



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 ODDĚLOVACÍHO VENTILU
TRYSKY PRO RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ
MIKROSKOP**

NOZZLE SEPARATION VALVE DESIGN FOR RASTERIZATION ELECTRON MICROSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Hoffman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dana Foltýnová

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Petr Hoffman**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Dana Foltýnová**
Akademický rok: 2021/22

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 oddělovacího ventilu trysky pro rastrovací elektronový mikroskop

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rastrovací elektronové mikroskopy (SEM) tvoří významnou skupinu analytických přístrojů nacházejících uplatnění ve stále nových oborech. Jednou z důležitých součástí těchto zařízení je oddělovací vakuový ventil trysky (GVL), jehož funkcí je udržovat vakuum v oblasti elektronové trysky během zakládání vzorku do zavzdušněné komory. V moderních mikroskopech požadavky na tento ventil neustále rostou, neboť ventil musí nejen umožnit průchod svazků elektronů mezi komorami trysky a vzorku, ale zároveň nesmí tento svazek nijak ovlivňovat.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je vyvinout GVL ventil pro konkrétní typ elektronového tubusu, který bude splňovat parametry z hlediska mechanické čistoty, elektrického pole, magnetického pole a poměrně malého zástavbového prostoru.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- porovnat nejrůznější způsoby a principy uzavírání vakua,
- porovnat různé druhy pohonu ventilu dle vhodnosti pro elektronový mikroskop s ohledem na čistotu provozu, rušení citlivé elektroniky, hluk atd.,
- navrhnout konkrétní řešení pro daný zástavbový prostor. Volit materiály ventilu s ohledem na použití ve vakuu a v prostředí elektromagnetického pole,
- vyrobit maketu nebo funkční demonstrátor ventilu např. formou 3D tisku.

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

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je návrh a následná konstrukce vakuového oddělovacího ventilu pro rastrovací elektronový mikroskop. V úvodu práce jsou popsány funkce oddělovacího ventilu. Funkce rastrovacího elektronového mikroskopu je popsána v přehledu současného stavu poznání. Následují tři koncepční návrhy ventilu, jejich popis, výhody a nevýhody. Na základě porovnání bylo vybráno nejvhodnější řešení. V práci je dále proveden silový rozbor zvolené varianty. V závěru práce je navržena celá konstrukce a zpracovaná výkresová dokumentace ventilu.

KLÍČOVÁ SLOVA

oddělovací ventil, rastrovací elektronový mikroskop, těsnění, vakuum

ABSTRACT

The aim of the thesis is a design and subsequent construction of a vacuum separation valve for a scanning electron microscope. The introduction describes the functions of an isolating valve. The function of the scanning electron microscope is described in the overview of the current state of knowledge. The following chapters focus on conceptual designs of the valve, their descriptions, advantages and disadvantages. Based on the comparison, the most suitable solution was selected. A force analysis of the selected variant is also performed and described. The end of the thesis contains the whole structure design and processed drawing documentation.

KEYWORDS

isolating valve, scanning electron microscope, seal, vacuum

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOFFMAN, Petr. *Konstrukce oddělovacího ventilu trysky pro rastrový elektronový mikroskop*. Brno, 2018, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Dana Foltýnová.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval především mé vedoucí práce Ing. Daně Foltýnové, za její vedení, ochotu, trpělivost, konstruktivní kritiku a cenné rady, které mi při práci dala. Následně děkuji Ing. Jiřímu Maršíkovi, Ph.D. a také své rodině a blízkým za motivaci a podporu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Dany Foltýnové a Ing. Jiřího Maršíka, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Elektronové mikroskopy	14
2.1.1	Rastrovací elektronový mikroskop	14
2.2	Ventily	16
2.2.1	Základní používané ventily	16
2.3	Aktuátory ventilů	19
2.3.1	Pneumatické aktuátory	19
2.3.2	Hydraulické aktuátory	20
2.3.3	Elektromechanické aktuátory	20
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	21
3.1	Analýza problému	21
3.2	Cíl práce	21
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	22
4.1.1	Koncepční návrh 1	22
4.1.2	Koncepční návrh 2	23
4.1.3	Koncepční návrh 3	23
4.1.4	Porovnání a volba výsledné varianty	24
5	KONSTRUKCE ŘEŠENÍ	25
5.1	Základní parametry konstrukčního návrhu	25
5.2	Popis vybrané varianty	25
5.2.1	Pružinka	27
5.2.2	Silový rozbor	28
5.2.3	Hřídel 1	30
5.2.4	Hřídel 2	30
5.2.5	Ložiska	30
5.2.6	Výpočet bezpečnosti čepu	31
5.3	Volba aktuátoru	32
6	DISKUZE	33
7	ZÁVĚR	34

8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	37
9.1	Použité zkratky	37
9.2	Použité symboly	37
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	39

1 ÚVOD

Elektronové mikroskopy jsou stále rozšířenější na trhu, jelikož nám jsou schopny poskytnout komplexní informaci o mikrostruktuře, chemickém složení a dalších vlastnostech vzorku. Výhodou rastrovacího elektronového mikroskopu je získání detailních obrázků, pro širokého spektrum materiálů, jelikož mají velké zvětšení a rozlišení. Samotný elektronový mikroskop je velmi drahý, složitý a vyžaduje speciální řešení některých součástí za účelem lepší funkce a zlevnění součástí. Jedna taková součást je oddělovací ventil mezi horní a spodní komorou. Tento ventil je velmi důležitý z hlediska funkčnosti a bezpečnosti celého mikroskopu. V horní části totiž musí být po celou dobu vakuum, jinak by se mohli součásti, které se zde nacházejí poškodit, například katoda. Jelikož je požadavek na vlastnosti ventilu velmi specifický, nedá se běžně koupit. Pokud si ho objednáme na zakázku, bude drahý a možná v některých případech i nadbytečně velký. A to znamená další zdražování mikroskopu. Řešení přitom může být relativně jednoduché, praktické a efektivní. Tomuto problému, oddělovacího ventilu, pro rastrovací mikroskop od firmy Tescan se budu v této bakalářské práci věnovat.

První část práce je vysvětlit princip fungování elektronových mikroskopů, především pak rastrovacího. Následně shrnout možnosti oddělovacích vakuových ventilů, které se vyskytují na trhu, jejich výhody, nevýhody a případnou vhodnost pro rastrovací elektronový mikroskop. Dále zanalyzuji problém pro rastrovací mikroskop firmy Tescan, pro který oddělovací ventil navrhuji. Následně vytyčím cíle této bakalářské práce. Poté navrhuji možná koncepční řešení a vyberu nejvhodnější. Posléze vybraný návrh zkonstruuji, popíšu jeho součásti a ventil samotný.

Další motivací pro tuto práci je fakt, že v Brně sídlí 3 největší výrobci elektronových mikroskopů a až třetina světové výroby a distribuce do celého světa vychází právě odtud.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Elektronové mikroskopy

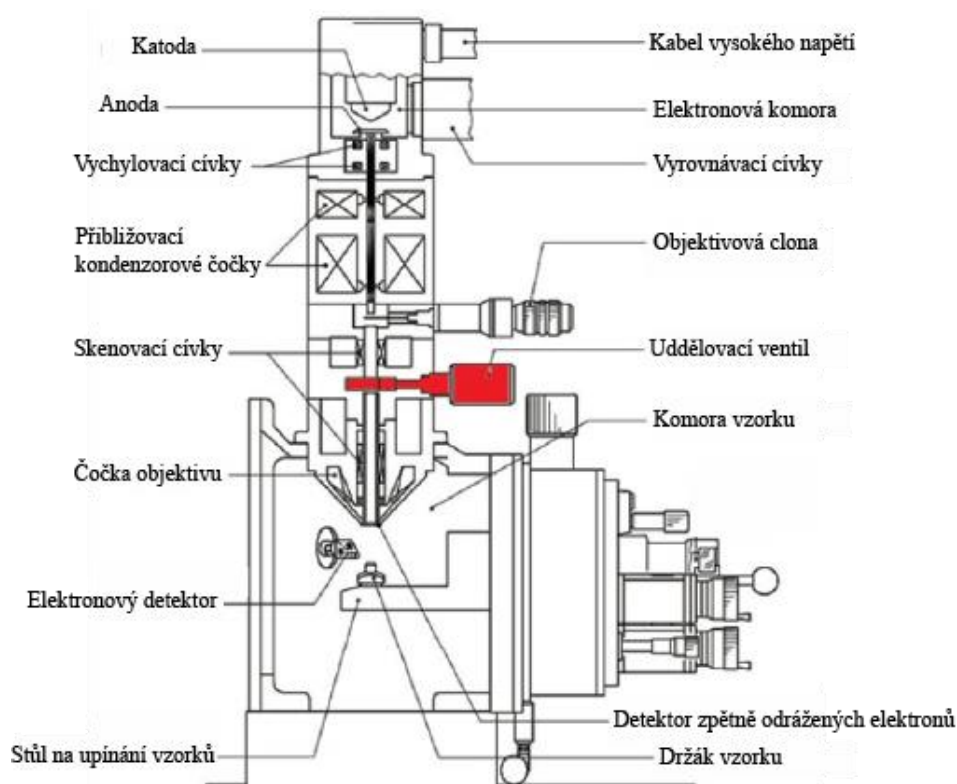
V této části je stručně popsána funkce elektronového mikroskopu, jeho konstrukce a princip fungování. Dále rozbor používaných ventilů a těsnění vhodných pro rastrovací elektronové mikroskopy.

Elektronové mikroskopy jsou stále rozšířenější, neboť ve srovnání s optickými mikroskopy mají větší zvětšení a rozlišení. Využívají se nejen pro zobrazení povrchů, ale i pro jejich chemickou a strukturní analýzu. Existují dva základní typy elektronových mikroskopů. Transmisní elektronové mikroskopy a rastrovací elektronové mikroskopy. Transmisní elektronové mikroskop funguje podobně jako světelný mikroskop, vzorek je ale prozářen elektronovým svazkem, místo svazku fotonů, a zvětšený obraz je následně zachycen na stínítku nebo jiném plošném detektoru. Díky rozvoji elektroniky a počítačového zpracování obrazu se však v dnešní době více rozšířily mikroskopy rastrovací. [1]

2.1.1 Rastrovací elektronový mikroskop

Elektrony emitované kladně nabitou katodou jsou urychlovány rozdílem napětí směrem k anodě, která bývá nejčastěji uzemněna, a proto emitované elektrony přitahuje. Elektrony následně vstupují do elektronové optiky. Elektronová optika je zkonstruována tak, že svazek elektronů fokusuje do co nejmenší plochy zkoumaného vzorku. U elektronových mikroskopů se používají dva typy elektronové optiky. Elektrostatické čočky jsou používány většinou přímo ve zdroji elektronů k prvotnímu zformování elektronového svazku a k jejich urychlení. Jsou to v podstatě soustavy rotačně symetrických elektrod s kruhovými otvory, mezi kterými se udržuje různý elektrický potenciál. Svazek prolétávajících elektronů zformujeme správnou volbou velikosti otvorů, hodnot elektrického potenciálu a vzájemnou vzdáleností desek. Druhá varianta jsou elektromagnetické čočky, ty využívají působení nehomogenního magnetického pole na pohybující se elektrony. [1] [2]

Svazek elektronů dopadající na vzorek generuje různé typy signálů, které jsou dále zpracovávány řídicím počítačem a na základě kterých je vykreslován obraz zkoumaného vzorku na počítači. V celém prostoru, kde se pohybují nejen primární elektrony, musí být neustále vakuum, jelikož jakýkoliv kontakt elektronů s jinými částicemi by měnily vlastnosti elektronového svazku nežádoucím způsobem. Elektrony by se rozptýlovaly a byly by absorbovány jinými atomy. Navíc by hrozilo poškození katody ve zdroji elektronů. V přítomnosti dalších částic by se kontaminoval zkoumaný vzorek i jednotlivé části optického systému mikroskopu. Rentgenové záření i elektrony uvolňované ze vzorku by se tlumily a výsledný obraz zkoumaného vzorku by byl neostrý a měl by nižší rozlišovací schopnost. Nejvyšší vakuum je nutné přitom udržovat ve zdroji elektronů a v místě zkoumaného vzorku. [1] [2]



Obrázek 2-1 Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu [16]

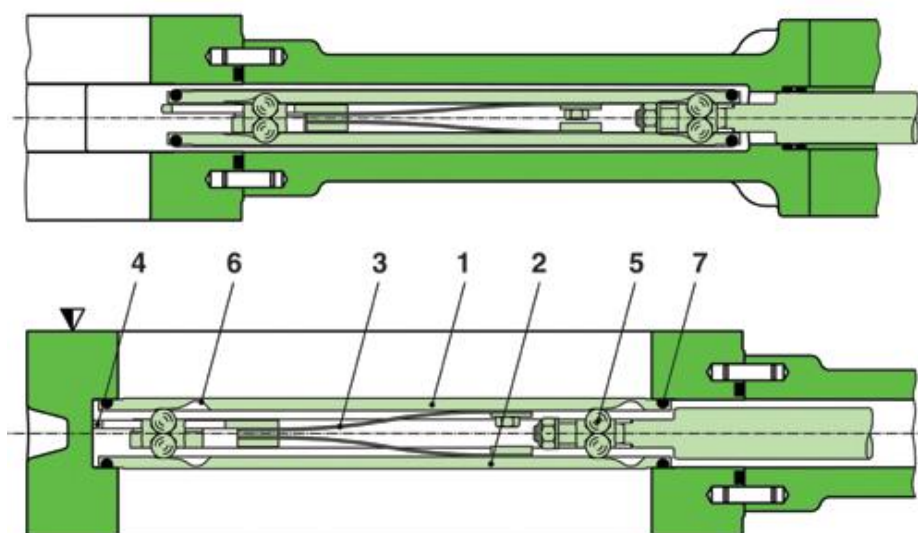
2.2 Ventily

Vakuové ventily musí splnit v tubusu rastrovacího mikroskopu dva hlavní požadavky. Musí být schopny zajistit vakuum v jednotlivých částech mikroskopu při nejrůznějších provozních režimech a zároveň během celé doby používání nesmí kontaminovat prostředí mikroskopu, nebo nežádoucím způsobem ovlivňovat elektronový svazek. To v praxi znamená nutnost vyhnout se tření mezi těsnícím kroužkem a dosedací plochou. Důležitá je i správná volba materiálů. Takto používané ventily mají propracované řešení a každý výrobce si potřebné „know-how“ pečlivě chrání. Mezi největší firmy vyrábějící takovéto ventily je firma VAT Valve, Pfeiffer Vacuum, Htc Vacuum. [4] [5]

2.2.1 Základní používané ventily

Nejpoužívanějšími ventily v dané problematice jsou šoupátkové ventily. Ty se opět liší ve zpracování a výsledném mechanismu, který má každý výrobce navrhnout jinak a speciálně pro různá použití.

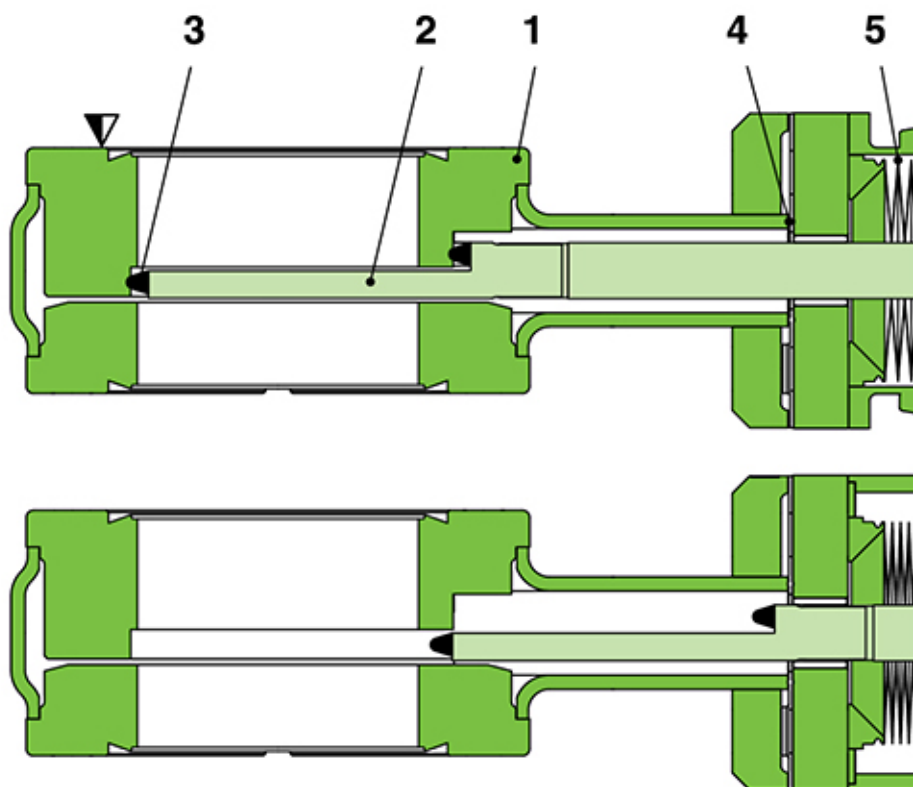
Ventilové desky, obvykle duální konstrukce, se pohybují lineárním pohybem do prostoru, který budou utěšňovat, poté jsou desky od sebe tlačeny pomocí kuliček a těsnění šoupátka je přitlačeno na dosedací plochy. Při vracení se do výchozí polohy, jsou kuličky zatlačeny do zářezů a následně se šoupátko lineárním pohybem vrátí do původní polohy. V závislosti na směru pohybu ventilového šoupátka se rozlišují odskokové ventily, kyvadlové ventily a rotační lopátkové ventily. [3] [4]



Obrázek 2-2 Schéma šoupátkového ventilu [4]

1- ventilové šoupátko, 2- proti plech, 3- listové pružiny, 4- pružinový doraz, 5- páry kuliček, 6- zářezky, 7- těsnění šoupátka

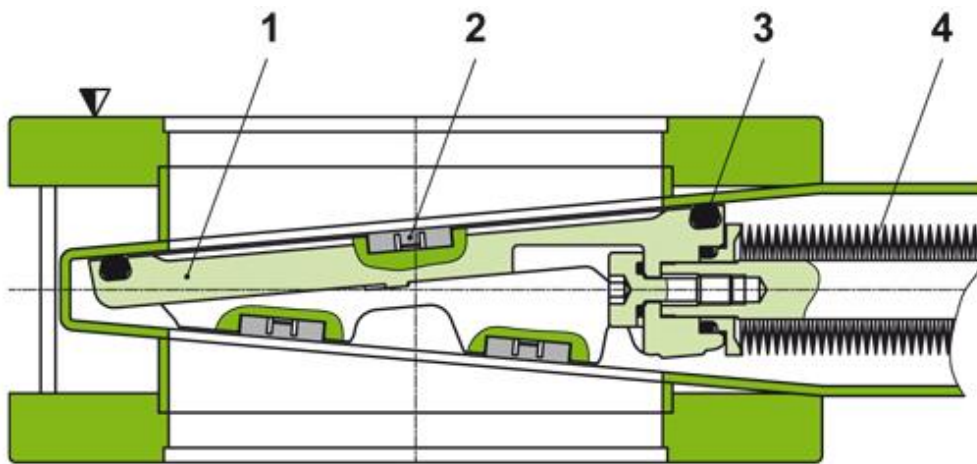
Další varianta UHV ventilu, poskytuje spolehlivé těsnění šoupátka bez jakéhokoli tření. V tomto případě je těsnění vulkanizováno k šoupátku, aby poskytovalo spolehlivější a odolnější těsnění v kombinaci s vynikajícím výkonem, pokud jde o nízkou tvorbu částic, která je u vakuových ventilů velmi důležitá. Důležité je u tohoto typu ventilu zajistit správný chod mechanismu, především plynulost a správné rychlosti při dosedání těsnění na těsnící plochy, aby nenastávaly rázy. Výhodou této varianty je minimalizace ventilového mechanismu ve vakuu, není také potřeba využívat maziv. Díky modulárnímu konstrukci lze tuto variantu přizpůsobit na velké množství řešených problémů.



Obrázek 2-3 Těsnící ventil [4]

1- těleso ventilu, 2- brána, 3- těsnění brány, 4- těsnění kapoty, 5- vlnovec

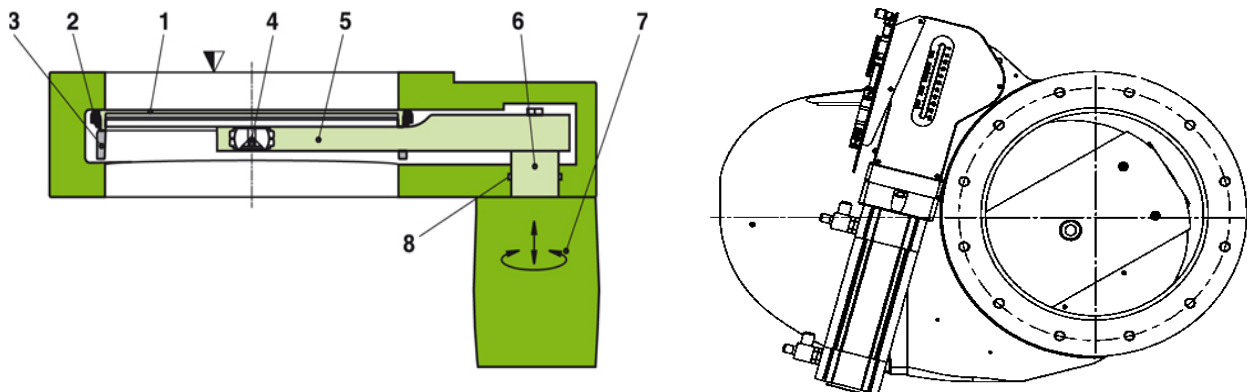
Klínová varianta těsnícího ventilu má kompaktní design, výhodou je rychlé otevírání a zavírání a možnost otevření diferenčního tlaku okolo 1 baru. V mechanismu je využito vlnovcového těsnění, které nevyžaduje přítomnost maziva. Další výhodou je velice snadná údržba, při které není potřeba využít speciálních nástrojů a následného seřízení. Ventil funguje tak, že brána se nejprve lineárním pohybem dostane do prostoru pod dosedací plochy a následně je O-kroužek šoupátka přitlačen k tělu ventilu. Nevýhodou této varianty je větší množství součástí ventilu v prostoru vakua.



Obrázek 2-4 Klínový ventil [4]

1- brána, 2- posuvné prvky, 3- těsnění brány, 4- vlnovec

Mechanismus kyvadlového ventilu je celkem jednoduchý, deska ventilu se otáčí z tělesa ventilu do utěšňovaného prostoru a následně je těsnění díky dvouosému pohonu přitlačeno k horní hraně ventilu. Tyto ventily jsou robustní a dají se integrovat u spousty procesů. Velkou výhodou těchto ventilů jsou nízké otřesy během provozu. Ve vakuu se nachází minimální počet součástí a jeho údržba je velmi jednoduchá.



Obrázek 2-5 Kyvadlový ventil [4]

1 - deska 2 - těsnící kroužek 3 - opěrný kroužek 4 - kardanový kloub 5 - páka 6 - hřídel pohonu 7 – dvouosý pohon 8 - těsnění otočné průchodky

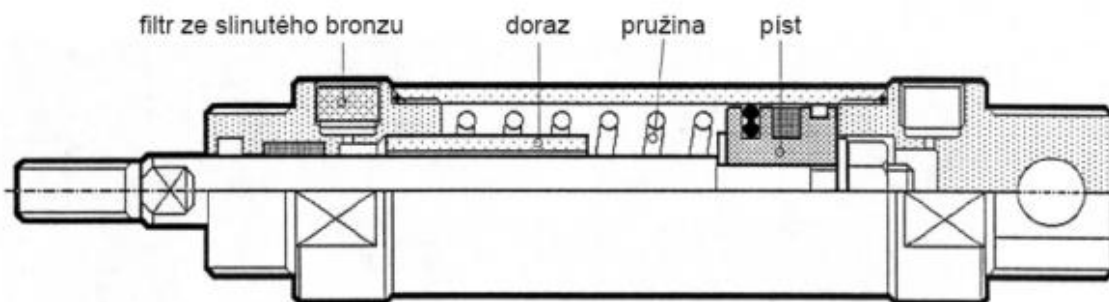
2.3 Aktuátory ventilů

Pro pohon ventilů se používají nejrůznější druhy aktuátorů, jejichž nejdůležitějšími vlastnostmi jsou zdvih a výsledná síla, kterou je aktuátor schopen vyvinout. Tím nejjednodušším je ruční pohon, který však neumožňuje automatizaci. Dále se používají aktuátory elektromechanické, hydraulické a pneumatické.

2.3.1 Pneumatické aktuátory

V pneumatickém aktuátoru je zdrojem energie stlačený plyn, nejčastěji vzduch nebo dusík. Aktuátory mohou být provedeny ve dvou různých variantách. Základní varianta je monostabilní, zde pokud nepřivádíme stlačený plyn, aktuátor se automaticky vrací do původní polohy. Druhá varianta je bistabilní aktuátor, který po odpojení signálu nezmění polohu. K jeho vrácení do původní pozice, musíme přivést další signál ke změně polohy. Pro oddělovací ventil je výhodnější monostabilní aktuátor, protože v případě výpadku dodávky stlačeného vzduchu, dojde k automatickému uzavření ventilu do bezpečného stavu. Pneumatický aktuátor může konat rychlé pohyby a snadno se reguluje. Nevýhodou je omezená síla, problém dosažení plynulých a pomalých pohybů a zastavení v mezi polohách. [5]

Jednoduchým příkladem pneumatického aktuátoru je jednočinný pneumatický válec. Zde stlačený vzduch působí pouze jedním směrem a do původní pozice je vracen pružinou, pokud snížíme tlak vzduchu.



Obrázek 2-6 Jednočinný pneumatický válec [11]

2.3.2 Hydraulické aktuátory

U hydraulických aktuátorů je zdrojem energie kapalina o vysokém tlaku, nejčastější je hydraulický olej. Podobně jako u pneumatických aktuátorů i zde je řízení zajištěno ventily. Velkým rozdílem oproti pneumatickým aktuátorům jsou používané tlaky, se kterými je pracováno, u ventilů hydraulických aktuátorů jsou to desítky MPa, oproti jednotkám MPa v případě pneumatických aktuátorů. Výhodou je možnost jednoduchého a poměrně přehledného zastavování v mezipolohách. [6]

2.3.3 Elektromechanické aktuátory

Tyto aktuátory převádějí nejčastěji vstupní rotační pohyb elektromotoru na lineární pohyb. Existuje řada konstrukcí lineárních aktuátorů. Jejich konstrukce závisí na požadovaných parametrech, rychlosti zdvihu, velikosti síly a přesnosti. Hodí se pro jednoduchá zařízení, kde je potřeba spolehlivost a výdrž. Výhodou je tichý chod, spotřeba energie pouze při vykonané práci. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena. Pro elektronové mikroskopy je však hlavní nevýhodou riziko elektromagnetického rušení, jehož zdrojem je vlastní elektromotor nebo napájecí elektrická soustava. [7]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Rastrovací elektronové mikroskopy tvoří významnou skupinu analytických přístrojů nacházejících uplatnění ve stále nových oborech. Z pohledu tlaku (vakua) se skládají z 2 částí. Horní část obsahuje elektronovou trysku a část elektronového tubusu, především kondenzor. V této části je trvale vakuum o tlaku řádově $10^{-7} \div 10^{-8}$ Pa. Takto nízký tlak je nezbytný s ohledem na provoz katody. Při zhoršení tlaku by jinak prakticky okamžitě došlo k jejímu zničení. Dolní část obsahuje zbytek elektronového tubusu, především objektiv a komoru, do které je vkládán vzorek. V této části je po většinu provozu tlak $10^{-2} \div 10^{-4}$ Pa. Obě části jsou během provozu nezávisle čerpány vlastním systémem vývěv a jsou propojeny pouze tenkou diferenciální kapilárou vytvářející dostatečný tlakový odpor tak, že je v horní části možné udržet potřebný tlak. V případě zakládání, nebo vyjímání vzorku, je však nutné dolní část zavzdušnit na atmosférický tlak 10^5 Pa. V takovém případě by tlaková ztráta na kapiláře nestačila a oba prostory je třeba oddělit ventilem trysky. V moderních mikroskopech požadavky na tento ventil neustále rostou, neboť ventil musí nejen umožnit průchod svazků elektronů mezi komorami trysky a vzorku, ale zároveň nesmí tento svazek nijak ovlivňovat. Komerčně dostupné ventily takto specifické požadavky většinou nesplňují nebo by byly zbytečně rozměrné či nákladné. Z toho důvodu má smysl navrhnout ventil přímo pro tuto specifickou aplikaci s ohledem na optimální náklady navrženého řešení. [2]

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem je vyvinout oddělovací GVL ventil pro konkrétní typ elektronového tubusu, který bude splňovat parametry z hlediska mechanické čistoty, elektrického pole, magnetického pole a poměrně malého zástavbového prostoru.

Dílčí cíle bakalářské práce:

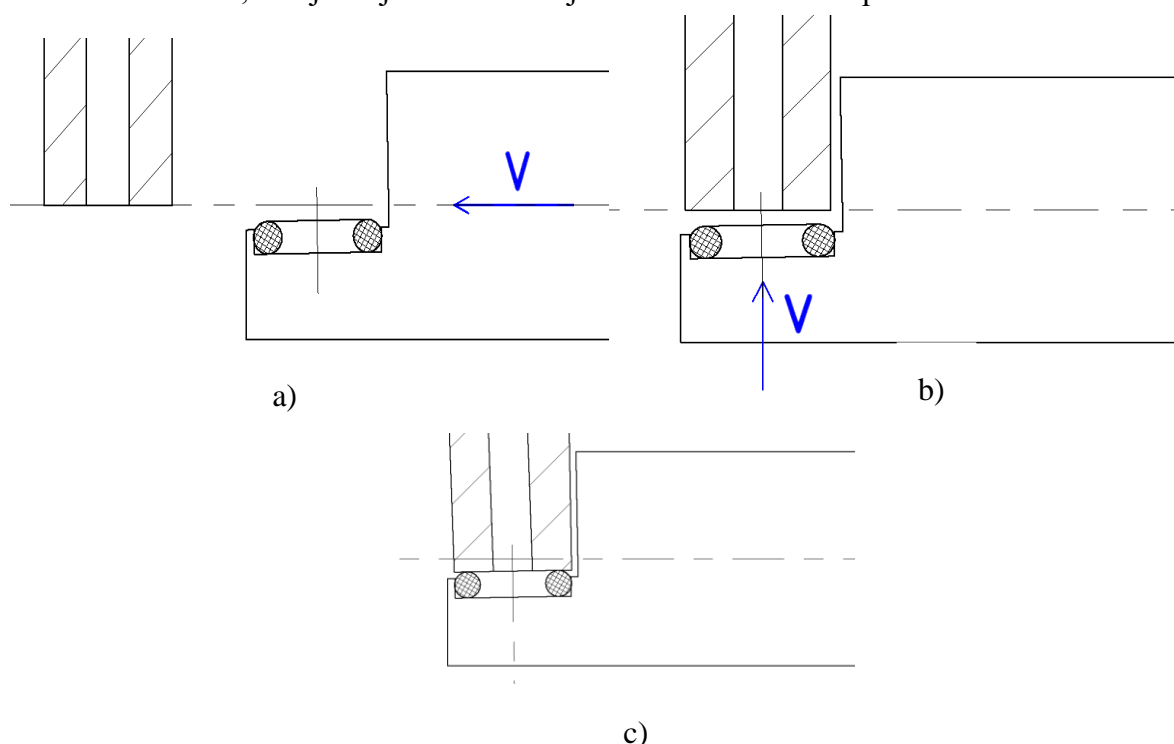
- porovnat nejrůznější způsoby a principy uzavírání vakua
- porovnat různé druhy pohonu ventilu dle vhodnosti pro elektronový mikroskop s ohledem na čistotu provozu, rušení citlivé elektroniky, hluk atd.
- navrhnout konkrétní řešení pro daný zástavbový prostor
- volit materiály ventilu s ohledem na použití ve vakuu a v prostředí elektromagnetického pole
- vyrobit maketu nebo funkční demonstrátor ventilu např. formou 3D tisku

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Ventil musí mít dva stavy – otevřeno a zavřeno. Po dobu zavřeného ventilu se vkládá, nebo vyjímá vzorek z mikroskopu, tj. v komoře je atmosférický tlak. Aktuátor ventilu musí působit dostatečnou silou na těsnící element (O-kroužek) a stlačit jej tak, aby dokonale těsnil. Poté je spodní komora vyčerpána na tlak $10^{-2} \div 10^{-4}$ Pa pomocí vývěv. Až v tuto chvíli může být ventil otevřen. Ventil se tedy otevírá pouze v situaci, kdy je na obou stranách ventilu vakuum, což zjednodušuje konstrukci. Na druhou stranu, v situaci otevřeného ventilu a procházejícího elektronového svazku, nesmí ventil tento svazek ovlivňovat. Během celého procesu také nesmí nijak kontaminovat prostor mikroskopu.

4.1.1 Koncepční návrh 1

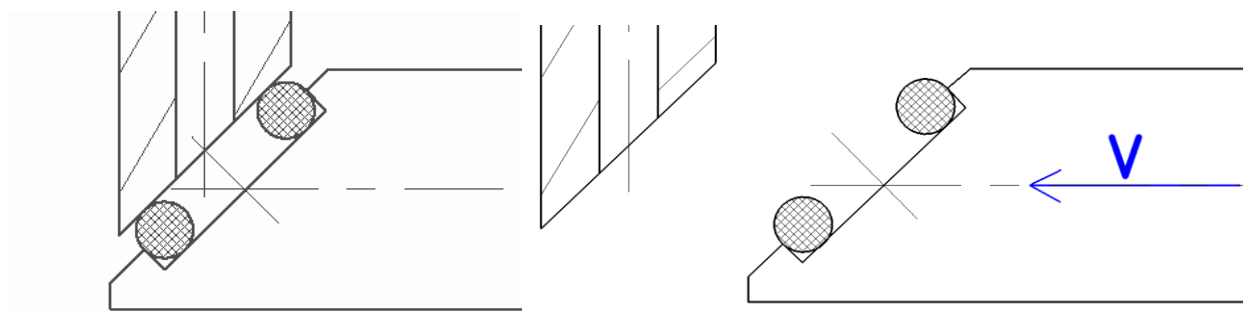
První koncepční varianta koná z pohledu kinematiky dva na sebe navazující pohyby. V počáteční poloze je O-kroužek mimo kapiláru a nijak nebrání ani neovlivňuje průchodu svazku elektronů. Pohyb je ze začátku lineární až do té doby než se O-kroužek nachází pod kapilárou, poté následuje rotační pohyb, který zajistí přisunutí O-kroužku ke kapiláře. Detaily pohybu a jeho zajištění je podrobněji popsáno v kapitole 6. Výhodou této varianty jsou jednoduché těsnící plochy. Další výhodou je minimální kontaminace prostoru, jelikož nedochází k tření, to je zajištěno složitějším mechanismem oproti dalším variantám.



Obrázek 4-1 Schéma pohybu koncepčního návrhu 1

4.1.2 Koncepční návrh 2

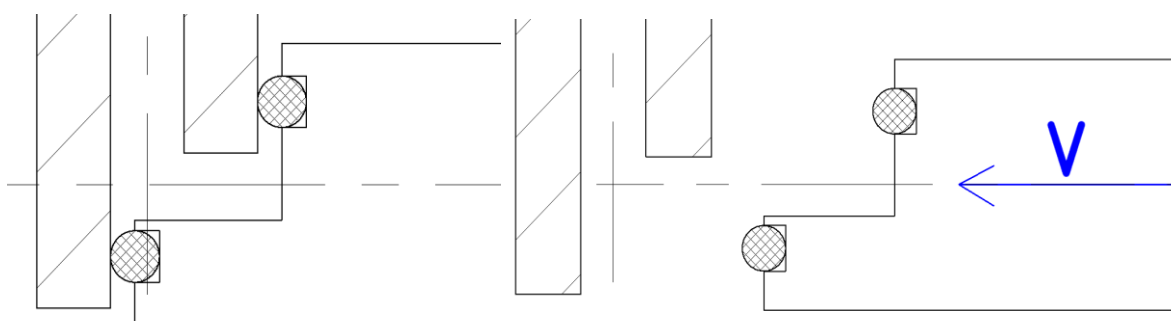
Druhá koncepční varianta koná pouze lineární pohyb. Počáteční poloha je opět mimo kapiláru, aby nebránila a nijak neovlivňovala průchozí svazek elektronů. Při zavírání ventilu nastává pouze příslušný pohyb, kdy je těsnící O-kroužek přitisknut ke kapiláře. Výhodou této varianty je jednoduchost pohybu a s tím spojená jednodušší konstrukce mechanismu. Další výhodou jsou jednoduché těsnící plochy. Nevýhodou je ale možná kontaminace prostoru mikroskopu, při přitlačení O-kroužku na dosedací plochu, by mohlo nastat tření, které by způsobilo uvolňování částic materiálu O-kroužku do vnitřního prostoru tubusu.



Obrázek 4-2 Schéma pohybu koncepčního návrhu 2

4.1.3 Koncepční návrh 3

Třetí koncepční varianta koná stejně jako varianta druhá pouze lineární pohyb a v počáteční poloze je mimo prostor kapiláry. Aby zde nastalo úplné utěsnění prostoru, je nutno použít složitější geometrii těsnění a s tím spojené dosedací plochy. Výhodou ale je jednoduchý mechanismus ze stejného důvodu jako v případě varianty 2. Nevýhodou jsou záhyby těsnění, které by při přitlačení na dosedací plochy mohly způsobovat tření a tím kontaminovat prostor mikroskopu.



Obrázek 4-3 Schéma pohybu koncepčního návrhu 3

4.1.4 Porovnání a volba výsledné varianty

Výhodou variant dvě a tři je jednodušší mechanismus, jelikož konají pouze lineární pohyb. U varianty tři je potřeba navrhnout složitější dosedací plochy a plochy pro těsnění. U variant dvě a tři může docházet k tření, které by způsobovalo kontaminaci prostoru mikroskopu. Čistota v oblasti tubusu je při práci ventilu jedním z nejdůležitějších parametrů. První varianta sice vyžaduje navržení složitějšího mechanismu, ale má jednoduché těsnící plochy a především by zde nemělo docházet k tření díky dvojitmu pohybu. Proto jsem i po konzultaci s firmou Tescan zvolil koncepční návrh 1.

5 KONSTRUKCE ŘEŠENÍ

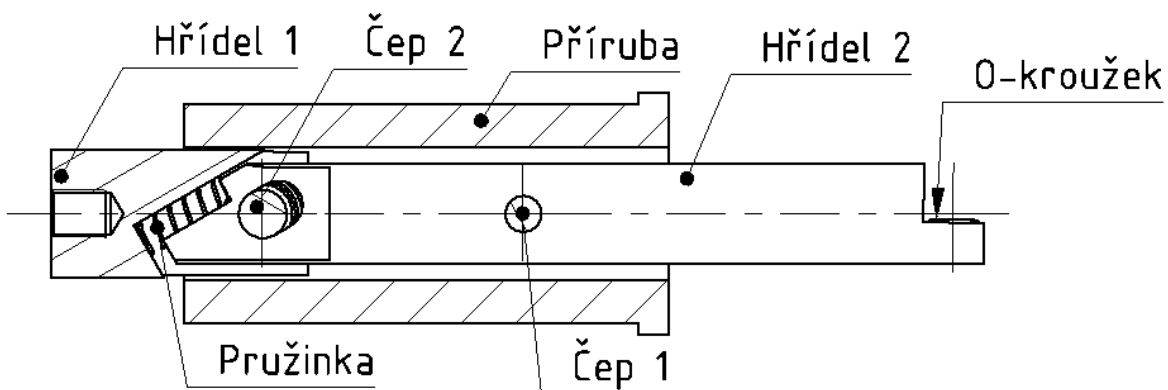
Cílem práce je navrhnout konstrukčně a výrobně jednoduchý ventil, který bude snadno smontovatelný, nebude náročný na údržbu a vejde se do prostoru v rastrovacím elektronovém mikroskopu. Ze začátku je potřeba vyřešit pohyb ventilu tak, aby se omezilo co nejvíce tření. Následně navrhnout součásti tak, aby ventil fungoval. Poté provést silový rozbor. A nakonec vybrat vyhovující aktuátor.

5.1 Základní parametry konstrukčního návrhu

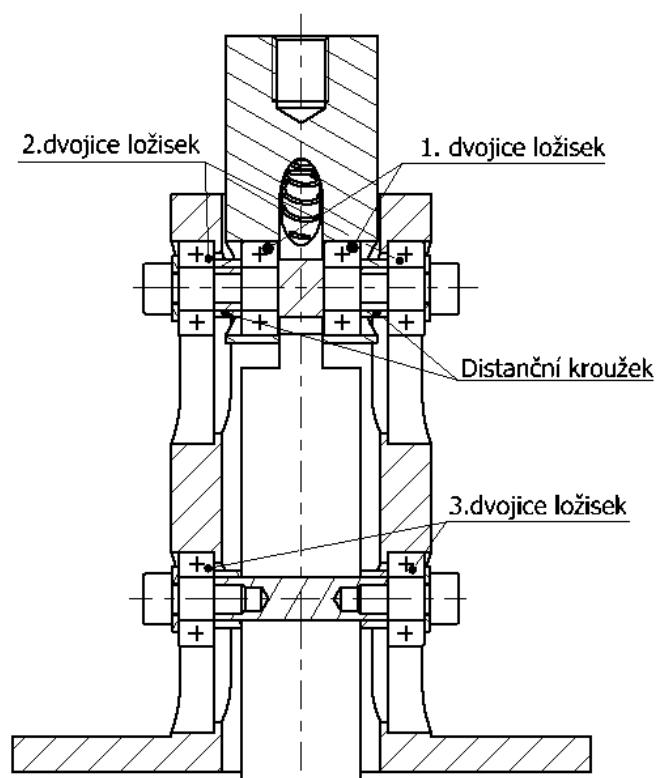
- Přítlačná síla na těsnících kroužků, 25 N
- Připojovací rozměry děr 65x25
- Délka ventilu 240 mm
- Výška ventilu 40 mm
- Šířka ventilů. 80 mm

5.2 Popis vybrané varianty

Jak již bylo popsáno v kapitole 5, vybrána byla varianta 1. Ta se skládá z příruby, dvou hřídelí, dvou čepů, čtyř rozpěrek, čtyř podložek, pružinky a šesti ložisek. Všechny součástky jsou jednoduše obrobitelné a nejsou výrobně náročné. Z pohledu kinematiky sestava koná nejprve lineární (přísuvný) pohyb, kdy se těsnící O-kroužek dostane pod kapiláru a následně je k ní přitisknut. Na hřídel 1 je připojen aktuátor přes připojovací šroub a držák, který tlačí na hřídel 1 a ta koná lineární pohyb. Pohyb je zajištěn přes čep 1 na kterém jsou uložena 4 ložiska (Obrázek 5-2). První pár ložisek spojuje hřídel 1 s čepem 1, ten zároveň prochází drážkou v hřídeli 2, přenáší tak síly a realizuje pohyb hřídele 2. Druhý pár ložisek na čepu 1 je uložen v drážkách příruby, tímto způsobem je zajištěn klidný lineární chod. Ložiska jsou od sebe oddělena distančním kroužkem a zajištěna šroubem s podložkou. Hřídelí 2 prochází čep 2 na kterém je uložena dvojice ložisek, ty se podobně jako v předchozím případě pohybují v drážkách v přírubě. Na (Obrázek 5-2) je vidět uložení v počáteční poloze, kdy ložiska jsou v zadní pozici drážek. Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu

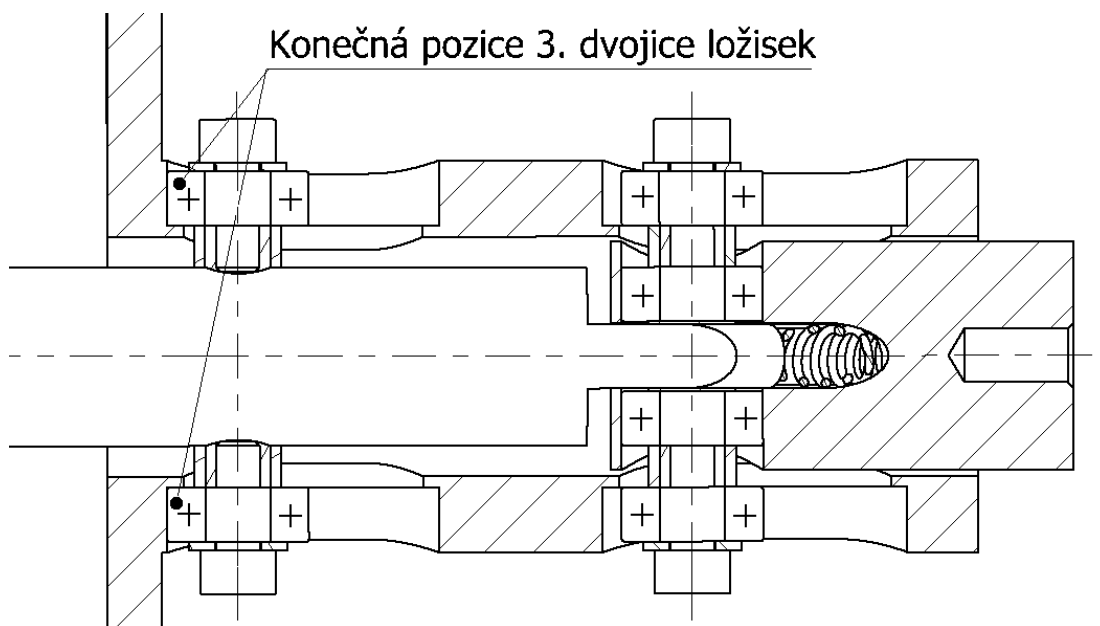


Obrázek 5-1 Řez ventilem

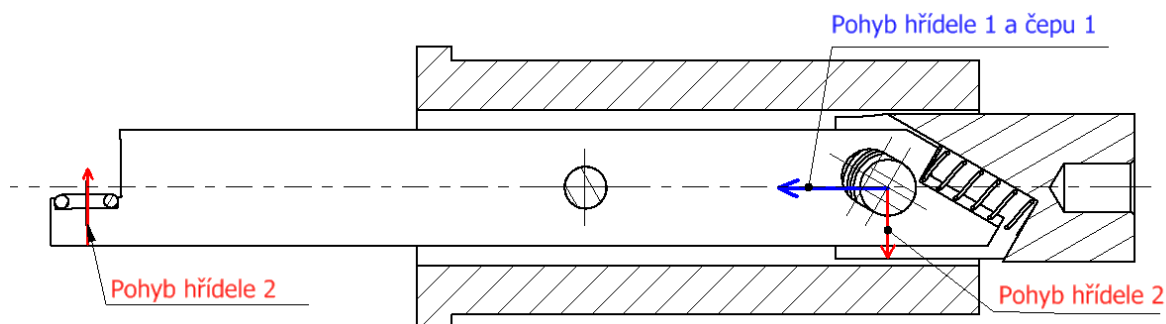


Obrázek 5-2 Řez ventilem, počáteční poloha

Ve chvíli, kdy se se dostane třetí dvojice ložisek do své konečné polohy v drážce (Obrázek 5-3), začne se čep 1 odvalovat v drážce hřídele 2 a tím ji tlačit dolů, to způsobí, že se O-kroužek na druhém konci hřídele přitiskne na dosedací plochu (Obrázek 5-4). Při odlehčení má důležitou úlohu pružinka, která je umístěna mezi hřídelemi (Obrázek 5-1). V koncové pozici je stlačena, takže působí silou na obě hřídele a v momentě kdy aktuátor přestane tlačit na hřídel 1, ale začne ji vracet zpět do původní polohy, tato síla zajistí pohyb hřídele 2 nejprve od dosedací plochy těsnění a až následně lineární posun do původní polohy.



Obrázek 5-3 Schéma ventilu, O-kroužek v pozici pod kapilárou



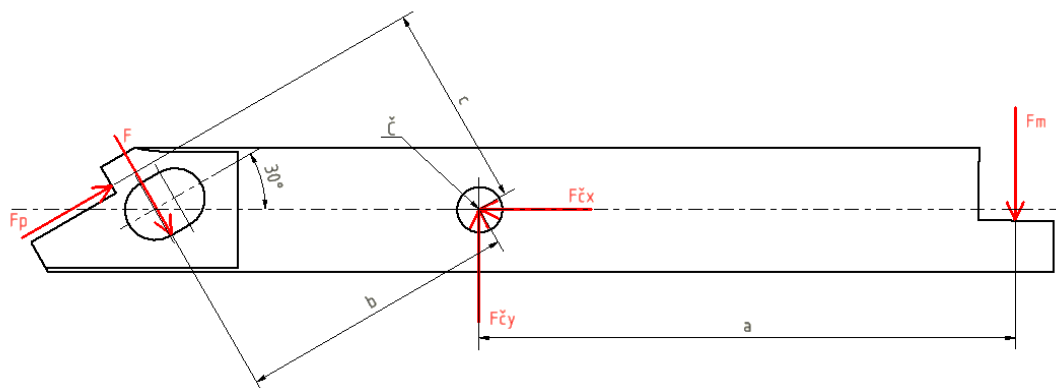
Obrázek 5-4 Pohyb přitisknutí O-Kroužku

5.2.1 Pružinka

Pružinka má velice důležitou úlohu při vrácení ventilu do původní polohy. Ve chvíli, kdy aktuátor začne vracet hřídel 1 do původní polohy, pružinka musí zajistit rotační pohyb hřídele 2 kolem čepu 2, tím zajistit bezpečné odsunutí těsnícího kroužku od kapiláry a zamezit tak tření. Pružinku jsem zvolil od firmy Gutekunst Federn, označení v katalogu D-135. Je delší než vymezená drážka o 1,5 mm, to způsobí sílu předpětí o velikosti $F_{p1} = 5,96N$. [9]

5.2.2 Silový rozbor

Na začátku jsou známy dvě síly. Přítlačná, která je požadována $F_m=25\text{ N}$ a sílu od pružinky, kterou jsme schopni vypočítat, jelikož známe stlačení a její tuhost. Z navržené geometrie známe pohyb konce hřídele 2 pod silou F_m , ten je 1 mm. Síly jsou počítány v uzavřeném stavu, jelikož zde je namáhání největší.



Obrázek 5-5 Silový rozbor hřídel 2

Vzdálenosti jsem bral z programu SolidWorks 2020. Nejprve je potřeba spočítat sílu pružinky F_p . Posunutí pod silou F_p v drážce, která je pod úhlem 30° , vychází $l=0,345$. Následně jsem hřídel uvolnil a vytvořil silové rovnice a momentovou rovnici k ose čepu 1 (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.).

Určení velikosti síly F_p

$$k = 3,975 \text{ N/mm}$$

$$F_p = k \cdot (l + p) = 3,975 \cdot (0,345 + 1,5) = 7,33 \text{ N}$$

Výsledná síla od pružinky je 7,33N. Tato síla vyhovuje, jelikož bude schopna zajistit rotaci hřídele před posunem lineárním. Drážka pro čep 1 má vůli, tudíž po uvolnění nebude hned působit zpětně, to přispívá k tomu, že síla F_p nemusí být velká.

Určení velikosti sil na hřídeli 2

Silové a momentová rovnice:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_p \cdot \cos(30^\circ) + F \cdot \sin(30^\circ) - F_{cx} = 0$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_p \cdot \sin(30^\circ) - F \cdot \cos(30^\circ) + F_{cy} - F_m = 0$$

$$\sum M_{\check{c}} = 0 \rightarrow -F_m \cdot a + F \cdot b - F_p \cdot c = 0$$

$$F = \frac{F_m \cdot a + F_p \cdot c}{b} = \frac{25 \cdot 71 + 7,33 \cdot 27}{36,95} = 53,36 \text{ N}$$

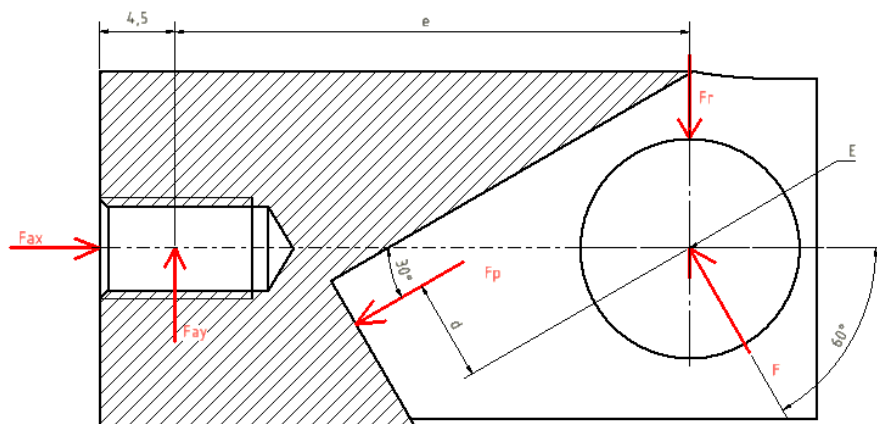
$$F_{\check{x}} = F_p \cdot \cos(30^\circ) + F \cdot \sin(30^\circ) = 7,33 \cdot \cos(30^\circ) + 53,36 \cdot \sin(30^\circ) = 33,1 \text{ N}$$

$$F_{\check{y}} = -F_p \cdot \sin(30^\circ) + F \cdot \cos(30^\circ) + F_m =$$

$$F_{\check{y}} = -7,33 \cdot \sin(30^\circ) + 53,36 \cdot \cos(30^\circ) + 25 = 67,55 \text{ N}$$

Určení velikosti sil na hřídeli 1

Na hřídel 1 působí reakční síly F a F_p , které byly vypočítány u hřídele 2. Dále zde působí síla F_{ax} , která je pro nás velmi důležitá při správné volbě aktuátoru, jelikož je to minimální požadovaná síla pro správné zavření ventilu. Aktuátor bude muset snést i malé zatížení v ose y .



Obrázek 5-6 Silový rozbor na hřídeli 1

Určení velikosti potřebné pro aktuátor

Silové a momentová rovnice:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow -F_p \cdot \cos(30^\circ) - F \cdot \cos(60^\circ) + F_{ax} = 0$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow -F_p \cdot \sin(30^\circ) + F \cdot \sin(60^\circ) + F_{ay} - F_r = 0$$

$$\sum M_E = 0 \rightarrow F_{ay} \cdot e - F_p \cdot d = 0$$

$$F_{ax} = F_p \cdot \cos(30^\circ) + F \cdot \cos(60^\circ) = 7,33 \cdot \cos(30^\circ) + 53,36 \cdot \cos(60^\circ) = 33,01$$

$$F_{ay} = \frac{F_p \cdot d}{e} = \frac{7,33 \cdot 6}{30,5} = 1,44 \text{ N}$$

$$F_r = -F_p \cdot \sin(30^\circ) + F \cdot \sin(60^\circ) - F_{ay}$$

$$F_r = 7,33 \cdot \sin(30^\circ) + 53,36 \cdot \sin(60^\circ) - 1,44 = 41,1 \text{ N}$$

Síla F_{ay} je malá a aktuátor ji bez problémů snese. Síla F_{ax} je potřebná síla pro náš aktuátor.

5.2.3 Hřídel 1

Ačkoliv se hřídel nenachází přímo v prostoru mikroskopu, je v jeho blízkosti, a proto je z materiálu ČSN 17 247, jedná se o nerezovou ocel. Tato ocel je nemagnetická. V hřídeli bude obrobena drážka pro pružinku, a díry pro uložení ložisek a vyřezán závit pro připojení aktuátoru. Nejsou zde vyžadovány zvětšené nároky na přesnost, pouze u děr pro uložení ložisek. Ze silového rozboru je vidět že hřídel nepřenáší velké síly.

5.2.4 Hřídel 2

Jelikož se hřídel nachází v prostoru mikroskopu, musí být z materiálu který je nemagnetický. Jelikož na hřídel nepůsobí větší síly volím opět materiál ČSN 17 247. Zde je velice důležité správně obrobit zahloubení pro O-kroužek. Jelikož zde utěsňujeme vakuum, zahloubení musí být frézováno kruhovitě. Tím vzniklé „rýhy“ po frézování budou kruhovitě společně s O-kroužkem a prostor bude utěsněn, pokud bychom frézovali běžným způsobem, byly by „rýhy“ kolmo na O-kroužek a prostor bychom neutěsnili. Dále je důležité správně vyfrézovat drážku pro čep 1. Jelikož zde se přenášejí síly mezi hřídeli.

5.2.5 Ložiska

V sestavě je celkem 6 ložisek a všechna jsou stejná z důvodu omezeného výběru na daný průměr a vhodných rozměrů pro daný prostor. Výsledné ložisko je SKF W 628/-2Z. Největší síla působí na dvojici ložisek na čepu 1. Počítám se silou vypočítanou ze silového rozboru, jelikož v mikroskopu, pro který je tento ventil navrhován, dokáží ve firmě Tescan odladit a neustále přivádět stlačený dusík do aktuátoru a tak zajistit přítlačnou sílu $F_m=25N$. [8]

Hodnoty ložiska:

$$C = 618 N$$

$$C_0 = 224 N$$

Výpočet působící síly na ložisko:

$$F_{\check{c}} = \sqrt{F_{\check{c}x}^2 + F_{\check{c}y}^2} = \sqrt{33,1^2 + 67,55^2} = 75,22N$$

Síla působící na jedno ložisko je poloviční:

$$F_l = \frac{F_{\check{c}}}{2} = \frac{75,22}{2} = 37,6N$$

Výpočet trvanlivosti ložiska:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F_l}\right)^a \cdot 10^6 = \left(\frac{618}{37,6}\right)^3 \cdot 10^6 = 444 \cdot 10^7 \text{otáček.}$$

$$L = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10} = 0,25 \cdot 1 \cdot 444 \cdot 10^7 = 111 \cdot 10^7 \text{otáček}$$

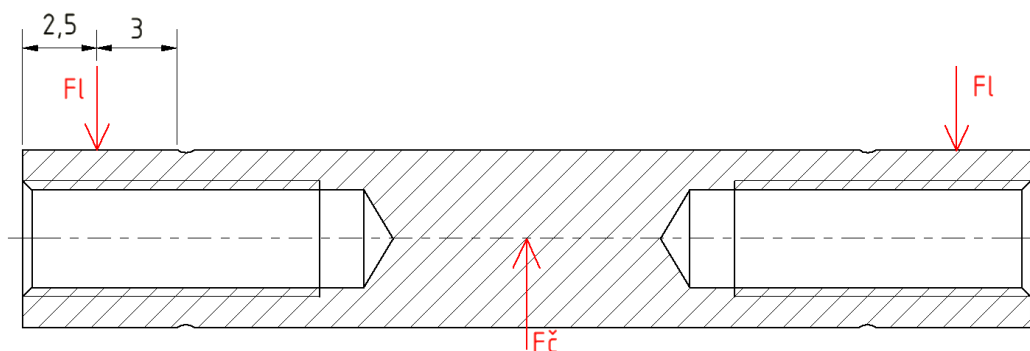
Trvanlivost v otáčkách vyšla velká, jelikož působící síla na ložisko je malá. Ložisko navíc bude většinu času v klidu, takže časová životnost ložiska bude také vysoká. Z omezené nabídky na potřebné rozměry, ale nebylo možné vybrat ložisko s menší únosností.

5.2.6 Výpočet bezpečnosti čepu

Z pohledu bezpečnosti celé sestavy na tom je nejhůře čep 1, který přenáší největší sílu $F_{\check{c}}$, zároveň se zde nachází díra pro šroub, která značně zmenšuje průřez místa a nad ní navíc zápich, který způsobuje koncentrace napětí. Další místo by bylo na čepu 2, kde by se nebezpečné místo nacházelo u změny průměru, zde ale není zmenšený průřez, tudíž vzniká jen koncentrace napětí, navíc oproti nebezpečnému místu na čepu 1, tady nepůsobí tak velké ohybové momenty.

Kontrola čepu 1

Nebezpečné místo se nachází v místě zápichu, jelikož zde je koncentrace napětí a zároveň zmenšený průřez o vnitřní závit. Největší napětí nastává ve chvíli, kdy je ventil v zavřené poloze. Nastává zde pouze ohyb. V tomto stavu je také bezpečnost počítána. Zde není čep namáhán cyklicky, to nastává až při chodu zpět, ale tento stav je méně nebezpečný, jelikož zde nepůsobí síla F_m a síly na čep jsou mnohem menší.



Obrázek 5-7 Kontrola čepu 1

Mez kluzu je z tabulek $R_e=190$ Mpa, následně jsem si našel z tabulek součinitel tvaru $\alpha=2,18$. Jelikož je zde průřez zmenšen o závit je nutné vypočítat redukovanou hodnotu modulu průřezu v ohybu W_o . Poté vypočítáme ohybový moment M_o a následně nominální napětí, které porovnáme s mezí kluzu R_e .

$$W_o = \frac{A \cdot \pi}{32 \cdot D_1} \cdot (D_1^4 - d_1^4) = \frac{0,64 \cdot \pi}{32 \cdot 6} (6^4 - 4^4) = 10,9 \text{ mm}^4$$

$$M_o = Fl \cdot 3 = 37,6 \cdot 3 = 112,8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_{o1} = \frac{M_o}{W_o} \cdot \alpha = \frac{112,8}{10,9} \cdot 2,18 = 22,58 \text{ MPa}$$

$$k_1 = \frac{Re}{\sigma_{o1}} = \frac{190}{22,58} = 8,41$$

Bezpečnost nám vyšla a čep tedy vyhovuje. [12]

5.3 Volba aktuátoru

Požadovaná síla, kterou musí aktuátor působit je z výpočtů $F_{ax}=33,01\text{N}$. Jedná se tedy o poměrně malou sílu. Hydraulické aktuátory jsou konstruované na mnohem větší síly. Další nevýhodou hydraulického aktuátoru je ta, že se do prostoru mikroskopu nehodí, při závadě by hydraulický olej mohl napáchat velké škody uvnitř mikroskopu. Elektromechanický aktuátor by byl vhodný, jelikož má tichý hod a jsou konstruovány i na malé síly. Nevýhodou ale je jeho vysoká pořizovací cena, oproti pneumatickému aktuátoru, ta se v důsledku spotřeby energie, která je spotřebována pouze v případě práce aktuátoru, pomalu vrací, ale v tomto případě by to nebylo výhodné, jelikož kompresor v mikroskopu je zapnut z důvodu potřeby udržení požadovaných tlaků v komorách. Nejlépe tedy vychází aktuátor pneumatický, který je stavěn na nižší síly a do prostoru mikroskopu se hodí, jelikož v mikroskopu již je systém vývív pro udržení potřebných tlaků. Jeho nevýhodou je těžší kontrola pohybu, ale v případě tohoto ventilu to není potřeba, protože potřebujeme dostat těsnění z počáteční polohy do konečné a zpět. Jedná se také o monostabilní aktuátor, který nám zajistí při výpadku stlačeného vzduchu, uzavření horní komory, a tím ochrání součástky uvnitř. Po předchozí konzultaci s firmou Tescan jsme vybrali pneumatický aktuátor od firmy SMC pneumatic. Označení vybraného aktuátoru v katalogu SMC CUK20-15T. Jeho zdvih je 12 mm a tlačná síla 80 N.



Obrázek 5-8 Pneumatický aktuátor SMC CUK20-15T [17]

6 DISKUZE

Úkolem této bakalářské práce bylo navrhnout konstrukci oddělovacího ventilu pro daný rastrovací elektronový mikroskop. Ventil musel utěsnit vakuum v horní komoře mikroskopu, zároveň nekontaminovat tubus mikroskopu a neovlivňovat průchozí svazek elektronů. Byl navržen celý mechanismus a všechny jeho součásti včetně aktuátoru, který ventil pohání. Byl zvolen pneumatický aktuátor i na základě bezpečnosti a minimalizaci potenciálního poškození mikroskopu při výpadku elektrické energie. Vhodný je také z důvodu nutnosti práce mikroskopu se stlačeným dusíkem. V práci je vypočítána bezpečnost mezního stavu pružnosti kritického místa na čepu 1 a nejmenší životnost ložiska. Dále byla konstrukčně zajištěna minimální tření mezi těsnícím O-kroužkem a těsnící plochou.

Snažil jsem se, aby výsledný mechanismus byl funkční a zároveň co nejjednodušší. Všechny součásti jsou obrobitelné a nepožadují zvýšenou přesnost na výrobu. Cílem bylo dosáhnout co nejnižší výrobní ceny a zároveň využít co nejmenší prostor mikroskopu. Konstrukce je navržena speciálně na pro daný mikroskop a není ji tedy možné bez úprav používat v jiných případech.

7 ZÁVĚR

V této bakalářské práci bylo mým úkolem navrhnout oddělovací ventil pro specifický rastrovací elektronový mikroskop od firmy Tescan. Ten musel utěsnit vakuum v horní části mikroskopu a zároveň nijak neovlivňovat procházející svazek elektronů v otevřené pozici. Dále nesměl nijak kontaminovat prostor mikroskopu. Byla provedena analýza dostupných řešení a následně navrhnuty tři koncepční návrhy. Z nich byl po rozvaze vybrán nejvhodnější vzhledem k požadovaným parametrům. Dále byl zanalyzován a vybrán pohon ventilu s ohledem na začlenění do mikroskopu. Také byla provedena úvaha nad kritickým místem sestavy a vypočítána bezpečnost k meznímu stavu pružnosti. U použitých ložisek byla v místě největšího zatížení vypočítána životnost. Zároveň byly zachovány rozměry pro připojení ventilu k mikroskopu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GOLDSTEIN, Joseph. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York: Kluwer, 2003. ISBN 0-306-47292-9.
- [2] KARLÍK, Miroslav. *Úvod do transmisní elektronové mikroskopie*. Praha 1: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-800-1047-293.
- [3] Gate valves: *Pfeiffer Vacuum* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/mechanical-components-in-vacuum/valves/gate-valves/>
- [4] Vacuum Isolation Valves: *VAT Valves* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.vatvalve.com/category/vacuum-isolation-valves?_locale=en@ion=CZ
- [5] SCLATER, Neil. *Mechanisms and Mechanical Devices Source book*. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-170442-7.
- [6] ŠKOPÁN, Miroslav. *Hydraulické pohony strojů: Studijní text – sylabus*. Brno: VUT v Brně, 2009.
- [7] BENEŠ, Pavel. *Automatizace a automatizační technika: prostředky automatizační techniky*. Brno, 2014. ISBN 978-80-251-3747-5
- [8] W 628/6-2Z: *SKF* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings>
- [9] Tlačné pružiny: *Gutekunst Federn* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.federnshop.com/cz/produkty/tlacn%c3%a9_pru%c5%beiny.html?backfromdetail=true
- [10] Nerezové tyče kruhové: *MATEZEX spol. s r.o.* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.matezex.cz/tyce-kruhove.html>

- [11] Inovační trendy ve vzduchotechnice: <http://kke.zcu.cz> [online]. Plzeň [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/04/MMP/181_Inovacni_trendy_ve_vzduchotechnice.pdf
- [12] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [13] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky 2: pro školu a praxi*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [14] BRANDEJS, Jan a Pavel SVOBODA. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. V Brně: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM*, 2019. ISBN 978-80-7623-010-1.
- [15] KREMER, Bruno P. *Mikroskop zcela jednoduše*. Aventinum, 2014. ISBN 978-80-7151-281-3.
- [16] SEM Techniques for materials characterization: *SPIE Privacy Policy* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10291/102910B/SEM-techniques-for-materials-characterization/10.1117>
- [17] SMC CUK20-15T Cyl: *SMC Corporation* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.smc Pneumatics.com/CUK20-15T.html>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Použité zkratky

SEM	rastrovací elektronové mikroskopy
GVL	oddělovací vakuový ventil trysky

9.2 Použité symboly

A	součinitel určování modulu průřezu
a	vzdálenost čepu od O-kroužku
a_1	součinitel spolehlivosti
a_{ISO}	součinitel modifikované trvanlivosti
α	součinitel tvaru
b	vzdálenost čepu 1 od čepu 2
C	základní dynamická únosnost
C_0	základní statická únosnost
c	kolmá vzdálenost mezi osou čepu 2 a silou pružiny
D_1	vnější průměr čepu 2
d_1	jmenovitý průměr závitu na čepu 2
d	kolmá vzdálenost mezi silou pružiny a osou čepu 1
e	vzdálenost mezi silou Fay a Fr
F	síla přenášená čepem 1
F_{ax}	síla aktuátoru v ose x
F_{ay}	síla aktuátoru v ose y
$F_{\check{c}}$	síla působící na čep 2

$F_{\check{c}x}$	síla působící v ose x na čep 2
$F_{\check{c}y}$	síla působící v ose y na čep 2
F_l	síla působící na ložisko na čepu 2
F_m	požadovaná přitlačná síla
F_p	síla pružiny
F_{p_1}	síla předpětí pružiny
F_r	reakční síla
F_x	síly v ose x
F_y	síly v ose y
k	tuhost pružiny
k_1	bezpečnost k meznímu stavu pružnosti
L	modifikovaná trvanlivost ložiska
L_{10}	trvanlivost ložiska
l	stlačení pružiny
M_e	moment k bodu E
$M_{\check{c}}$	moment k bodu Č
M_o	ohybový moment
p	vzdálenost předeprnutí pružiny
R_e	mez kluzu
W_o	redukovaný modul průřezu v ohybu
σ_{o1}	nominální ohybové napětí

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 2-1 Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu	15
Obrázek 2-2 Schéma šoupátkového ventilu.....	16
Obrázek 2-3 Těsnicí ventil	17
Obrázek 2-4 Klínový ventil.....	18
Obrázek 2-5 Kyvadlový ventil.....	18
Obrázek 2-6 Jednočinný pneumatický válec	19
Obrázek 4-1 Schéma pohybu koncepčního návrhu 1	22
Obrázek 4-2 Schéma pohybu koncepční návrhu 2.....	23
Obrázek 4-3 Schéma pohybu koncepčního návrhu 3	23
Obrázek 5-1 Řez ventilem.....	26
Obrázek 5-2 Řez ventilem, počáteční poloha.....	26
Obrázek 5-3 Schéma ventilu, O-kroužek v pozici pod kapilárou	27
Obrázek 5-4 Pohyb přitisknutí O-Kroužku.....	27
Obrázek 5-5 Silový rozbor hřídel 1	28
Obrázek 5-6 Silový rozbor na hřídeli 2	29
Obrázek 5-7 Pneumatický aktuátor SMC CUK20-15T	32

11 SEZNAM PŘÍLOH

Výkresy:

Ventil-Ventil-Sestava

Ventil-01- Hřídel-1-Výkres součásti

Ventil-02- Hřídel-2-Výkres součásti

Ventil-03- Čep -2- Výkres součásti

Ventil-04- Čep -1- Výkres součásti

Ventil-05- Distanční Kroužek- Výkres součásti

Ventil-06- Příruba- Výkres součásti

Ventil-07- Držák- Výkres součásti