tou je jejich schopnost produkovat zároveň statické zatížení a dynamické vibrační zatížení. To může být velmi užitečné, když se testují různé materiály nebo struktury, které jsou v prostředí s větším statickým zatížením, jež může změnit jejich dynamické vlastnosti nebo dokonce i jejich geometrii. Jednou z dalších jejich výhod je schopnost dát poměrně dlouhý úder a budí tak struktury na velkých amplitudách [1]. Jejich nevýhoda je v tom, že mají oproti ostatním vibrátorům malé frekvence (většinou nepřesahují 1kHz). Používají se například pro testování materiálů, při bourání betonu, udusávání zeminy nebo k usnadnění průchodu zeminy potrubím nebo dopravníkem [3].

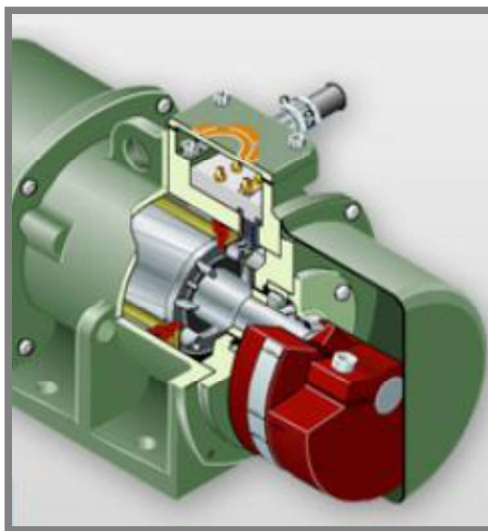


Obr. 2.9 Hydraulický vibrační motor [12]

2.3.3**2.3.3 Mechanické budiče vibrací**

Mechanické vibrátory vytvářejí určitou sílu na různých frekvencích. Vibrace lze získat umístěním nevývahy na rotující hřídel, nebo pomocí excentru.

Tyto mechanické budiče vibrací jsou jedny z nejrozšířenějších v technické praxi. Využívají se jednak při přepravě sypkých materiálů, při diagnostice strojních součástí nebo třeba v mobilních telefonech.



Obr. 2.10 Mechanický vibrátor [13]

Vibrátory s nevývahami

Principem je tvoření odstředivých sil pomocí nevývahy na hřídeli, se kterou rotuje elektromotor. Vyvozenou sílu můžeme měnit pomocí změny nevývahy. Frekvence se dá měnit otáčkami elektromotoru.

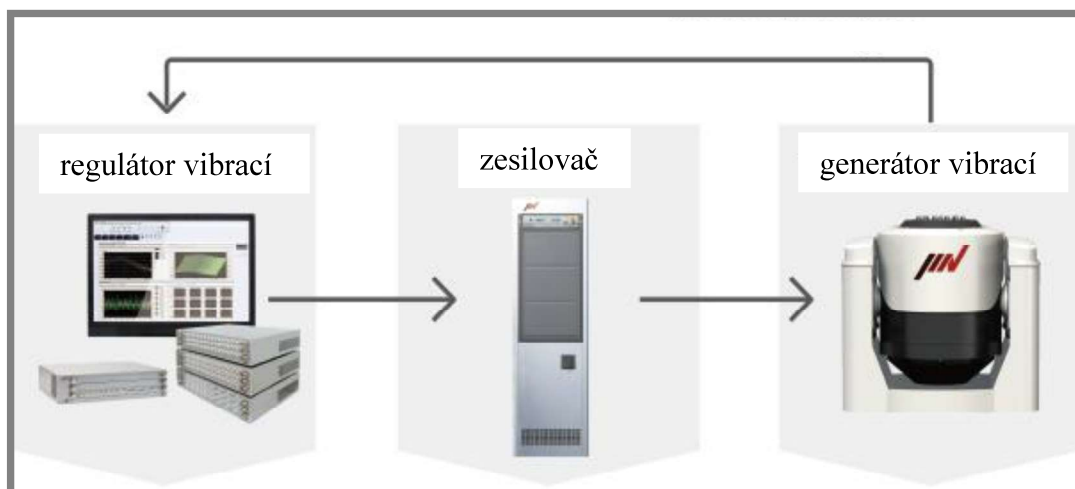
Vibrátory založené na principu excentru

Konstrukce excentrického vibrátoru je podobná klikové hřídeli, s tím rozdílem, že klika na klikové hřídeli je nahrazena excentrem, který vytváří vibrace. Tato technologie se využívá při udusávání zeminy nebo asfaltu. Excentrické vibrátory mohou využívat elektromotor nebo spalovací motor [4]. Nevýhodou je to, že nemůžeme měnit amplitudu za chodu stroje.

2.3.4**2.3.4 Elektrodynamické budiče vibrací**

Elektrodynamické vibrátory většinou slouží k různým simulacím. Měří se dynamické veličiny, jako je síla, rychlost a zrychlení. Tyto vibrátory umí simulovat různé podmínky, což napomáhá zlepšování produktu, podrobeného simulaci. Zařízení se skládá ze šejkru a řídicí skříně. Pracuje s otočnou cívkou uchycenou pružinami

umístěnou v magnetickém poli. Změnou magnetického pole regulujeme frekvenci a amplitudu vibrací.



Obr. 2.11 Elektrodynamický budič vibrací [14]

2.3.5 Piezoelektrické budiče vibrací

2.3.5

Metoda využívající piezoelektrický jev je docela moderní metoda, která se začíná využívat. Je to velmi efektivní metoda, protože pomocí zařízení, která jsou relativně malá, můžeme dosáhnout sil o velikosti několika desítek kN. Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování a naopak. Tento jev může nastat pouze u krystalů, které nemají střed symetrie [16].



Obr. 2.12 Piezoelektrické pohony [15]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

V době zadávání této bakalářské práce neexistovalo žádné zařízení komerčně nabízené, které by splňovalo kritéria, jež musí být splněna, aby mohlo zařízení pracovat automaticky a bezpečně pro SLM laboratoř na Ústavu Konstruování fakulty Strojního inženýrství na VUT v Brně.

3.1 Zhodnocení problematiky

3.1.1 Metoda odstraňování prášku z výrobku

Vzhledem k tomu, že díly mohou mít velmi složitý tvar a různé podpůrné struktury, je potřeba zvolit nejefektivnější postup. Zařízení by mělo efektivně odstranit většinu prášku z výrobku. Doposud nejrychlejší a zároveň nejčistší metoda je odstranit prášek z dílu mechanickým ručním ometáním. To však nelze použít univerzálně, protože díky tvarové složitosti výrobku, tato metoda někdy neumožňuje dostatečné odstranění prášku z dutin podpůrných struktur. Další metoda, která připadá v úvahu je vyfouknutí nebo vysání prášku stlačeným plynem nebo kapalinou. V takovém případě by zdroj plynu nebo kapaliny musel být pohyblivý, aby jím bylo možno odstranit prášek ze všech částí dílu. Plynová nebo kapalinová verze, odstraňování prášku, sebou nese to, že musí sedimentovat, což prodlužuje dobu operace. Poslední metoda odstraňování prášku je vibrací a natáčením výrobku do různých úhlů, při kterých dojde k odstranění prášku z výrobku. Tato metoda se jeví jako nejefektivnější.

3.1.2 Tiskový materiál

Zařízení SLM 280 HL, umístěné na Ústavu Konstruování, umožňuje práci s širokou škálou kovových materiálů. Jedná se o nerezové oceli (1.4404, 1.4410), nástrojové oceli (1.2344, 1.2709), kobalt – chrom (2.4723 / ASTM F75) nebo niklové slitiny (Inconel 625, Inconel 718). Navíc díky tomu, že zařízení umožňuje napuštění pracovní komory inertní atmosférou Argonu, je možnost tisknout i z reaktivních materiálů jako jsou slitiny hliníku (AlSi12, AlSi10) nebo slitiny titanu (TiAl6Nb7, TiAl6V4) [17]. Jednotlivé materiály se chovají různě, a tak je snaha o to, aby zařízení pro jejich odstraňování bylo univerzální a umožňovalo odstraňování více druhů prášků.

3.1.3 Kontaminace a reaktivnost prášku

Po vytištění výrobku je na něm velké množství prášku, který by se dal recyklovat. Z tohoto důvodu je snaha o to, aby nebyl během odstraňování kontaminován a dal se znovu použít. Zároveň jsou některé materiály reaktivní, zvláště pokud se rozptýlí do vzduchu. Takto rozptýlený prášek je navíc zdravotně škodlivý pro obsluhu, pokud by se vdechl. Proto musí být zařízení uzavřené, utěsněné, s inertní atmosférou uvnitř zařízení.

3.1.4 Rozměry dílů

3.1.4

3D tiskárny pracující na principu SLM (Selective Laser Melting) umožňují tisk dílů různých rozměrů a hmotností. Některé umožňují tisk dílů až do rozměrů 800 x 400 x 550 mm a hmotnosti 300 kg. Tiskárna SLM 280 HL umožňuje výrobu dílů o rozměrech 280 x 280 x 300 mm nebo 100 x 100 x 100 mm.

3.2 Cíle práce

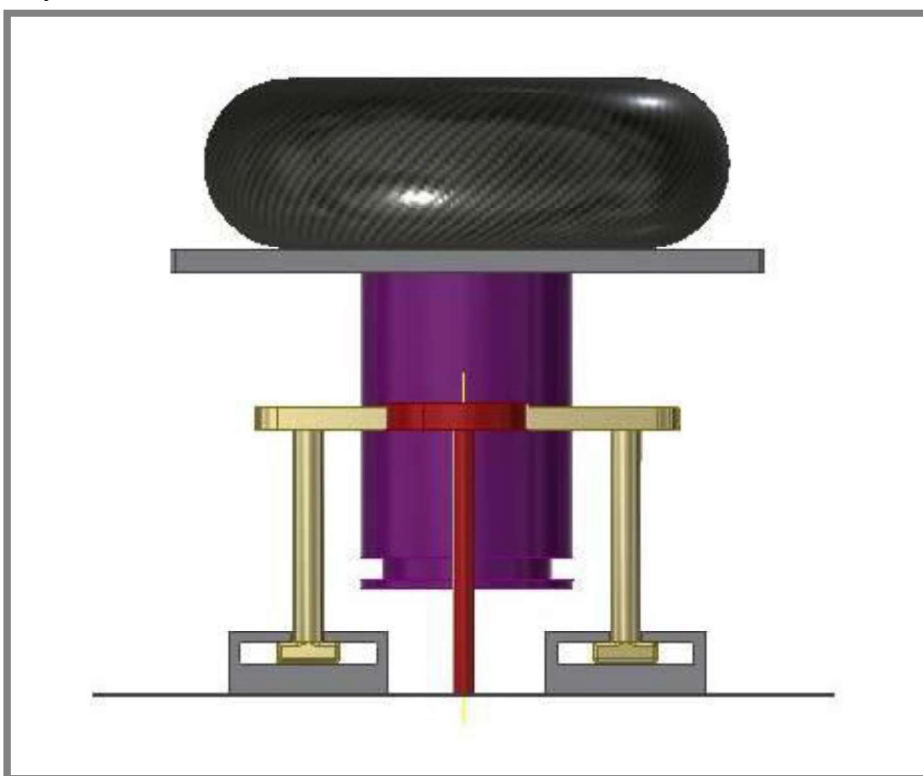
3.2

Z analýzy vyplývá několik základních kritérií, na které se tato práce zaměří. Zařízení bude odstraňovat prášek z dílů vibracemi. Zařízení bude utěsněná komora umožňující naplnění inertní atmosférou, a tak i práci s reaktivními prášky. Bude umožňovat demontování základních částí, aby se mohla komora vyčistit a použít na jiný materiál, aniž by se tím předešlým kontaminoval. Zařízení bude umožňovat odstraňování prášku z dílů o rozměrech 280 x 280 x 300 mm a 100 x 100 x 100 mm, do hmotnosti 100 kg. Zařízení bude navrženo pro SLM laboratoř na Ústavu Konstruování.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Pohyb výrobku v komoře

Jednou ze základních skutečností, kterou si bylo potřeba stanovit, byl způsob pohybu výrobku v komoře, spolu s vibracemi. Nejjednodušší variantou bylo, aby se výrobek vůbec nepohyboval a k odstranění prášku by došlo pouhými vibracemi. Byl by uchycen napevno na platformě osazené vibračním motorem. Tato varianta by byla prostorově nejúspornější. Přináší však sebou řadu problémů. Prášek by se z výrobku vysypával jen v jedné poloze, a nemuselo by dojít k dostatečnému, celkovému, odstranění prášku, čímž by efektivita byla nižší. Další otázka byla v tom, že výrobky mohou být tvarově různé, a nebylo by tak jednoznačné, do jaké polohy, ten který výrobek, uchytit.

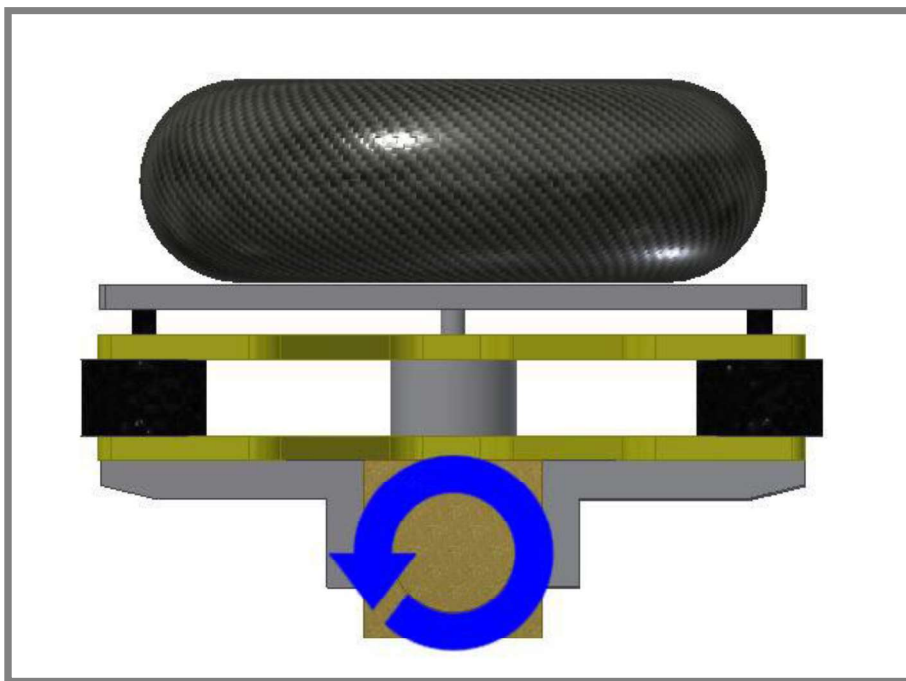


Obr. 4.1 Nepohyblivé uchycení dílu v komoře

Další varianta byla, že by díl rotoval nebo se nakláněl kolem nějaké osy a zároveň vibroval. To by řešilo negativa první varianty. V takovém případě připadají v úvahu dvě řešení.

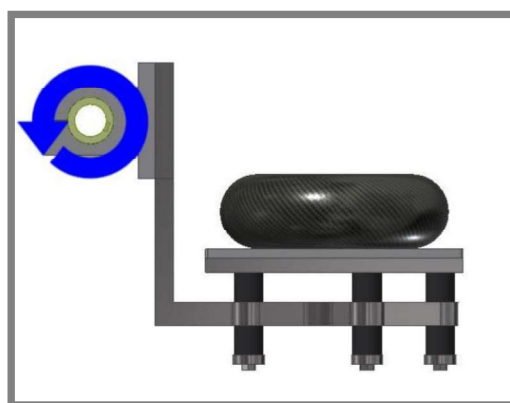
Výrobek by rotoval kolem osy umístěné pod dílem. Toto řešení by umožňovalo vysypávání prášku z dílu ve všech polohách, a tak by byla jeho efektivita oproti pevnému uchycení mnohem větší. Nevýhodou takového řešení však bylo, že výsledná komora by musela být mnohem větší než při první variantě. Zároveň, by obsluha musela uchycovat díl na konstrukci umístěnou uprostřed komory, což se nejevilo jako vhodné.

Výrobek by rotoval kolem osy umístěné jinde než pod výrobkem. Jednou z takových možností, bylo umístit osu rotace za výrobek. Taková varianta by umožňovala upínat výrobek do komory blízko vstupního otvoru, což se pro obsluhu komory jeví výhodně, z důvodu manipulace. Efektivita by byla stejná jako v případě osy pod výrobkem.



Obr. 4.2 Pohyblivé uchycení dílu v komoře s osou rotace pod dílem

Výrobek by rotoval kolem osy umístěné za dílem, a navíc by docházelo ještě k vertikální rotaci celé platformy. Tato varianta by mohla ještě o něco zvýšit efektivitu procesu. Zvýšení efektivity však nebyla takové, aby se vyplatila náročnější a komplikovanější konstrukce komory.



Obr. 4.3 Pohyblivé uchycení dílu v komoře s osou rotace za dílem

Po zvážení všech kladů a záporů jednotlivých variant, byla zvolena verze rotace kolem osy umístěné za výrobkem.

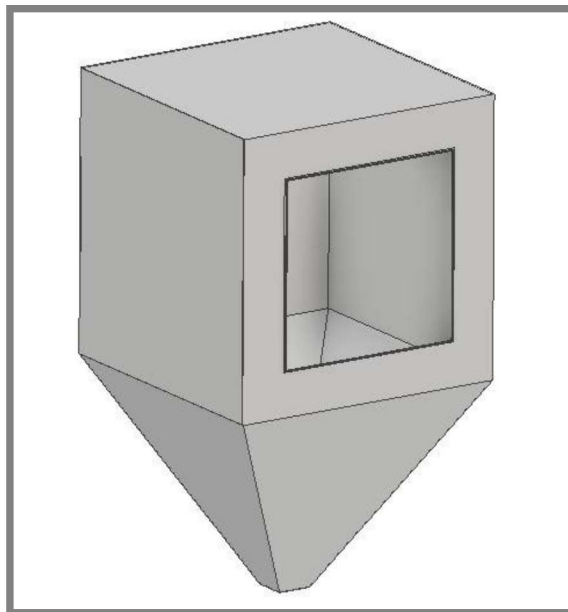
4.2

4.2 Komora

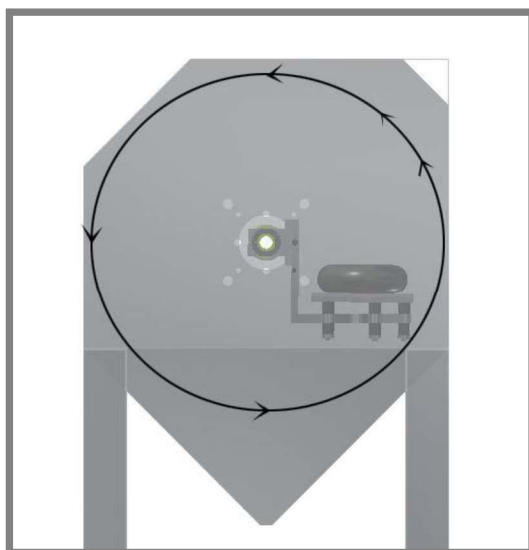
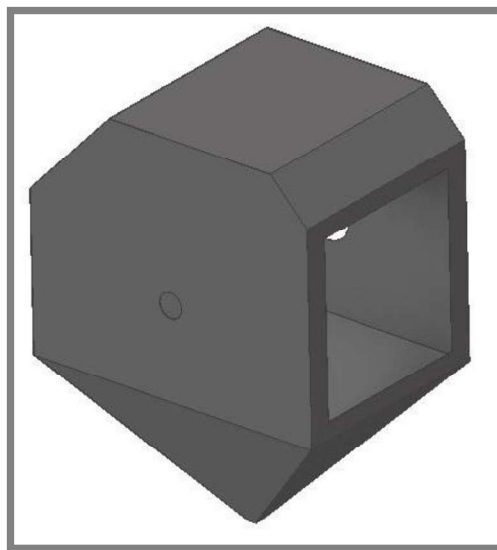
4.2.1

4.2.1 Tvar komory

Výsledný tvar komory závisí především na volbě pohybu výrobku v komoře. Pro zvolený způsob pohybu výrobku, s umístěním osy rotace za výrobkem, se jako nejvhodnější řešení jevil tvar kvádru, dostatečně velký na to, aby v něm byl výrobek schopen rotovat o 360° . Pod tímto kvádrem by byl umístěný čtyřboký jehlan (násypka) na jehož konci by byla navařená koncovka ISO KF-40, pro připojení kontejneru na uskladnění prášku.

**Obr. 4.4** Základní tvar komory

Postupně po zvážení geometrie rotace výrobku, byly udělány úpravy z původní konstrukce. Dvě horní hrany byly sraženy a osa rotace se posunula dolů tak, že výrobek bude k rotaci využívat nejen horní prostor (kvádr) ale i čtyřboký jehlan umístěný pod kvádrem.

**Obr. 4.5** Geometrie rotace**Obr. 4.6** Upravený tvar komory

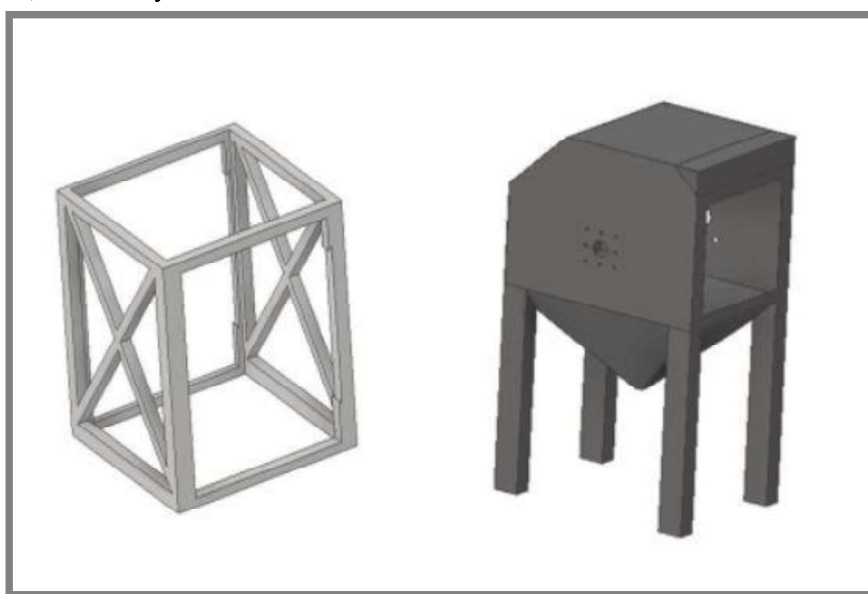
4.2.2 Nosná konstrukce

4.2.2

Celá komora bude umístěna tak, aby pod ní bylo možné připojit skladovací kontejner na prášek o výšce 420 mm a zároveň, aby dveře do komory byly ve standardní manipulační výšce, pro bezproblémovou obsluhu.

První návrh byl, aby nosná konstrukce, byla složená z několika ocelových profilů, na kterou by se komora usadila. Vzhledem k tomu, že komora při chodu může, vyvolával rázy a vibrace v konstrukci, tak pouhé gravitační usazení do konstrukce je nedostačující. Je tudíž potřeba komoru na nosnou konstrukci přivařit nebo přichytit šroubovými spoji.

Druhý způsob řešení je upevnit nohy přímo na komoru (svářením). Nejefektivnější se ukázalo upevnit profilové nosníky (L, trojúhelníkový nebo obdélníkový profil) zespodu na jehlan. Tato varianta se jeví jako nejlepší z hlediska jak montáže, tak i ceny.



Obr. 4.7 Varianty nosné konstrukce

4.3 Vibrační mechanismus

4.3

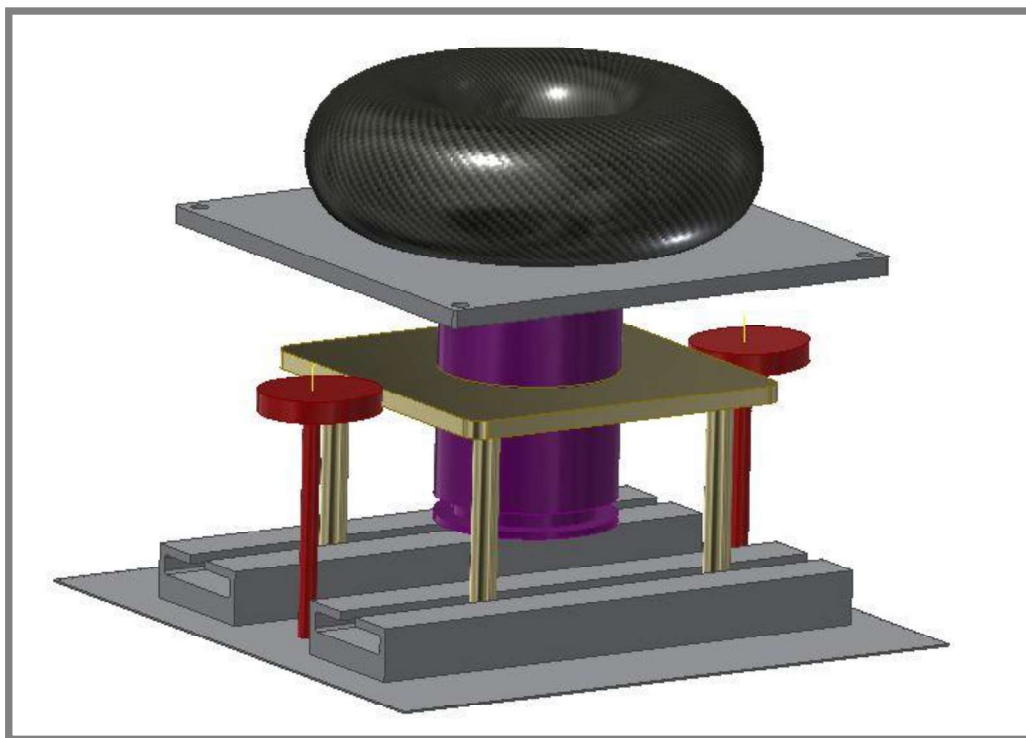
Při řešení samotného vibračního pohybu, který by způsobil odstranění a sesypání prášku z výrobku, se nabízely tři základní postupy. První postup byl navrhnout vlastní mechanismus pro vibrační pohyb. Druhý postup byl, použít komerčně dostupné zařízení s přímočarým pohybem. Třetí postup byl, použít pro generování vibrací vibrační motor, zapojený do vlastní konstrukce.

4.3.1 Vlastní navrhnutý mechanismus

4.3.1

První varianta byla navrhnout vlastní vibrační mechanismus. Vzhledem k tomu, že výrobek bude v komoře rotovat, musel by mechanismus s výrobkem pohybovat rovnoběžně s osou rotace výrobku tak, aby se síla potřebná na vibrace, s rotací výrobku neměnila. Tohle varianta by mohla být řešena tak, že by dva vačkové mechanismy, byly umístěné na bocích upevňovací platformy pro výrobek a pohybovaly by

s výrobkem lineárním vratným pohybem. Tato varianta by měla výhodu v tom, že by se dala dobře regulovat rychlost vratného pohybu, a různým návrhem vačky, i velikost pohybu. Nevýhodou této varianty je složitost mechanismu a s tím související složitost výroby a montáže. Dále pak je předpoklad rychlého opotřebení vačky a dosedající plochy platformy, což je nežádoucí.

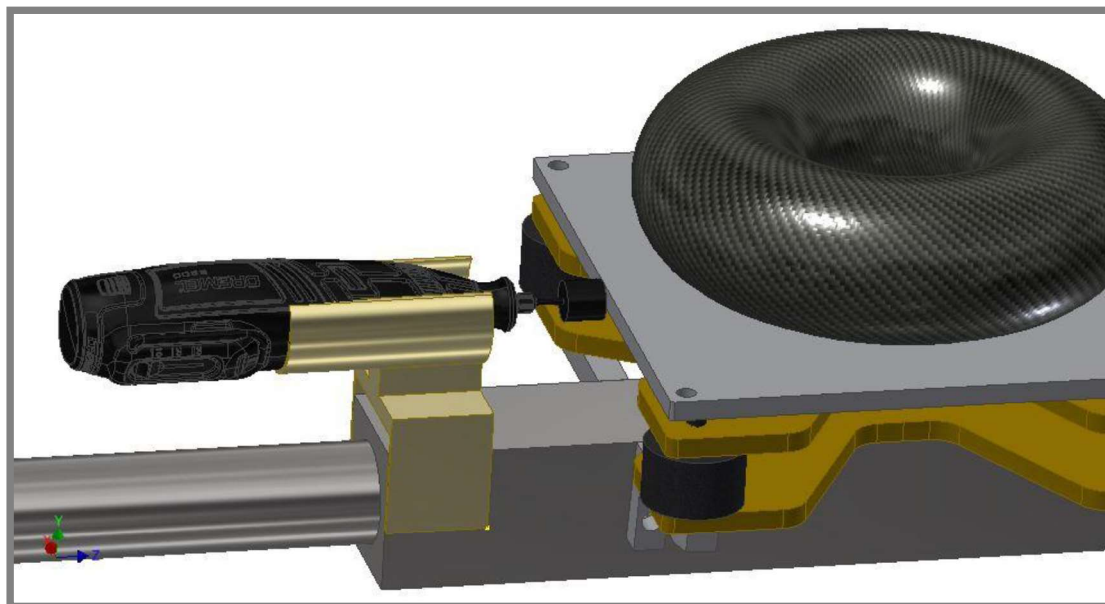


Obr. 4.8 Vačkový mechanismus

4.3.2

4.3.2 Komerčně nabízené zařízení s přímočarým pohybem

Druhá varianta je zpracování komerčně nabízeného zařízení, a přímočarým pohybem. Princip by byl stejný jako u navrženého vačkového mechanismu, s tím rozdílem, že místo vačky by uchycovací deskou hýbalo nějaké komerčně nabízené zařízení. Jednalo by se o nástroj typu gravírovací pistole, bouracího kladiva, nebo piezoelektrických systémů. Na konec těchto nástrojů by se umístil plastový nebo pryžový kryt, který by snižoval opotřebení nástroje. Uchycovací platforma by byla položena na pružinách nebo silentblocích, pro umožnění pohybu desky a tlumení nechtěných vibrací přenášných na rotační hřídel. Výhoda této varianty je v tom, že mechanismus je komerčně nabízený, a tak by stačilo jen řešit plastový či pryžový nástavec a uchycení zařízení v komoře. Nevýhoda je v tom, že by nástroj musel být zakrytovaný, aby se nezanessl práškem a nesměl by jiskřit kvůli reaktivnosti prášku, v případě narušení inertní atmosféry. Navíc by bylo nutné vyřešit dostatečně tuhé uchycení pro nástroj na rotační hřídel, které by mohlo přenášet nechtěné vibrace.



Obr. 4.9 Přímochový vibrační mechanismus s použitím gravírovací pistole Dremel

4.3.3 Komerčně nabízený vibrační motor

4.3.3

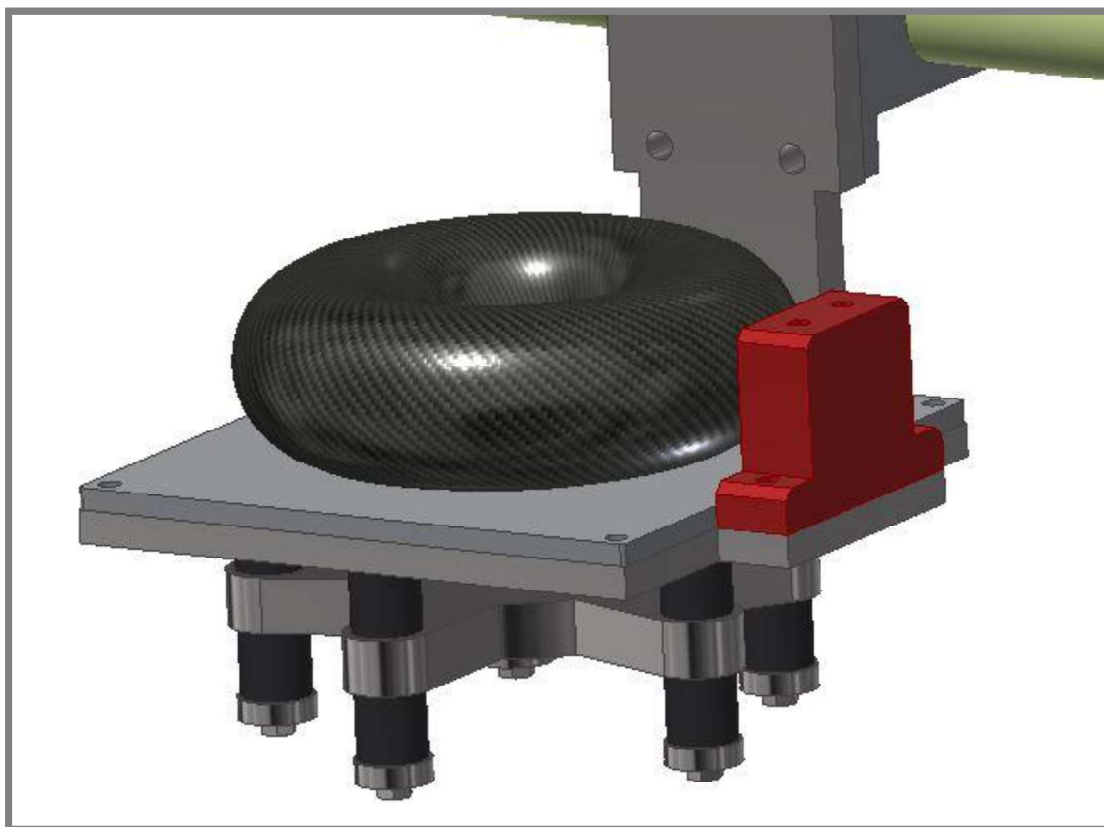
Třetí varianta je použití komerčně nabízeného vibračního motoru. Tento vibrační motor by se připevnil na desku společně s výrobkem. Deska by byla k rotační hřídeli uchycená přes pružiny nebo pryžové silentbloky, které by umožňovaly její vibrační pohyb a zároveň by tlumily vibrace přenášené na hřídel. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3, tak existuje několik typů vibračních motorů (hydraulické, elektrické, pneumatické), o kterých se uvažovalo při použití v konstrukci.

Hydraulické motory vibrací jsou velmi výkonné motory. Používají se nejčastěji, tam kde je potřeba velkých vibračních sil a zároveň tam hrozí riziko vznícení. Samotný vibrační motor není výbušný a neobsahuje skoro žádné elektrické komponenty, které by mohly jiskřit. Použití tohoto typu, se však ukázalo nevhodným, z důvodu příliš velkých vibračních sil a cenové náročnosti (je potřeba koupit samotný motor a k tomu ještě motor, který pohání kapalinu do toho motoru).

Elektrický vibrační motor je nejpoužívanější budič vibrací, proto se jevil pro svou cenu a dostupnost jako vhodný. Vyrábí se v široké škále vibračních sil. Díky pohonu elektrickým proudem by se však neměl používat tam, kde hrozí riziko výbuchu či vznícení. Někteří výrobci však vyrábí i motory pro výbušné prostředí. Jejich nevýhoda je ovšem v tom, že jeden motor je schopen vyvolat pouze jednu velikost vibrační síly, a to může být problém, protože by se musela zvolit jedna konkrétní váha výrobku, vyrobeného na zařízení SLM, pro který by ten motor byl dimenzován. To by znamenalo, že lehčí výrobky, by z důvodu velké síly vibrací mohly být poškozeny a pro těžší výrobky by síla vibrací nebyla dostačující a nedošlo by k očekávanému odstranění prášku. Nevýhodou je také větší velikost těchto vibračních motorů.

Pneumatický motor vibrací má, oproti ostatním vibračním motorům, v navrhované konstrukci komory, několik výhod, pro které byl nakonec zvolen jako nejvhodnější. Patří mezi ně to, že se vyrábí s možností nastavení intervalu vibračních sil. Pro různé výrobky SLM tak bude možno nastavit potřebnou sílu podle jejich hmotnosti, aby nedošlo k poškození výrobku nebo nedostatečnému odstranění prášku. Změnu vibrační síly lze docílit pouhou změnou tlaku plynu, kterým vibromotor

poháníme. Další výhodou je malá velikost pneumatických vibračních motorů, k síle vibrací, kterých dosahují. Například turbínový pneumatický vibrátor NCT o rozměrech 128 x 80 x 56 mm, má budicí sílu 4277 N, což je v porovnání se stejně silným elektrickým vibračním motorem MVE 4300/15, o rozměrech 588 x 295 x 318 mm (několikanásobně menší rozměr).



Obr. 4.10 Mechanismus s turbínovým pneumatickým vibračním motorem

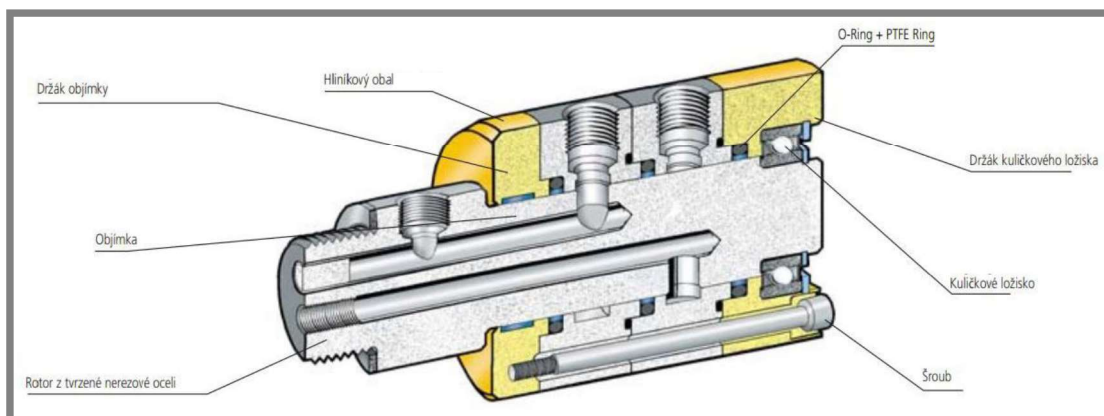
4.4 Přívod plynu k vibračnímu motoru

Do výsledné konstrukce byl zvolen pneumatický turbínový vibrační motor. Tento motor bude připevněn ke stejné platformě jako výrobek uvnitř komory. Díky tomu, že komora musí být utěsněná kvůli inertní atmosféře a výrobek bude rotovat okolo hřídele, bylo potřeba vyřešit, jak dopravit stlačený plyn z venku komory až k samotnému vibračnímu motoru. Byly zamýšleny dvě možná řešení. Jedno řešení byl vstup přívodu a odvodu poháněcího plynu skrze stěnu komory, druhé řešení skrz hřídel, na které je umístěna upevňovací platforma.

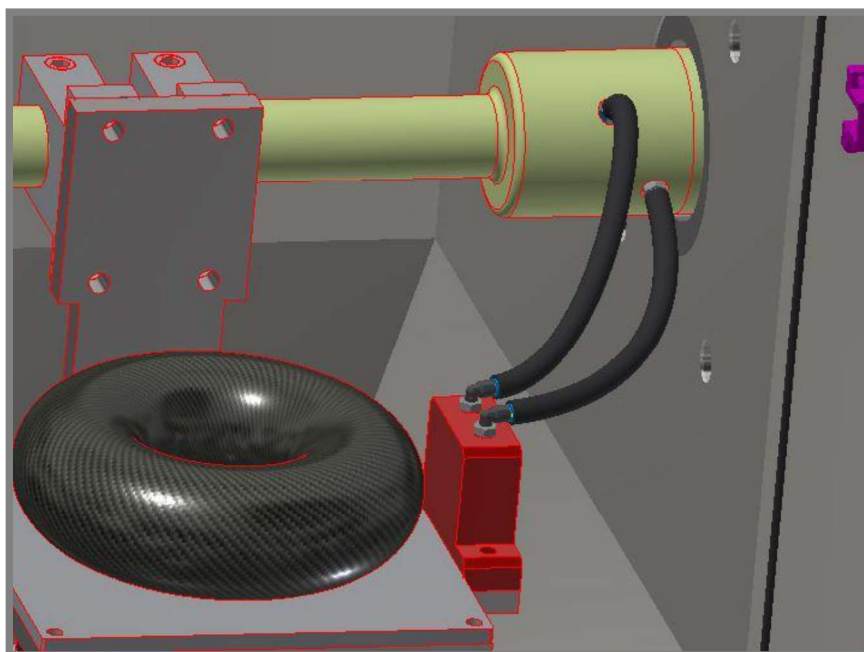
Řešení přívodu poháněcího plynu, pro pohon vibračního motoru, se jevílo nejlépe skrze stěnu komory. Při řešení přívodu stlačeného plynu skrze stěnu komory, by však mohlo docházet k postupnému navíjení přívodních hadic na hřídel a muselo by se řešit zpětné odvíjení, například zpětnou rotací hřídele. Zároveň by se hadice mohly navinout na výrobek a přetrhnout se.

Problém s navíjením hadic přívodu a odvodu plynu, se nakonec vyřešil druhou variantou, a to vedením poháněcího plynu skrze hřídel, za použití rotačních spojek. Plyn se povede k vibračnímu motoru skrz vyvrtanou hřídel, ve které budou umístěny

rotační spojky pro vedení poháněcího plynu. Tím nemůže dojít k navíjení, ani ukroucení přívodního vedení plynu, ani k tomu, že by o hadice zavadil výrobek. Z druhé strany se potom na spojky přichytí přívody k samotnému vibračnímu motoru a hřídel bude moci rotovat pořád v jednom směru.



Obr. 4.11 Rotační spojka ROTOFLUX [23]



Obr. 4.12 Příklad zapojení vibračního motoru z hřídele, ve které je umístěna rotační spojka

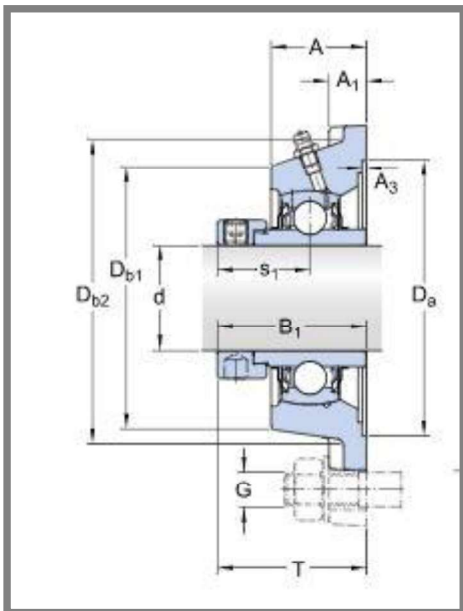
4.5 Uchycení hřídele

4.5

Jak již bylo zmíněno, tak výrobek bude rotovat pomocí hřídele a bylo potřeba vyřešit uchycení hřídele na nosnou konstrukci komory. Hřídel musí procházet skrz celou komoru, protože na jedné straně bude převodový motor, který bude s hřídelí rotovat a na druhé straně bude rotační spojka kterou bude veden plyn pohánějící vibrační motor. Dalším kritériem, které musí uchycení hřídele splňovat je dokonalé utěsnění, aby tudy

neunikal inertní plyn z komory. Po analýze byly zvoleny 2 způsoby, jak takové uchycení vyřešit.

První způsob byl použití komerčně dostupné uchycení. Takové uchycení hřídely většinou vyrábějí firmy zabývající se ložisky (např. SKF, Korbel). Jedná se o čtvercové přírubové jednotky. Tyto jednotky jsou složeny, že základní skříň, ložiska, maznici a případně těsnění.



Obr. 4.13 Schéma ložiskové jednotky [19]



Obr. 4.14 Ložisková jednotka [18]

Druhý způsob bylo navrhnout vlastní konstrukci. Jedná se o ocelovou součást, která by byla tvarovaná pro umístění ložiska nebo kluzného pouzdra a těsnění (gufero).

Oba způsoby obsahují ložiska, která jsou navrhovaná podle rozměrů. Z toho plyne, že na únosnost jsou značně předimenzovaná (např. Ložisková jednotka FYJ 100 TF od firmy SKF má dynamickou únosnost 124 kN [19]). Nakonec byly pro uchycení hřídele zvoleny ložiskové jednotky od firmy SKF (FYJ 100 TF a FY 50 WF), protože z hlediska montáže jsou lepší.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5

5.1 Komora

5.1

Základem zařízení je svařenec z plechu. Tloušťka plechu byla zvolena 2 mm, a to z důvodu toho, že sice většina plechových částí nepřenáší velké zatížení a má spíše krycí funkci, ale v určitých místech je potřeba dosáhnout dostatečné tuhosti a v místech kde budou přivařené nohy, by měla být pevnější, aby se při zatížení neporušila integrita komory. Potřeba vyšší tuhosti se týká i místa, kde budou dveře do komory, aby se daly dveře dobře přitlačit k pryžovému těsnění a zamezit tak úniku inertní atmosféry. Plechy budou z korozivzdorné austenitické oceli 17 248 (X6CrNiTi18-10). Ze stejného plechu jsou i dveře od komory, které jsou lemovány z důvodu zvýšení tuhosti.

Na dveřích bude přilepeno a silikonem utěsněné plexisklo jako průzor pro obsluhu, aby bylo vidět dovnitř komory pro případ poruchy a rychlé reakce obsluhy.

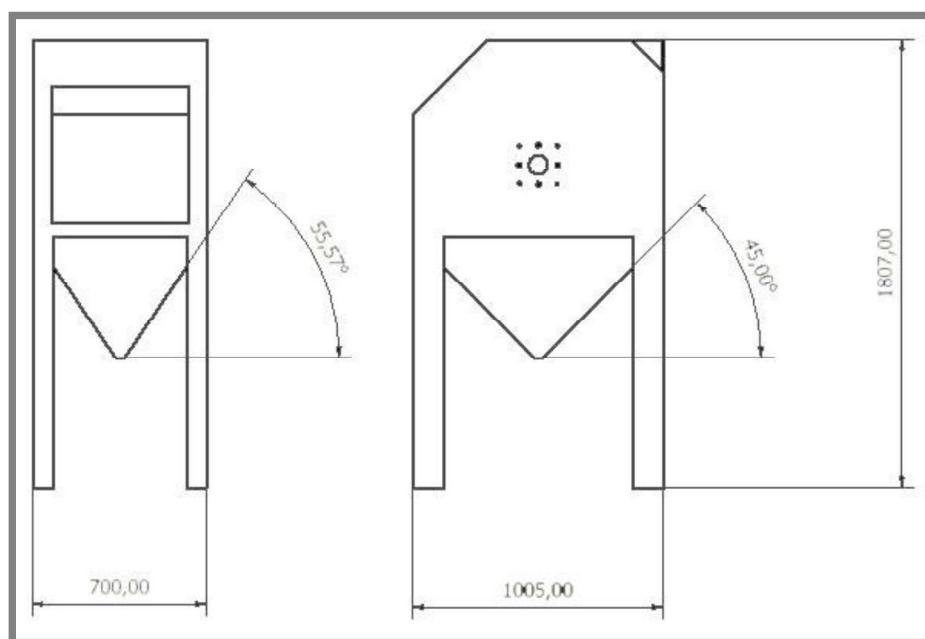
5.1.1 Tvar a rozměry komory

5.1.1

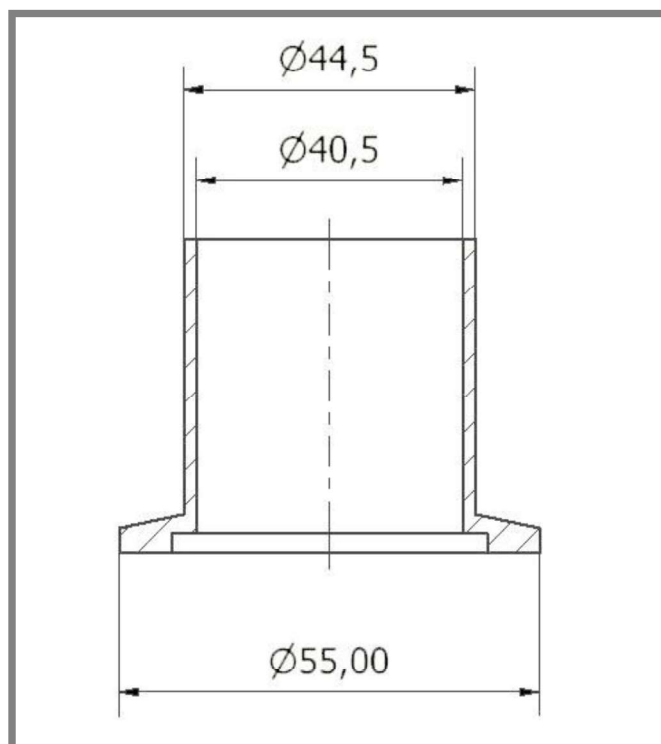
Základem komory je spodní násypný čtyřboký jehlan, nad tímto jehlanem bude tvarově upravený kvádr jako na obrázku. Hlavní rozměry jsou dimenzovány tak, aby v komoře mohl rotovat výrobek až do rozměrů 280 x 280 x 300 mm a zároveň bylo pro obsluhu snadné umísťování výrobku do zařízení.

Nad dveřmi bude umístěn ovládací panel, ze kterého se bude ovládat motor, který bude rotovat s hřídelí, vibrační motor, přívod inertní atmosféry a budou se zobrazovat všechny potřebné informace, jako například tlak stlačeného plynu nebo složení vzduchu v komoře.

Dole na špičce jehlanu bude přivařena koncovka ISO KF-40, na kterou se připevní skladovací kontejner na prášek. Všechny svary budou dělány tak, aby se zachovala těsnost celé komory.



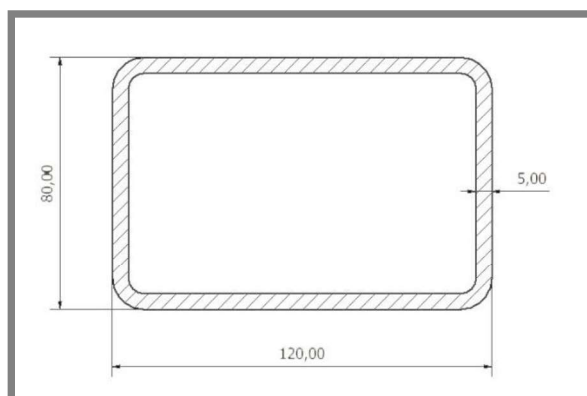
Obr. 5.1 Základní tvar a rozměry komory



Obr. 5.2 Koncovka ISO KF-40 potřebná k připojení skladovacího kontejneru

5.2**5.2 Nosná konstrukce**

Pod komoru na násypný jehlan budou navařeny čtyři nohy. Budou to ocelové profily obdélníkových průřezů o velikosti 120 x 80 mm o výšce 1012,5 mm a síle 5 mm. Tyto rozměry jsou dimenzovány z důvodu, že nohy jsou nosným prvkem celého zařízení.



Obr. 5.3 Profil nosné nohy

Dále bude komora z vnější části vyztužena, ocelovými profily T napojenými na nosné nohy.

5.3 Vnitřní mechanismus

5.3

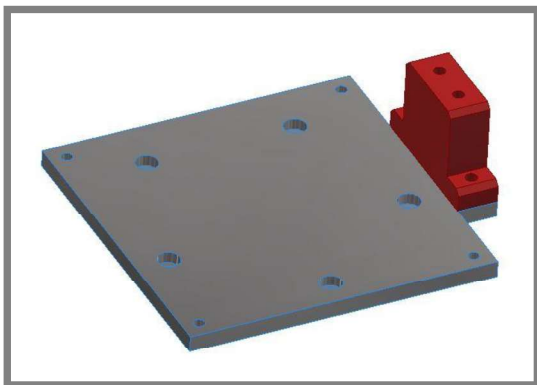
Samotný vibrační mechanismus se skládá z několika prvků:

- Upevňovací platforma
- Uchycení upevňovací platformy na rotační hřídel
- Rotační hřídel

5.3.1 Upevňovací platforma

5.3.1

Je to čtvercová deska tloušťky 20 mm, na kterou se umístí platforma s výrobkem a uchytí čtyřmi šrouby s maticemi. Na tu samou desku se šrouby připevní pneumatický turbínový vibrační motor Netter Vibration NCT 3 s odstředivou silou 1275 N a frekvencí 38400 min^{-1} (stanoveno při tlaku 6 barů) [21].



Obr. 5.4 Upevňovací platforma



Obr. 5.5 Vybraný turbínový vibrační motor [20]

5.3.2 Uchycení upevňovací platformy na rotační hřídel

5.3.2

Upevňovací platforma je 4 kolíky uchycena na součást, která je následně přes uchycení GW-3, ISO serie 3 od firmy MÄDLER uchycena na rotační hřídel [22]. Aby se snížil přenos vibrací od upevňovací desky na hřídel, tak jsou tyto kolíky vedeny skrz pryžové silentbloky typu GP o vnějším průměru 30 mm a vnitřním průměru 14 mm. Silentbloky jsou určeny pro tlakové zatížení (při jiném zatížení, například tahovém, vydrží podstatně méně). Proto se na kolíky umístí dva silentbloky, každý z jedné strany součásti. Tím bude vždycky jeden z nich zatížený na tlak a druhý bude nezatížený.

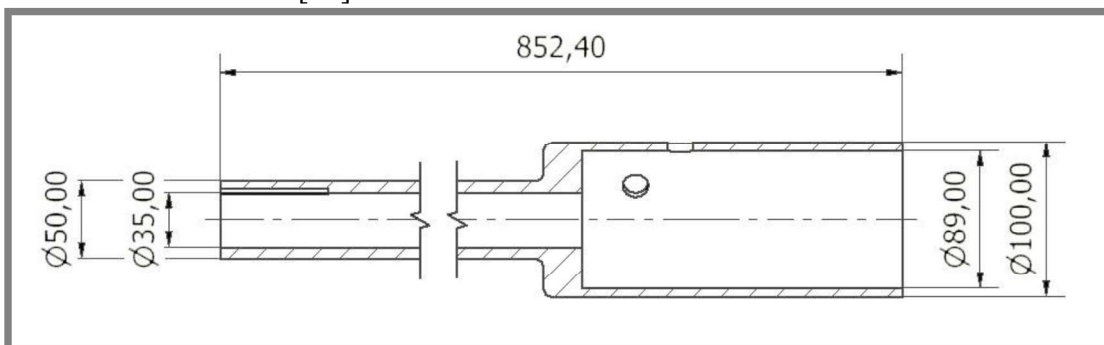


Obr. 5.6 Uchycení hřídele GW-3, ISO serie 3 [22]

5.3.3

5.3.3 Rotační hřídel

Rotační hřídel bude ze dvou průměrů. První bude průměr 50 mm, na tomto průměru bude uchycen systém upevnění s výrobkem pomocí GW-3, ISO serie 3. Na straně, kde bude tento průměr, bude k hřídeli připevněn výstup z převodového motoru, který bude s hřídelí otáčet rychlostí 5 min^{-1} . Druhá část hřídele bude dutá o vnějším průměru 100 mm a vnitřním průměru 89 mm. Do této duté hřídele se vloží dvoucestná rotační spojka M210-003-01R od firmy ROTOFLUX pro přívod stlačeného plynu k vibračnímu motoru [23].



Obr. 5.7 Navržená dutá hřídel

5.4

5.4 Inertní atmosféra

Komoru bude možné napustit inertním plynem (dusíkem nebo argonem), aby se zvýšila bezpečnost s reaktivními prášky a recyklovaný prášek nebyl ničím kontaminován. Napouštění a vypouštění bude řešeno přes ventily umístěné zezadu na horní straně komory a v dolní části násypného jehlanu. Dusík je lehčí než vzduch a argon je těžší než vzduch, takže buď by se používal jen jeden plyn nebo by se muselo v ovládacím panelu naprogramovat přepínání toho kudy by se plyn napouštěl a kyslík vypouštěl podle toho, jaký plyn by se pro daný výrobek zvolil. Z obou ventilů půjdou hadice rovnou do filtru pevných částic Festo LFMB – D – MINI (stejný jako se používá

u zařízení SLM 280 HL), aby se náhodou nenasával vysypaný prášek tam, kam nemá [24].



Obr. 5.8 Filtr pevných částic od firmy Festo [24]

5.5 Utěsnění komory

5.5

Díky možnosti napustit komoru inertní atmosférou je potřeba komoru vzduchově utěsnit v místech kde by mohl plyn unikat pryč z komory. Jedná se hlavně o dvě místa. Dveře a díry v plechu na stranách pro hřídel. Těsnění dveří bude řešeno měkkým pryžovým těsněním průřezu „D“. Samotné dveře budou tuhé a při zavření se stlačí pryžové těsnění a zamezí se tak unik plynu. Dveře budou zajištěné klikou, která se používá u průmyslových mrazících boxů.



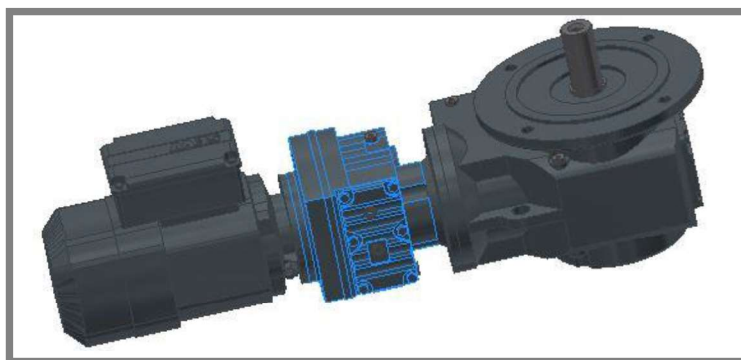
Obr. 5.9 Kliky od průmyslových mrazících boxů [25]

U průchodu hřídele komorou bude hřídel bude v přírubových ložiskových jednotkách, které jsou těsněné a systém bude těsněný „O“ kroužkem, přitlačeným šroubovým spojem k nosnému vyztužení komory.

5.6

5.6 Převodový motor

Jako motor k pohonu hřídele byl zvolen převodový motor od firmy SEW-Eurodrive. Skládá se ze elektromotoru, čelní převodovky a kuželové převodovky. Motor má výkon 0,37 kW a jmenovité otáčky 1380 min^{-1} . Převodový poměr je 280 a výstupní krouticí moment 635 Nm [26].



Obr. 5.10 Převodový motor od SEW-Eurodrive

5.7

5.7 Pevnostní výpočet a analýza

Všechny rozměry jednotlivých částí výsledného zařízení byly v pevnostním výpočtu jako řídící člen. Stejně tak i materiály některých částí jsou určeny výrobcem. Díky tomu bylo potřeba některé kritické části ověřit pevnostním výpočtem nebo analýzou na počítači. Jednalo se hlavně o rotující hřídel, kolíky v silentblocích a vyztužení komory.

5.7.1

5.7.1 Hřídel

Prvním z prvků zařízení, u kterého byla potřeba zkontrolovat pevnost, byla rotující hřídel. Hřídel je navržena z oceli 1.0060. Zatížení této hřídele se skládá z tíhové síly výrobku (100 kg) a tíhové síly upevňovací platformy s vibračním mechanismem (odhadnuto na 22 kg programem *Autodesk Inventor 2017*). Jako působiště výsledné síly bylo umístěno doprostřed upevňovací platformy. Při udělení předběžné pevnostní analýzy v programu *Autodesk Inventor 2017*, bylo zjištěno, že nejvíce kritické místo je v přechodu hřídele z průměru $d = 50 \text{ mm}$ na průměr $D = 100 \text{ mm}$, kde je navrženy radius 5 mm. V tomto místě je hřídel namáhána na ohyb a krut.

$$M_o = Fl_1 = (m_1 + m_2)gl_1 = 280,6 \text{ Nm} \quad (5.1)$$

$$M_k = Fl_2 = 323,3 \text{ Nm} \quad (5.2)$$

Kde:

F [N]	zatížení od výrobku a upevňovací platformy
l_1 [m]	vzdálenost působiště síly od kritického místa
l_2 [m]	vzdálenost působiště síly od osy rotace hřídele

Napětí od těchto momentů je v kritickém místě:

$$\sigma_{M_o} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{J_y}{\frac{d}{2}}} = 15,1 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Kde:

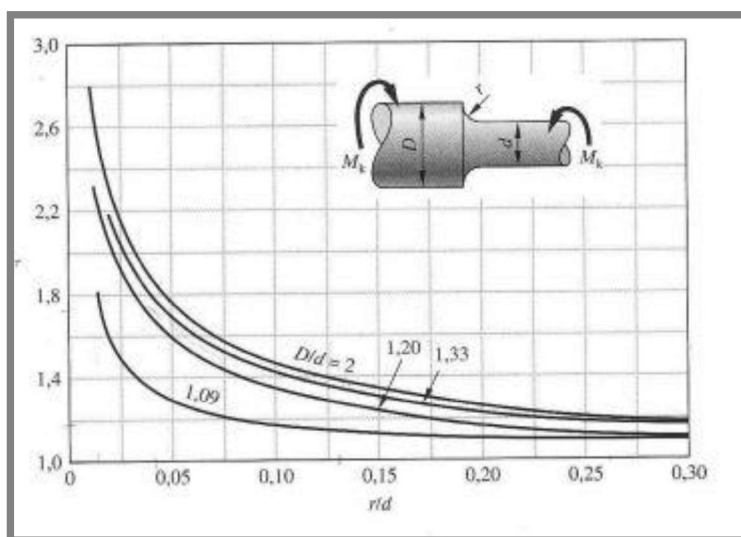
M_o [Nmm]	ohybový moment
W_o [mm ³]	modul průřezu v ohybu
J_y [mm ⁴]	kvadratický moment
d [mm]	menší průměr hřídele

$$\tau_{M_k} = \frac{M_k}{W_k} = 17,33 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

Kde:

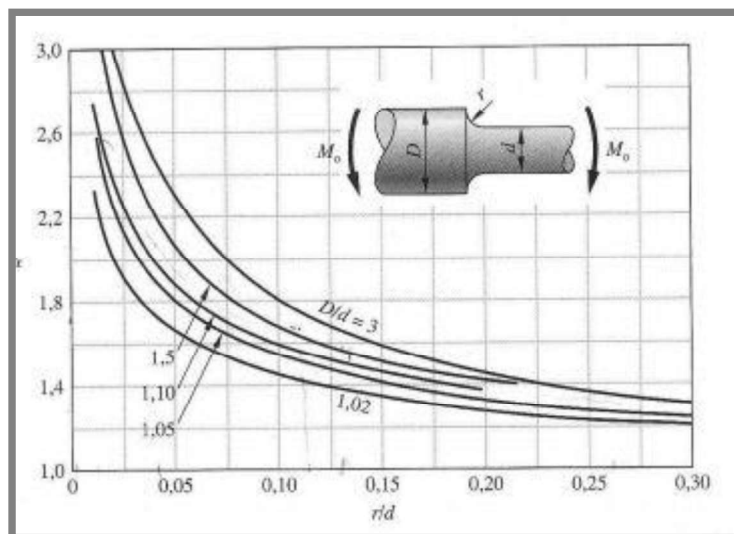
M_k [Nmm]	krouticí moment
W_k [mm ³]	modul průřezu v krutu

Součinitele koncentrace napětí α v radiusu vyčteme z grafu obr. 5.11 a obr. 5.12.



Obr. 5.11 Graf součinitele koncentrace napětí α pro krut [27]

$$\alpha_k = 1,5$$

Obr. 5.12 Graf součinitele koncentrace napětí α pro ohyb [27]

$$\alpha_o = 1,7$$

Přepočítané napětí:

$$\sigma'_{M_o} = \alpha_o \sigma_{M_o} = 25,67 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

$$\tau'_{M_k} = \alpha_k \tau_{M_k} = 25,99 \text{ MPa} \quad (5.6)$$

Hřídel bude za chodu rotovat, takže je potřeba kontrolovat bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavové pevnosti. Zatížení se dá zjednodušit na cyklické se sinusovým průběhem.

$$\sigma_a = \sigma'_{M_o} = 25,67 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = \tau'_{M_k} = 25,99 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

$$\tau_m = 0 \text{ MPa}$$

Dovolená hodnota napětí v ohybu pro střídavý průběh je 85 MPa a dovolená hodnota napětí v krutu je pro střídavý průběh 50 MPa. Dle [28] jsou jednotlivé bezpečnosti:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{Do}}{\sigma_a + \sigma_m} = 3,31 \quad (5.9)$$

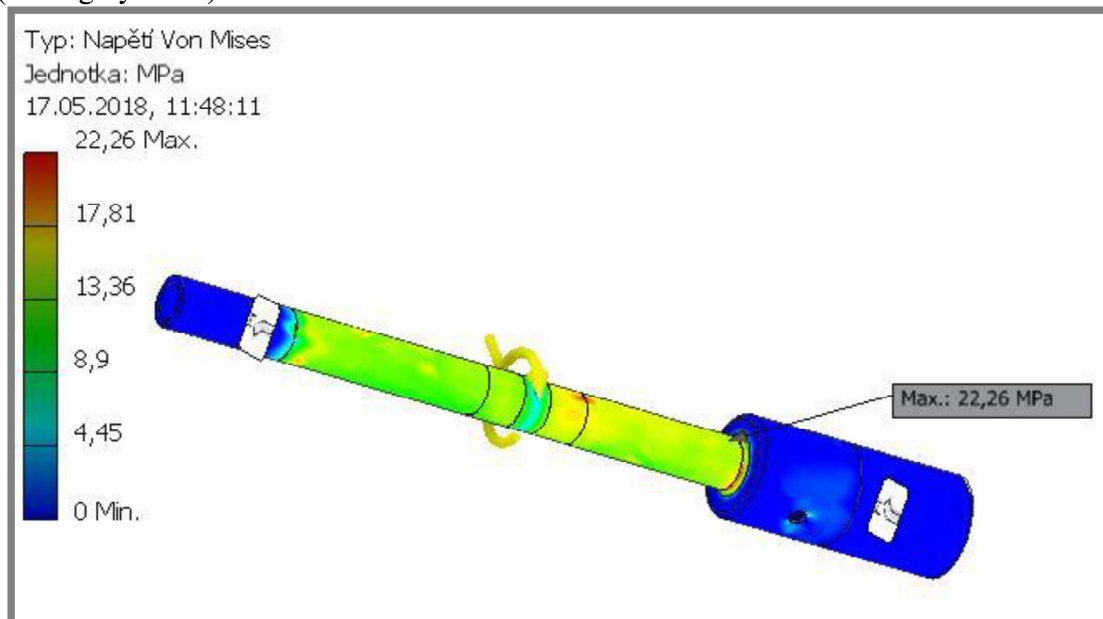
$$k_\tau = \frac{\tau_{Do}}{\tau_a + \tau_m} = 1,92 \quad (5.10)$$

Dle [28] je celková bezpečnost:

$$k = \frac{k_{\sigma} k_{\tau}}{\sqrt{k_{\sigma}^2 + k_{\tau}^2}} = 1,66 \quad (5.11)$$

Napětí a průhyb byly zkontrolovány programem *Autodesk Inventor 2017*:

Dle výpočtů a analýzy hřídel vydrží maximální zatížení stanovené v kapitole 3.2 (100 kg výrobek).

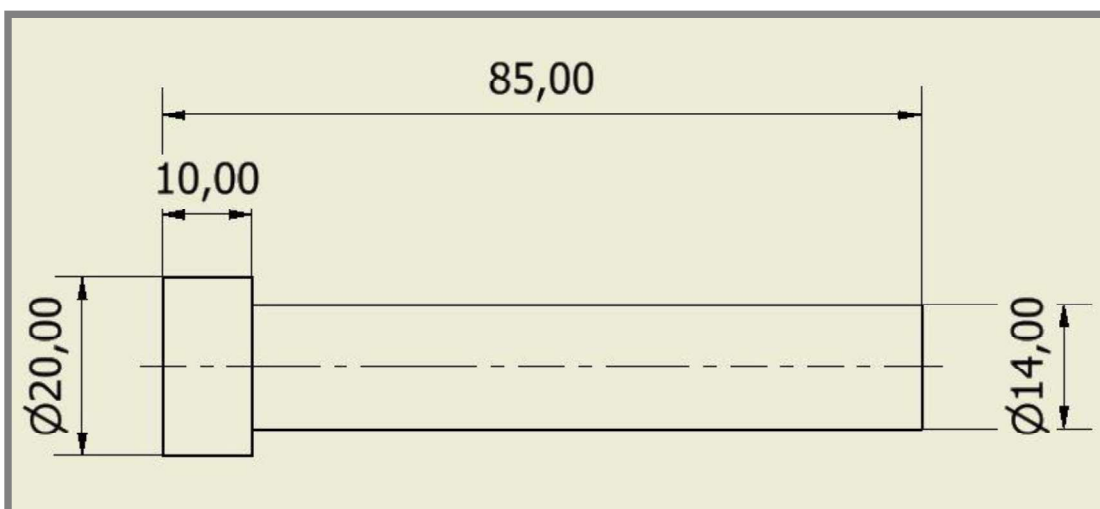


Obr. 5.13 Napětí při kombinovaném namáhání (ohyb + krut)

5.7.2 Kolík

5.7.2

Další kritickou částí zařízení jsou 4 kolíky procházející silentbloky ve vibračním mechanismu. Kolík je z oceli 1.0060 a uchycen uprostřed v lineárním kuličkovém



Obr. 5.14 Kolík procházející silentbloky

ložisku. Jeho maximální napětí je od ohybu na konci, kde prochází upevňovací platformou.

$$M_o = \frac{F}{4}l = 187,5 \text{ Nm} \quad (5.12)$$

$$\sigma_{M_o} = \frac{M_o}{W_o} = 12,73 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

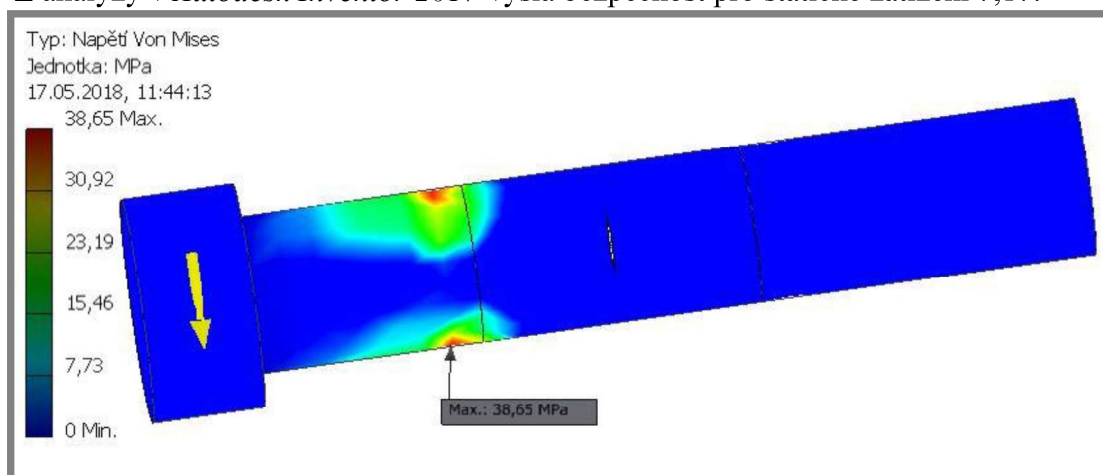
Pro střídavé zatížení je bezpečnost:

$$\sigma_a = \sigma_{M_o} = 12,73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa}$$

$$k = \frac{\sigma_{Do}}{\sigma_a + \sigma_m} = 6,68 \quad (5.14)$$

Z analýzy v *Autodesk Inventor 2017* vyšla bezpečnost pro statické zatížení 7,17.



Obr. 5.15 Analýza kolíku

5.7.3

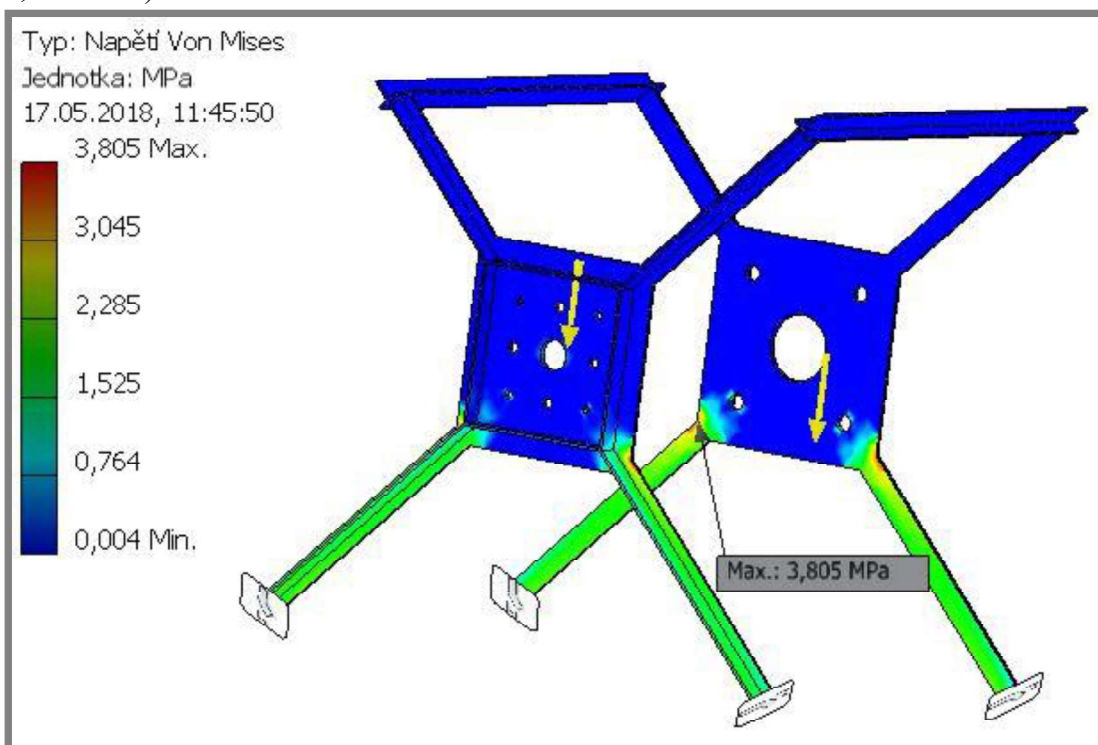
5.7.3 Vyztužení komory

Na další prvky byla použita jako hlavní kontrola analýza v *Autodesk Inventor 2017*. Následně sice byl proveden analytický výpočet, ale bylo potřeba zjednodušit dané součásti, a tak výsledky lze brát pouze jako orientační.

Vyztužení komory

Vyztužení je nosným prvkem hřídel a motoru. Váha, kterou má při maximálním zatížení nést, byla odhadnuta na 180 kg (výrobek – 100 kg, převodový motor – 50 kg, mechanismus s hřídelí – 30 kg). Na levé straně je motor a na pravé ložisková jednotka s váhou 23 kg. Jak je možné vidět na obrázku obr. 5.16, tak

konstrukce je dostatečně tuhá, aby unesla potřebné zatížení (maximální napětí vyšlo 3,805 MPa).



Obr. 5.16 Analýza vyztužení komory

Navrhovaná konstrukce splňuje všechny dílčí cíle stanovené v kapitole 3. Komora je navržena pro plně automatický režim. Manuální režim (plynová pistole) byl zavrhnut po konzultaci s odborníky na toto téma. Hlavní důvod bylo to, že pistole se v takovém provozu příliš zanášá práškem a je nutno ji často čistit nebo měnit a vibrace by měly být dostačující pro odstranění většiny prášku z výrobků. Pevnostní analýza provedená na několika částech zařízení, byla udělána pro statické zatížení. V případech kdy je jasné, že se jedná o cyklické namáhání, byla udělána analýza v kritickém místě. Díky zjednodušení pevnostních výpočtů a analýzy (dutá hřídel byla počítána bez rotační spojky atd.), což může vést k odchylce výsledku vzhledem k výslednému zařízení. Ve výpočtech se nepočítá s vibracemi, které se mohou přenášet na různé části zařízení i přes tlumící silentbloky. Z těchto důvodů je doporučena udělat analýzu dynamického zatížení, která nebyla udělána díky nedostatku prostředků.

Celé zařízení je dostatečně těžké a vyvážené, takže by nemělo hrozit převrnutí.

Čtyrboký jehlan byl spočítán tak, aby byl pod dostatečným úhlem na samovolné sunutí se prášku po jeho stěnách, ale je možné že stále na stěnách bude ulpívat nějaký prášek. Tomu je možné pomoci tím, že se na jehlan přidá nějaký malý vibrační motor, který by ten prášek stírál do skladovacího kontejneru.

Motor od firmy SEW-Eurodrive byl navržen pomocí jejich konfigurátoru.

7 ZÁVĚR

7

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce komory pro odstranění prášku po SLM technologii. Práce se zaměřila na zařízení, pro výrobky o rozměrech 280 x 280 x 300 mm a 100 x 100 x 100 mm ze stroje SLM 280 HL, které se používá na Ústavu Konstruování. Metoda odstranění prášku je v tomto zařízení zvolena vibrační. Všechny cíle jsou zformulovány v kapitole 3.2. V průběhu řešení bylo navrženo několik koncepčních variant, různých částí zařízení, ze kterých byl vždy zvolen ten, který byl funkčně, konstrukčně a ekonomicky nejvýhodnější. Určité části, jsou voleny s vyšší kvalitou na úkor ceny (například vedení inertní atmosféry nebo stlačeného plynu). Výsledný návrh zařízení je komora, která splňuje stanovené cíle. Základní rozměry komory jsou 1200 x 1005 (s otevřenými dveřmi 1605) x 1807 mm. Komora díky své váze, vibrační povaze a velikosti, je určena k sestavení a umístění na vhodné potřebné místo v SLM laboratoři.

Jednou z věcí, která byla nad rámec této práce a je potřeba ji vyřešit, je naprogramování ovládacího panelu, který bude ovládat všechny potřebné funkce zařízení.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAZDERA, Pavel. *Mechanický excitátor pro modální analýzu: Mechanical exciter for modal analysis*[online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2007 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=305. Diplomová Práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. IVAN MAZŮREK, CSc.
- [2] WEBAC VIBRO S.R.O [online]. Příbram: Webacvibro, 2010 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.webac-vibro.com>
- [3] VIBCO Vibrators [online]. USA: VIBCO, 2011 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.vibco.com>
- [4] PEDDY GROUP S.R.O. [online]. LITVÍNŮV: Peddy, 2009 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.peddy.cz/>
- [5] Croft Additive Manufacturing [online]. UK: CROFT, 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.croftam.co.uk>
- [6] 3D Systems [online]. 3D Systems: Canada, 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-660pro>
- [7] 3D Platforms [online]. 3D Platforms, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://3dplatform.com/3d-printers/#200series>
- [8] Solukon [online]. Germany: Solukon, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.solukon.de>
- [9] Pneumatic Vibrator [online]. UK: Pneutrol International, 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.pneutrolspares.com/product-item/p/oli-s30-7800-vibmin-2-bar-151kg-force-2-bar-s-pneumatic-ball-vibrator-9276/>
- [10] Turbine Pneumatic Vibromotors [online]. Germany: Netter Vibration, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.nettervibration.com/product-line/pneumatic-turbine-vibrators-series-nct/?lang=en>
- [11] ME Systems s.r.o. [online]. Chrudim: ME Systems, 2017 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://mesystems.cz>
- [12] HAS [online]. Ostrava: HAS.CZ, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.prumyslove-vibratory.cz>
- [13] Allbiz [online]. Polsko: AllBiz, 2010 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://pl.all.biz/cs/elektricke-vibratory-g35062>
- [14] LAB TONE [online]. China: LabTone, 2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://turkish.vibrationtestmachine.com/supplier-161120-vibration-testing-machine>

- [15] *PI Motion* [online]. Germany: PI, 2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/piezoceramic-actuators/linear-actuators/p-842-preloaded-piezo-actuators-101200/>
- [16] *APC INTERNATIONAL* [online]. Ltd. Americanpiezo, 2014 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/>
- [17] *SLM Laboratoř* [online]. Brno: FSI VUT v Brně, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/3d-laboratory/>
- [18] *PALIER SF60* [online]. Francie: BRAMMER, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://fr.brammer.biz/product/101299/name/PALIER-SF60>
- [19] *SKF* [online]. Česká republika: SKF CZ, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/index.html>
- [20] *Netter Vibration* [online]. Deutschland: Netter Vibration, 2017 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.nettervibration.com>
- [21] *NCT, Conrad* [online]. UK: Conrad, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.conrad.com/ce/en/product/582108/Netter-Vibration-NCT-29-Turbine-vibrator-Nominal-frequency-at-6-bar-18000-rpm-14>
- [22] *MÄDLER GmbH* [online]. Germany: MÄDLER, 2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.maedler.de/product/1643/1630/wellenboecke>
- [23] *Rotací spojka* [online]. Germany: ROTOFLUX, 2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/files/produkt/rotoflux/rotacni-spojky-vysoky-tlak-mala-rychlost.pdf>
- [24] *FESTO* [online]. Česká republika: Festo, 2010 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/index.htm
- [25] *Freezer Cooler Door Latch* [online]. EBAY: EBAY, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/Freezer-Cooler-Door-Zinc-Alloy-Releasing-Pull-Handle-Latch-Lock-Silver-Tone-/352039833714>
- [26] *SEW-Eurodrive* [online]. Bruchsal, Německo: SEW-Eurodrive, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sew-eurodrive.cz/domu.html>
- [27] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [28] ONDRÁČEK, Emanuel, Přemysl JANÍČEK a Jan VRBKA. *Mechanika těles – pružnost a pevnost II*. 4. přepracované vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-214-2214-9.

9 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

3D		trojrozměrný
SLM		Selective Laser Melting
VUT		Vysoké učení technické
FSI		Fakulta strojního inženýrství
ÚK		Ústav Konstruování
k		Celková bezpečnost
σ_m	[MPa]	střední normálové napětí
σ_a	[MPa]	amplituda normálového napětí
σ_{Mo}	[MPa]	ohybové napětí
M_o	[Nm]	ohybový moment
k_τ		bezpečnost od normálového napětí
k_σ		bezpečnost od smykového napětí
τ_m	[MPa]	střední smykové napětí
τ_a	[MPa]	amplituda smykového napětí
τ_{Mk}	[MPa]	smykové napětí vyvolané kroutícím momentem
M_k	[Nm]	kroutící moment
α_o		ohybový součinitel koncentrace napětí
α_k		kroutící součinitel koncentrace napětí
W_k	[mm ³]	modul průřezu v krutu
W_o	[mm ³]	modul průřezu v ohybu
J_y	[mm ⁴]	kvadratický moment k ose y
F	[N]	síla
l_1	[m]	vzdálenost působíště síly od kritického místa
l_2	[m]	vzdálenost působíště síly od osy rotace hřídele
m_1	[kg]	hmotnost výrobku
m_2	[kg]	hmotnost mechanismu
g	[ms ⁻²]	tíhové zrychlení
dB		decibel
Ø		průměr
min ⁻¹		otáčky za minutu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**10**

Obr. 2.1 Výrobek na platformě s podpůrnými strukturami [5]	16
Obr. 2.3 3D tiskárna s krytovaným pracovním stolem [6]	17
Obr. 2.2 Pracovní stůl od firmy 3D Platforms [7]	17
Obr. 2.4 Zařízení SFM-AT300 [8]	18
Obr. 2.5 Kuličkový vibrační motor [9]	19
Obr. 2.6 Turbínové vibrační motory [10]	20
Obr. 2.7 Válečkové vibrační motory [11]	20
Obr. 2.8 Pístový vibrační motor [11]	21
Obr. 2.9 Hydraulický vibrační motor [12]	21
Obr. 2.10 Mechanický vibrátor [13]	22
Obr. 2.11 Elektrodynamický budič vibrací [14]	23
Obr. 2.12 Piezoelektrické pohony [15]	23
Obr. 4.1 Nepohyblivé uchycení dílu v komoře	26
Obr. 4.2 Pohyblivé uchycení dílu v komoře s osou rotace pod dílem	27
Obr. 4.3 Pohyblivé uchycení dílu v komoře s osou rotace za dílem	27
Obr. 4.4 Základní tvar komory	28
Obr. 4.5 Geometrie rotace	28
Obr. 4.6 Upravený tvar komory	28
Obr. 4.7 Varianty nosné konstrukce	29
Obr. 4.8 Vačkový mechanismus	30
Obr. 4.9 Přímočarý vibrační mechanismus s použitím gravírovací pistole Dremel	31
Obr. 4.10 Mechanismus s turbínovým pneumatickým vibračním motorem	32
Obr. 4.11 Rotační spojka ROTOFLUX [23]	33
Obr. 4.12 Příklad zapojení vibračního motoru z hřídele, ve které je umístěna rotační spojka	33
Obr. 4.14 Ložisková jednotka [18]	34
Obr. 4.13 Schéma ložiskové jednotky [19]	34
Obr. 5.1 Základní tvar a rozměry komory	35
Obr. 5.2 Koncovka ISO KF-40 potřebná k připojení skladovacího kontejneru	36
Obr. 5.3 Profil nosné nohy	36
Obr. 5.4 Upevňovací platforma	37
Obr. 5.5 Vybraný turbínový vibrační motor [20]	37
Obr. 5.6 Uchycení hřídele GW-3, ISO serie 3 [22]	38
Obr. 5.7 Navržená dutá hřídel	38
Obr. 5.8 Filtr pevných částic od firmy Festo [24]	39
Obr. 5.9 Klika od průmyslových mrazících boxů [25]	39
Obr. 5.10 Převodový motor od SEW-Eurodrive	40
Obr. 5.11 Graf součinitele koncentrace napětí α pro krut [27]	41
Obr. 5.12 Graf součinitele koncentrace napětí α pro ohyb [27]	42
Obr. 5.13 Napětí při kombinovaném namáhání (ohyb + krut)	43
Obr. 5.14 Kolík procházející silentbloky	43
Obr. 5.15 Analýza kolíku	44
Obr. 5.16 Analýza vyztužení komory	45

Příloha 1

Výkresová dokumentace