

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Radek Caesar



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH MANIPULÁTORU PRO ULTRAVAKUOVÝ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP

DESIGN OF MANIPULATOR FOR ULTRAHIGH ELECTRON MICROSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Caesar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bábor, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav fyzikálního inženýrství
Student:	Radek Caesar
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce:	Ing. Petr Bábor, 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:

Návrh manipulátoru pro ultravakuový elektronový mikroskop

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době firma Tescan ve spolupráci s Ústavem fyzikálního inženýrství vyvíjí ultravakuový rastrovací elektronový mikroskop (UHV SEM). Byla navržena UHV komora, do které byl úspěšně instalován elektronový tubus, který byl adaptován pro UHV. Toto zařízení musí umožňovat tvorbu a charakterizaci nanostruktur. Při tvorbě nanostruktur je často nutné provést přípravu vzorku v tzv. přípravné komoře a pak vzorek přesunout do analytické komory. V současné době v přípravné komoře schází manipulátor, který by umožnil přípravu vzorků. Cílem bakalářské práce bude tento manipulátor navrhnout.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedte rešeršní studii přípravy vzorků a metod použitých ve vyvíjeném mikroskopu.
2. Provedte návrh manipulátoru pro přípravnou komoru.
3. Podílejte se na oživování prototypu UHV SEM mikroskopu.

Seznam doporučené literatury:

CUI, Z., Nanofabrication, Principles, Capabilities and Limits, Springer, 2008.

REIMER, L., Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis, Springer, 1998.

O'HANLON, J., F., A., Users's Guide to Vacuum Technology, Wiley-Interscience, 2003.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh konstrukce manipulátoru pro ultravakuový elektronový mikroskop (UHV SEM), který je v současné době vyvíjen firmou TESCOAN ve spolupráci s Ústavem fyzikálního inženýrství FSI VUT. Tento manipulátor má umožnit manipulaci se vzorky v tzv. přípravné komoře, do níž se vzorky vpravují před jejich umístěním do analytické komory. V přípravné komoře probíhají povrchové a jiné úpravy vzorku.

V teoretické části jsou popsány některé technologie, užívané v oblasti vakuové techniky, především různé principy měření tlaku a čerpání vzduchu. Dále je práce zaměřena na stručný popis vyvíjeného UHV SEM a metod přípravy vzorků.

Praktická část se zabývá samotným návrhem a popisem konstrukce manipulátoru.

Klíčová slova

ultravysoké vakuum, UHV SEM, depozice, preparační komora, efuzní cela, manipulátor, zásobník paletok

Abstract

The main purpose of this thesis is mechanical design of a manipulator for an ultra-high vacuum scanning electron microscope (UHV SEM), being currently developed by TESCOAN ORSAY HOLDING a.s. in cooperation with the Institute of physical engineering FME BUT. The manipulator is supposed to be able to handle with specimens in so-called preparation chamber, which the specimens are put in before placing into the analytic chamber. In the preparation chamber the surface finishing and also other operations are made.

In the theoretical part some of the technologies used in vacuum engineering, especially various principles of pressure measurement and gas pumping, are described. Besides, the thesis is focused on a brief description of UHV SEM being developed and the methods of specimen preparation.

The practical part deals with the concept and the mechanical design of manipulator itself.

Key words

ultra-high vacuum, UHV SEM, deposition, preparation chamber, effusion cell, manipulator, sample reciever

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Bábora, Ph.D., s využitím uvedené literatury.

V Brně dne 20. 4. 2018

.....

Radek Caesar

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Petru Báborovi, Ph.D. za pomoc, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Obsah

Úvod	2
1 Základy vakuové techniky	3
1.1 Vakuum	3
1.2 Využití vakua v praxi	3
1.3 Měření vakua	4
1.4 Výroba vakua	7
2 Elektronová mikroskopie	10
2.1 Elektronový mikroskop	10
3 UHV SEM	12
3.1 Popis aparatury UHV SEM	12
3.2 Příprava vzorků	13
4 Návrh manipulátoru pro přípravnou komoru	16
4.1 Konstrukce manipulátoru	16
4.2 Postup montáže	21
Závěr	25
Použitá literatura	26
Seznam příloh	28

Úvod

Bakalářská práce nazvaná „Návrh manipulátoru pro ultravakuový elektronový mikroskop“ je součástí spolupráce ÚFI FSI VUT na vývoji ultravakuového rastrovacího elektronového mikroskopu (UHV SEM) brněnskou společností TESCANA ORSAY HOLDING a.s.

Účelem této práce je návrh, konstrukce a výkresová dokumentace manipulátoru pro přípravnou komoru UHV SEM, na základě které bude tento manipulátor vyroben a úspěšně nainstalován na stávající aparaturu.

Následující text pojednává o stručné charakteristice vakuových technologií a elektronové mikroskopie. Je zaměřen na popis vakua a jeho využití, dále vysvětluje některé principy měření (tlaku) vakua využívané různými typy vakuových měrek a principy získávání vakua několika odlišnými druhy vývěv. Je zde také nastíněn princip funkce rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM), popis základních součástí vyvíjeného mikroskopu a metod užívaných k přípravě vzorků v tomto zařízení.

Druhá (praktická) část je zaměřena na samotný návrh manipulátoru, jeho vývoj, konstrukci jednotlivých součástí a jejich význam, postup montáže těchto součástí a instalace sestaveného celku na preparační komoru.

Účelem navrhovaného mechanismu je možnost manipulace se vzorky v přípravné komoře. V této komoře probíhá úprava vzorků pomocí iontového naprašování deponovaného materiálu, zahříváním vzorků nebo zkoumání jejich elektrických vlastností, atd.

Součástí bakalářské práce je příloha obsahující výrobní dokumentaci manipulátoru.

1 Základy vakuové techniky

1.1 Vakuum

Slovo „vakuum“ pochází z latinského výrazu *vacuus* – *prázdný*. Na rozdíl od této definice vakua – prázdný prostor bez přítomnosti jakýchkoliv částic – v technické praxi se tímto pojmem rozumí každý prostor, v němž je tlak výrazně nižší než tlak atmosférický (1 atm = 101 325 Pa).

Podle velikosti tlaku se technické vakuum dělí do několika následujících stupňů:

Tabulka 1.1 – Dělení technického vakua. Převzato a upraveno z [1].

Kvalita vakua	Kvalita vakua (anglicky)	Tlak (Pa)	Tlak (atm)
Hrubé vakuum	Low vacuum	$1 \times 10^5 \div 3 \times 10^3$	$1 \times 10^0 \div 3 \times 10^{-2}$
Jemné vakuum	Medium vacuum	$3 \times 10^3 \div 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-2} \div 1 \times 10^{-6}$
Vysoké vakuum	High vacuum	$1 \times 10^{-1} \div 1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-6} \div 1 \times 10^{-12}$
Ultravysoké vakuum	Ultra high vacuum	$1 \times 10^{-7} \div 1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-12} \div 1 \times 10^{-15}$
Extremně vysoké vakuum	Extremely high vacuum	$< 1 \times 10^{-10}$	$< 1 \times 10^{-15}$

Kromě výše zmíněných jednotek tlaku se v praxi používá několik dalších, např. *bar* (1 bar = 10^5 Pa), *Torr* (1 Torr = 1 mmHg \cong 133,32 Pa) nebo *kp/m²* (1 kp/m² \cong 9,81 Pa).

1.2 Využití vakua v praxi

Vakuum v současné době nachází uplatnění v mnoha odlišných oborech a jeho použití se neustále rozšiřuje. S nízkým tlakem je spojeno několik různých jevů, jež umožňují splnit požadavky daného oboru.

Snížení tlaku je vzhledem ke zmenšení množství částic v evakuovaném prostoru doprovázeno zvýšením střední volné dráhy částic. Využití této skutečnosti lze najít v každodenním životě – např. v televizorech, CRT monitorech nebo zářivkách –, dále především v elektronových mikroskopech a urychlovačích částic, při elektronovém sváření, v technologii povlakování, výrobě tenkých vrstev, atd.

Snížení hustoty počtu částic souvisí kromě výše zmíněného také s odstraněním nežádoucích částic, což je nezbytné při výrobě žárovek, výrobě a balení potravin, v technologii slinování a práškové metalurgii a obecně všude, kde je třeba zabránit nežádoucím chemickým reakcím se vzduchovými částicemi.

Dalším jevem, který nastává při snížení hustoty plynu, je výrazné snížení jeho tepelné a elektrické vodivosti. I s využitím tohoto jevu se lze setkat v každodenním životě. Jako tepelný izolant je vakuum používáno např. v termoskách, ale v současnosti také stále více ve stavebnictví.

Vakuum má rovněž vliv na objekty nacházející se v evakuovaném prostoru. V látkách umístěných v prostředí s nízkým tlakem například dochází k uvolnění uzavřeného nebo rozpuštěného plynu. Kromě toho, s klesajícím tlakem okolního prostředí klesá také teplota tání a varu. Těchto poznatků je využíváno při vakuové destilaci, dehydrataci nebo sušení mrazem (lyofilizace).

Vakuum nachází uplatnění také v těch aplikacích, které vyžadují proudění vzduchu vlivem rozdílu tlaků (např. vysavače), a v neposlední řadě v simulacích vesmírného prostředí a kosmonautice.

1.3 Měření vakua

Metody měření tlaku se liší podle stupně měřeného vakua. Obecně platí, že čím „vyšší“ vakuum (tedy čím nižší tlak), tím složitější, náročnější na výrobu a dražší jsou používané měřky (vakuometry) a jejich princip je rovněž sofistikovanější. Zároveň žádný typ měřky nedokáže měřit tlak na celém jeho rozsahu (tedy od atmosférického tlaku až po extrémně vysoké vakuum).

Vakuometry lze dělit podle principu měření tlaku – přímé měření a nepřímé měření. U přímého měření je měřena síla, kterou plyn působí na jednotkovou plochu, popřípadě jiná veličina, která závisí pouze na velikosti této síly a na parametrech měřky (např. změna rezistivity nebo kapacity způsobená působící silou). Měřky využívající přímé měření se nazývají absolutní, neboť nezáleží na typu plynu, jehož tlak se měří [2].

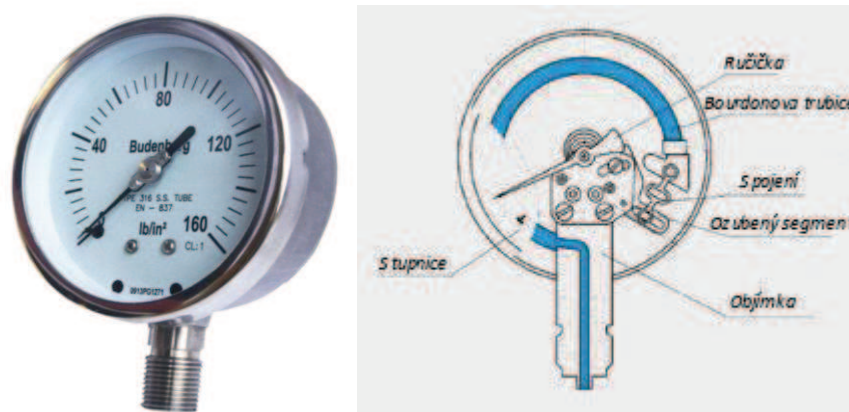
Při nepřímém měření se měří nějaká vlastnost plynu, např. tepelná vodivost, viskozita aj. a z těchto změřených vlastností lze určit tlak. Na rozdíl od absolutních vakuometrů, u těchto měrek se při určení tlaku musí brát v úvahu typ plynu (různé plyny mají při stejném tlaku různou vodivost, viskozitu...) [2].

Přímé měření

Absolutní vakuometry

Mezi nejpoužívanější mechanické absolutní měřky patří pístový tlakoměr, využívající sílu plynu působící na pohyblivý píst; kapalinový tlakoměr (U-manometry), v nichž jako píst slouží vodní sloupec; dále membránová měřka, založená na průhybu tenké pružné membrány působením tlaku, a Bourdonův manometr (rozsah cca $10^5 \div 10^2$ Pa [3]).

Schéma Bourdonova manometru je na obrázku 1.1. Při průchodu vzduchu Bourdonovou trubicí má zakřivená trubice tendenci narovnat se. Síla narovnávací se trubice se přes několik převodů přenáší na rotační pohyb ručičky, která ukazuje hodnotu tlaku.



Obr. 1.1 – Bourdonova měrka a její schéma. Převzato z [4], [5].

Kromě mechanických absolutních měrek existují například piezo-rezistivní snímač tlaku a kapacitní membránová měrka. Součástí piezo-rezistivního snímače je destička z dopovaného monokrystalického křemíku, jejíž odpor se mění v závislosti na jejím mechanickém zatížení způsobeném tlakem. Princip kapacitní měrky (rozsah cca $10^5 \div 10^1$ Pa) je založen na změně kapacity mezi kovovou membránou a elektrodou vlivem prohnutí membrány. Při průhybu membrány způsobeném tlakem nebo podtlakem se změní vzdálenost mezi membránou a elektrodou a tím i kapacita, která je přímo měřena [2].

Výše zmíněné měrky slouží k měření především jemného a hrubého vakua.

Nepřímé měření

Tepelné vakuometry

Tepelné vakuometry jsou založeny na měření tepelné vodivosti evakuovaného prostoru. Obvykle obsahují žhavené vlákno, které je tepelným vedením plynu ochlazováno. Ochlazení vlákna je spojeno s poklesem jeho odporu, což je veličina, která lze již snadno přímo změřit. S klesajícím tlakem klesá tepelná vodivost plynu, a tedy pokles odporu vlákna je nižší než při vysokých tlacích.

Nejpoužívanější měrky tohoto typu jsou Piraniho měrka a termočláňková měrka (rozsah cca $10^2 \div 10^{-1}$ Pa) [2], [3].



Obr. 1.2 – Piraniho měrka. Převzato z [6].

Viskózní vakuometry

Za nízkého tlaku je velikost tření neboli viskozity plynu úměrná tlaku. Toho je využíváno ve viskózních vakuometrech. V těchto je obvykle rotující nebo kývající se těleso, které je působením třecí síly brzděno. Nepřímé měření tlaku probíhá například měřením doby, za kterou se těleso zastaví, nebo měřením výkonu, který je potřebný k udržení konstantních otáček [2].

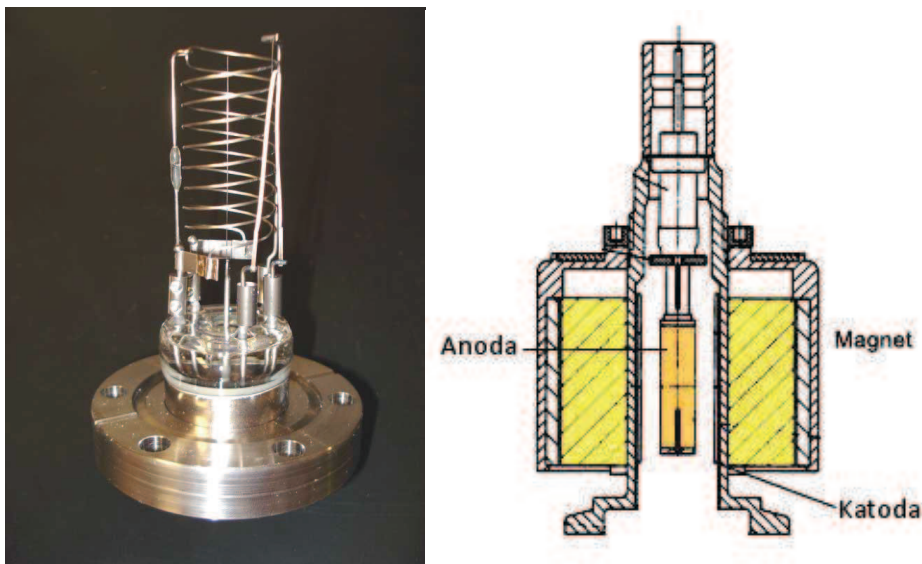
Ionizační vakuometry

Pro měření vysokého a ultravysokého vakua je potřeba ionizačních vakuometrů. Jejich princip je založen na ionizaci plynu a následném měření procházejícího proudu při výboji. Počet vzniklých iontů je úměrný koncentraci částic a tedy i tlaku. Ionizaci bývá nejčastěji dosaženo srážkami částic s elektrony emitovanými katodou. Ionizační měrky lze rozdělit do dvou skupin – měrky se žhavenou katodou a měrky se studenou katodou.

V Penningově měrce (rozsah cca $10^0 \div 10^{-7}$ Pa), která je příkladem měrky se studenou katodou, je dráha elektronu prodloužena magnetickým polem (které zakřivuje dráhu elektronů a ty se pohybují po spirále), což má za následek zvýšení pravděpodobnosti ionizace a funkčnost měrky i při nižších tlacích, kdy je střední volná dráha elektronu větší než rozměry měrky [2], [3].

Pro dosažení vyšší ionizace (nezbytné pro výboj) při nižších tlacích se používají měrky se žhavenou katodou, mezi nejpoužívanější patří např. Bayardova-Alpertova měrka s rozsahem přibližně $10^{-1} \div 10^{-9}$ Pa [3].

Ještě další snížení dolní hranice a měření extrémně vysokého vakua (10^{-11} Pa) umožňuje extraktorový ionizační vakuoměr [3].



Obr. 1.3 – Bayardova-Alpertova měrka (vlevo); Schéma Penningovy měrky (vpravo). Převzato a upraveno z [7], [8].

1.4 Výroba vakua

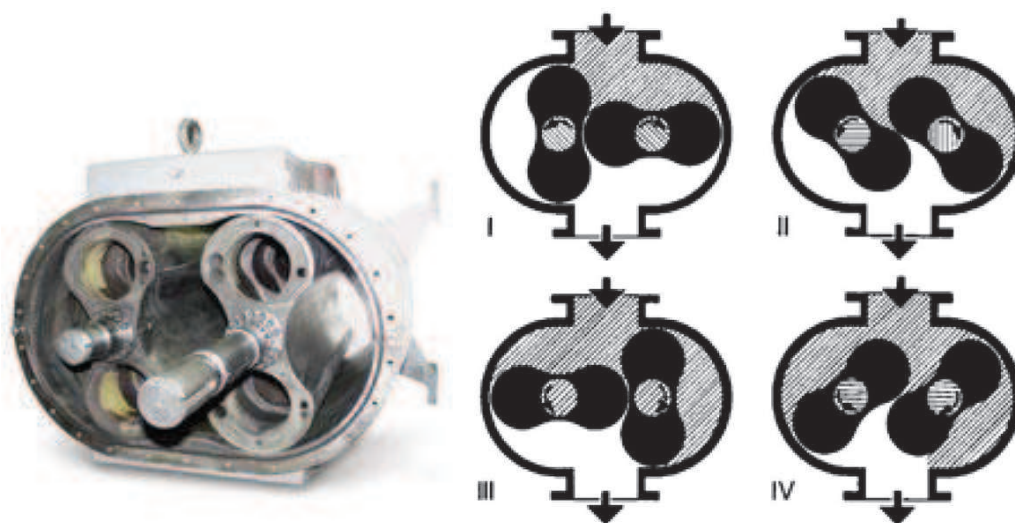
Vakuové aparatury se čerpají pomocí vývěv. Stejně jako u vakuových měrek, i vývěv existuje celé spektrum a pro různé stupně vakua se používají různé principy čerpání. Podle používaného principu lze dělit vývěvy na mechanické, difuzní, sorpční (tzv. gettery) nebo kondenzační.

Mechanické vývěvy

Většina mechanických vývěv je schopna vytvořit hrubé až jemné vakuum a slouží tedy jako tzv. předčerpávací vývěvy, které se zařazují před vývěvy s nižším rozsahem tlaků.

Rootsovo čerpadlo

Princip Rootsova čerpadla je na obrázku 1.4.



Obr. 1.4 – Rootsovo čerpadlo a schéma jeho cyklu. Převzato z [9], [10].

Základem Rootsova čerpadla jsou dva protiběžné rotory ve tvaru číslice 8. Hlavní výhodou je, že vzhledem k synchronnímu a bezdotykovému chodu rotorů nepotřebuje mazání a dosahuje vysoké čerpací rychlosti. Nevýhodou je zahřívání a s tím spojená možnost poškození, dále také možnost zadření při pumpování média obsahujícího nečistoty.

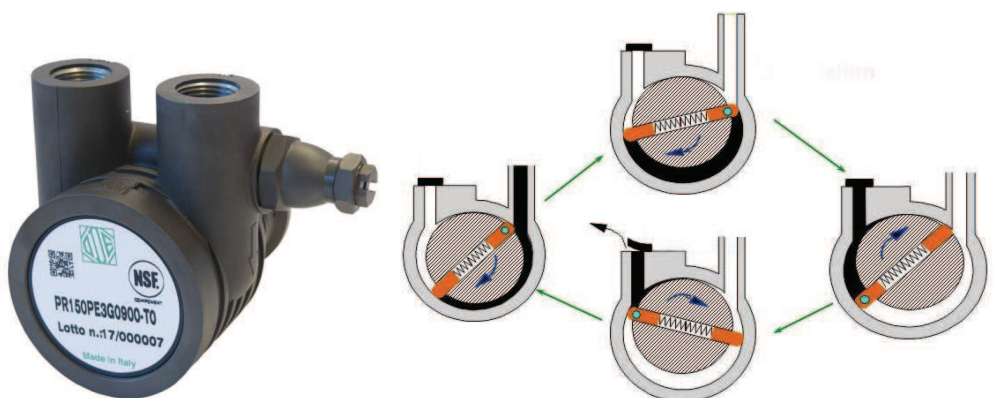
Rotační olejová vývěva

Další významnou mechanickou vývěvou je rotační olejová vývěva, jejíž schéma a cyklus je znázorněn na obrázku 1.5. Tento typ vývěv používá olej jako mazání, těsnění a zároveň chlazení.

Turbomolekulární vývěva

Narozdí od předchozích typů mechanických vývěv, turbomolekulární vývěva je založena na odlišném principu a umožňuje čerpat do výrazně nižších tlaků (až 10^{-8} Pa). Princip je založen na

předání hybnosti jednotlivým molekulám rychle rotujícími disky s lopatkami (řádově 10^4 rpm). Výhodou těchto vývěv je rovněž vysoký kompresní poměr [3], [11].



Obr. 1.5 – Rotační olejová vývěva a její schéma. Převzato a upraveno z [12], [13].

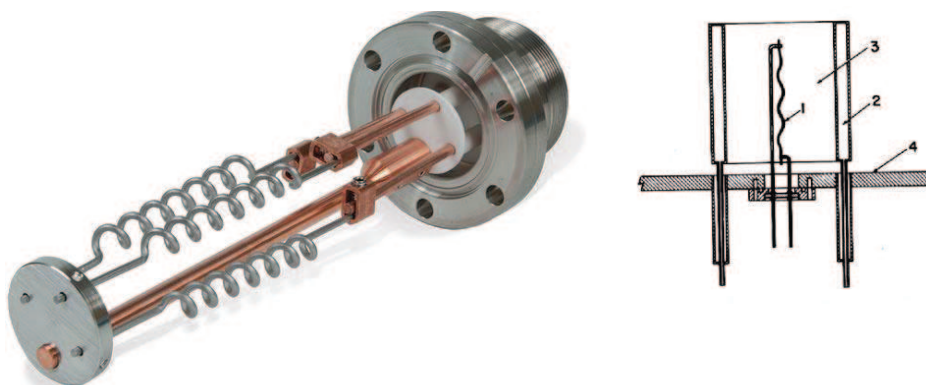


Obr. 1.6 – Turbomolekulární vývěva. Převzato z [14].

Sorpční vývěvy

Sorpční vývěvy na rozdíl od předchozích typů netransportují molekuly ven z čerpané komory, ale sorpcí (adsorpce, absorpce) je zachycují do sebe.

Titanová sublimační vývěva



Obr. 1.7 – Titanová sublimační vývěva a její schéma. Převzato a upraveno z [15], [3].

Princip titanové sublimační vývěvy (zkráceně TSP) je následující. Vlákno (na obrázku značeno č. 1), většinou tvořené z 85 % titanem, je zahříváno protékajícím proudem, až dojde k sublimaci titanu. Vypařený titan se usazuje na povrchu, který je součástí vývěvy a je přístupný molekulám vzduchu. Vytvořená tenká vrstva titanu (3) dokáže absorbovat tyto molekuly a tím tedy snižovat tlak. Některé plyny však tato vrstva nedokáže dostatečně absorbovat, což je jednou z hlavních nevýhod [16].

Iontová vývěva

Iontové vývěvy využívají pro zachycení molekul jejich ionizaci, která se uskutečňuje srážkami elektronů (jejich dráha se zakřivuje a tedy i prodlužuje magnetickým polem) s neutrálními částicemi. Záporně nabitě, resp. kladně nabitě částice jsou urychlovány k anodě, resp. katodě, kde difundují do jejího objemu. (Jiné částice např. chemicky reagují s vrstvou titanu, nebo se ve výboji rozkládají na jednodušší částice, nebo jsou na povrchu elektrod překrývány vrstvami titanu.) Iontové vývěvy obvykle umožňují vytvořit vakuum řádově 10^{-11} Pa [3].



Obr. 1.8 – Iontová vývěva. Převzato z [17].

Kryosorpční vývěva

Tento typ vývěv je založen na kondenzaci molekul plynu při kontaktu s chladným povrchem, nejčastěji ochlazeným kapalným dusíkem, a jejich následné adsorpci na tomto povrchu. Povrch je většinou tvořen materiály s velmi vysokou schopností sorpce – zeolit, aktivní uhlí. Rozsah tlaků je podobný jako u iontových vývěv [18].

2 Elektronová mikroskopie

2.1 Elektronový mikroskop

Elektronový mikroskop je analogií klasického světelného mikroskopu s hlavním rozdílem, že místo světelných fotonů je využito elektronů a klasická optická soustava je nahrazena elektromagnetickými čočkami. Hlavní výhodou oproti světelnému mikroskopu je mnohem vyšší rozlišovací schopnost, díky které lze dosáhnout až 1000krát vyššího zvětšení [19].

Rozlišovací schopnost je nepřímo úměrná vlnové délce (de Broglieho vlnové délce) použité částice. Platí:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (2.1)$$

kde h je Planckova konstanta, m značí relativistickou hmotnost a v rychlost částice. Z uvedeného vztahu je tedy zřejmé, že de Broglieho vlnová délka elektronu, jakožto hmotnější částice, je menší než vlnová délka jakéhokoliv světla a tím pádem rozlišovací schopnost při použití elektronu je větší než při použití světla.

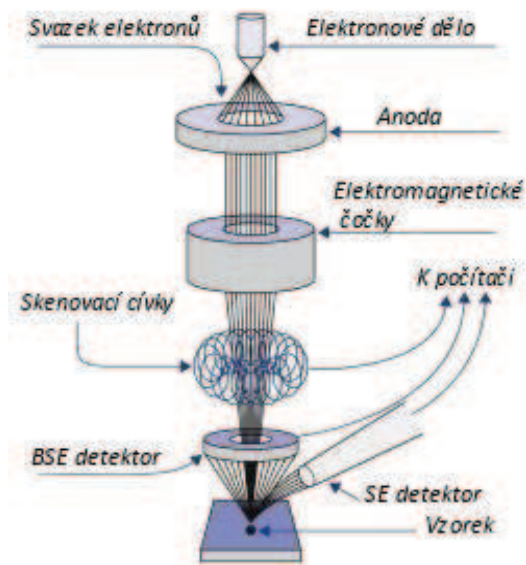
Elektronové mikroskopy lze obvykle rozdělit na dva druhy – transmisní elektronový mikroskop a rastrovací (skenovací) elektronový mikroskop.

Transmisní elektronový mikroskop (TEM)

V TEM elektrony procházejí pozorovaným vzorkem, při čemž se jejich trajektorie odchylují od původního směru. Systémem clon jsou vybrány pouze elektrony, které se neodchýlí nebo se odchýlí zanedbatelně, a tyto následně dopadají na stínítko, na němž vzniká výsledný obraz. Z uvedeného principu plynou dvě skutečnosti, které je třeba brát v úvahu při konstrukci TEM a jeho použití. Aby elektrony prošly preparátem, je nezbytné vysoké urychlovací napětí (řádově 10^2 kV) a zároveň je nutné užívat velmi tenké vzorky (o tloušťce několika desítek až stovek nm). TEM nachází obvykle uplatnění při zkoumání vnitřní struktury pozorovaného preparátu [19], [20].

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM)

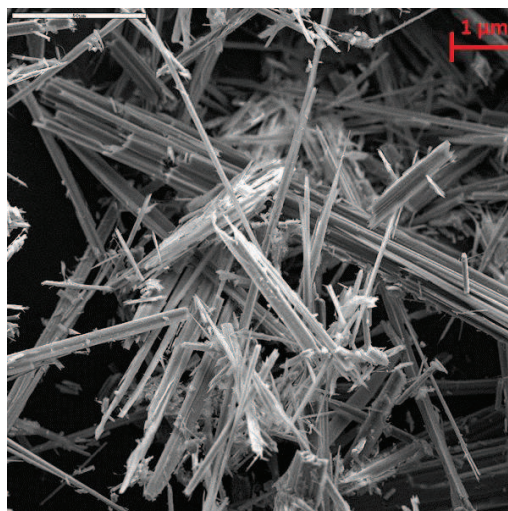
SEM je založen na detekci sekundárních elektronů, které jsou vyráženy z povrchu vzorku po dopadu urychlených elektronů. Výsledným obrazem je tedy povrchová struktura vzorku. Název rastrovací je odvozen od způsobu, jakým elektrony dopadají na vzorek. Úzký elektronový svazek vycházející z elektronové trysky jej postupně prochází (rastruje) po jednotlivých řádcích. Jak se při tomto rastrování mění povrch, mění se i výstupní signál. Výhodou oproti TEM je, že tloušťka preparátu není omezena a elektrony jsou urychlovány nižším napětím (řádově kV). Zjednodušené schéma rastrovacího elektronového mikroskopu je na obrázku 2.1 [20].



Obr. 2.1 – Schéma SEM. Převzato a upraveno z [21].

Zdrojem elektronů je elektronové dělo, které je tvořeno katodou – obvykle žhavené wolframové vlákno. Elektrony, které díky termoemisi opustí katodu, jsou urychlovány (typicky 0,1 ÷ 30 kV) směrem k Anodě. Po průchodu anodou je svazek modifikován, fokusován systémem elektromagnetických čoček a následně dopadá na povrch vzorku, z něhož vyráží sekundární elektrony. Rastrování je uskutečněno vychylovacími skenovacími cívkami. Sekundární elektrony, odražené elektrony, vzniklé rentgenové záření a další zdroje signálu jsou zachyceny detektorem sekundárních elektronů a detektorem zpětně odražených elektronů (SE detektor a BSE detektor) a následně řadou procesů převedeny v elektrický signál, který je vyhodnocen počítačem a převeden na výsledný obraz [22].

SEM nemusí sloužit pouze k povrchovému zkoumání vzorků. Vyšším urychlovacím napětím lze dosáhnout proniknutí elektronů hlouběji do vzorku a získat tak informaci o jeho podpovrchové struktuře.

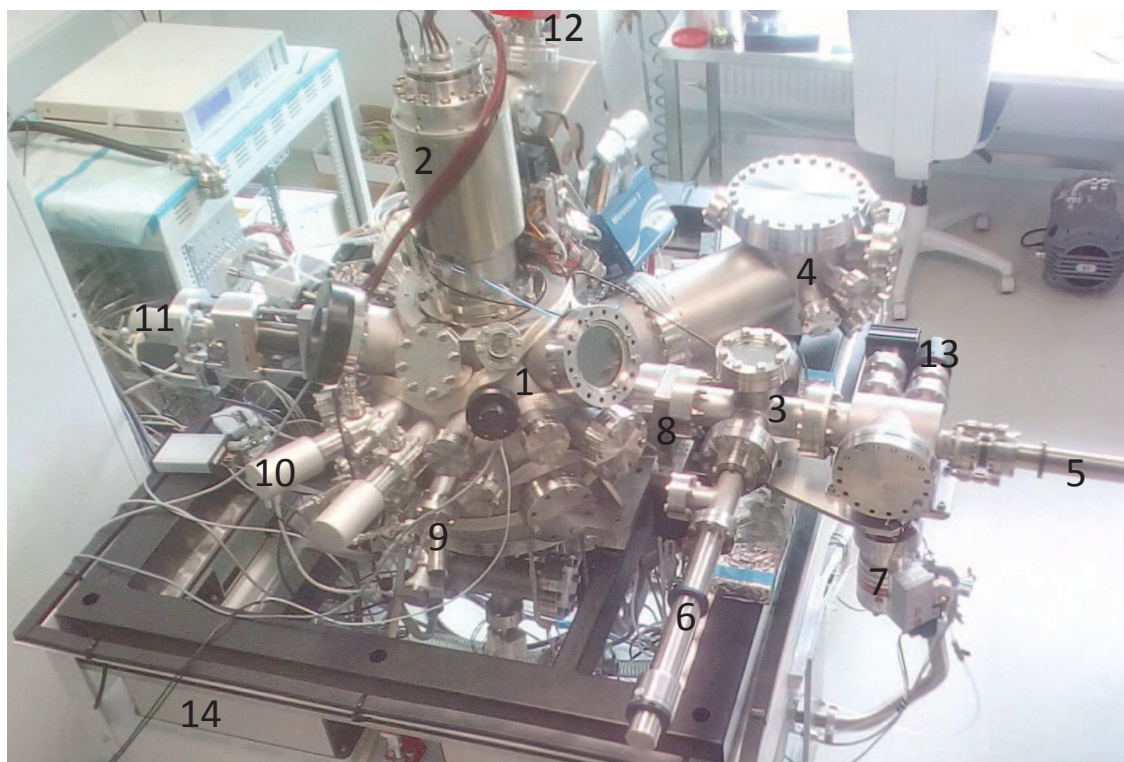


Obr. 2.2 – Vlákna azbestu zobrazená pomocí SEM. Převzato a upraveno z [23].

3 UHV SEM

Jedním z prototypů, které v současnosti vyvíjí brněnská firma TESCAN ve spolupráci s Ústavem fyzikálního inženýrství VUT, je ultravakuový rastrovací elektronový mikroskop (anglicky *ultra-high vacuum scanning electron microscope – UHV SEM*). Tento mikroskop má umožňovat úpravu vzorků, tvorbu nanostruktur a jejich následnou analýzu. Pro zajištění co možná nejdokonalejší čistoty, aby nedošlo k poškození, kontaminaci nebo nežádoucím reakcím vzorků, a zároveň dosažení dostatečně velké střední volné dráhy elektronového svazku (nebo částic z efuzních cel) je komora rastrovacího elektronového mikroskopu evakuována na stupeň UHV – ultravysoké vakuum. Stávající stav vyvíjeného UHV SEM je na obrázku 3.1.

Po návrhu ultravakuové komory, instalaci elektronového tubusu, vývěv, vakuometrů, RGA, efuzní cely, preparační komory a mnoha dalších nezbytných součástí (viz obr. 3.1) je jedním z dalších úkolů navrhnout a následně vyrobit manipulátor, jenž bude namontován na přípravnou (preparační) komoru (4) a bude umožňovat manipulaci se vzorky, potřebnou k jejich přípravě. Návrh tohoto manipulátoru je hlavním úkolem této bakalářské práce.



Obr. 3.1 – UHV SEM ve vývoji. Převzato a upraveno z [24].

3.1 Popis aparatury UHV SEM

Základní součásti vyvíjeného mikroskopu jsou vyznačeny čísly na obrázku 3.1. Na analytické komoře polokulového tvaru (1) je shora namontován elektronový tubus (2), jehož součástí je mimo jiné elektronová tryska a fokusační elektromagnety. Ze stran jsou na analytickou komoru připojeny dvě další komory – základací komora (3), do níž se z vnějšího prostředí vkládají vzorky, a preparační komora (4), ve které bude probíhat manipulace se vzorky a tvorba

nanostruktur depozicí z efuzní cely. (Efuzní cela je zdroj atomárního svazku deponovaného materiálu.) K přesunu vzorků slouží magnetické tyče. K zakládací komoře je namontována zakládací tyč (5), která slouží k přemístění vzorku ze zakládací komory do komory analytické, dále tyč se zásobníkem na vzorky (6) a turbomolekulární vývěva (7). Od analytické komory je tato komora oddělena ultravakuovým ventilem (8). (Zakládací tyč bude společně s navrhnutým manipulátorem namontována také na preparační komoru.) Dále je na analytickou komoru nainstalována efuzní cela (9), detektory SE (10) a BSE (11), titanová sublimační vývěva, iontová vývěva (12), Penningova měřka (13) a řada dalších příslušenství, především velké množství elektroniky a kabeláže. Nosný stůl celé aparatury je opatřen piezoelektrickými tlumiči vibrací (14).

Jednotlivé součásti jsou propojeny přírubami CF. Pro dosažení vysoké kvality vakua je hlavním používaným materiálem nízkouhlíková nerezová ocel. Dalšími používanými materiály jsou například bimetal, měď (těsnění) nebo keramika (izolace) atd. Materiál je třeba volit tak, aby byl odolný vysokým teplotám při tzv. vypékání, kdy je celá aparatura zahřáta na vysokou teplotu – obvykle 120°C. Vypékáním se zvýší desorpce nežádoucích plynů, což umožňuje dosažení kvalitnějšího vakua. Důležité je rovněž každou součást před instalací do UHV komory důkladně očistit.



Obr. 3.2 – Příruba CF. Převzato z [25].

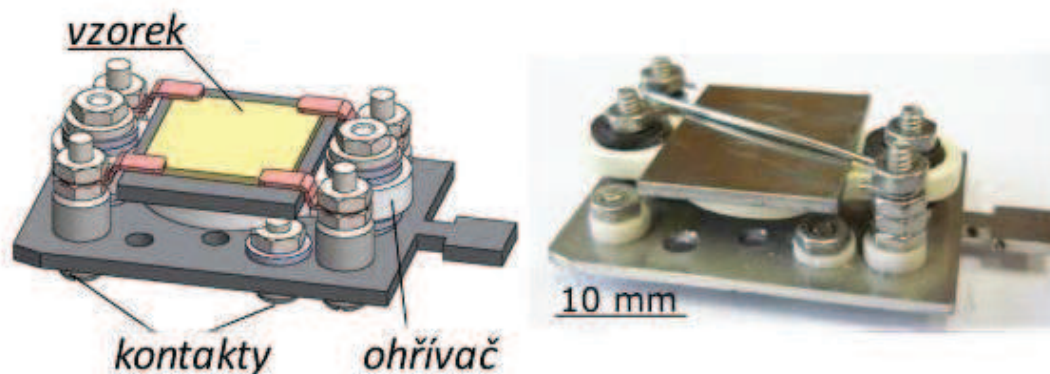
3.2 Příprava vzorků

Vzorky v UHV SEM jsou umísťovány na speciální paletky, jejichž součástí mohou být nosič vzorku, elektrické kontakty, odporový ohříváč, a jiná příslušenství.

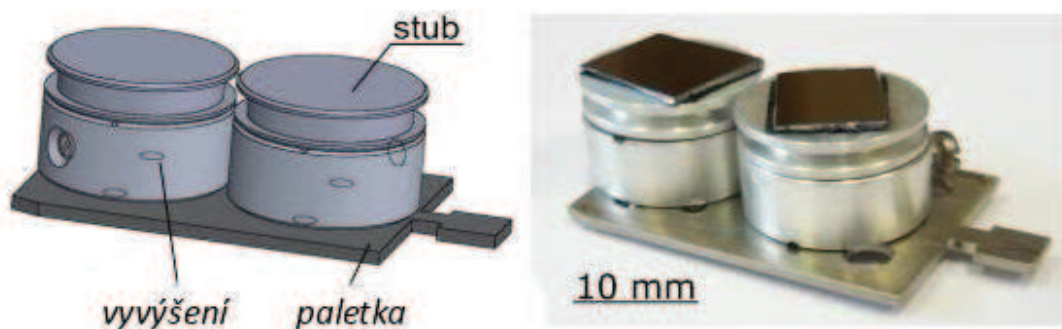
Paletky se před přípravou nebo úpravou vzorků vkládají do zásobníku paletek. Zásobník paletek je většinou vybaven elektrickými kontakty, kterými jsou napájeny spotřebiče na paletce – např. odporový ohříváč (obvykle tenký plíšek, zahřívající se při průchodu el. proudu) nebo termočlánek, který měří teplotu vzorku.

Ochlazování vzorků bývá u některých zásobníků uskutečňováno měděnými spleťmi spojenými s výměníkem s kapalným dusíkem nebo heliem.

Při ohřívání nebo ochlazování vzorků je třeba zajistit dostatečnou izolaci paletky a zásobníku od ostatních součástí vakuové aparatury [26].



Obr. 3.3 – Paletka s 8 kontakty, ohřivačem pro kombinované měření za nízkých a vysokých teplot (model a funkční paletka). Převzato z [26].

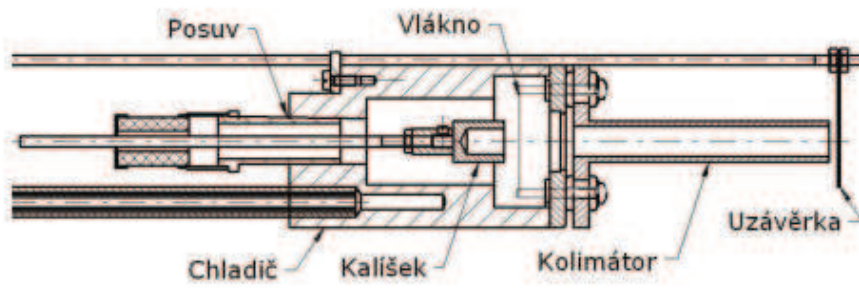


Obr. 3.4 – Paletka pro měření elektrických vlastností vzorku umístěného na stůbu. Převzato z [26].

Efuzní cela

Efuzní cela slouží k povrchové úpravě vzorků, tvorbě tenkých povrchů, nanostruktur atd. Její princip je založen na zahřívání deponovaného materiálu, který se odpařuje a následně kondenzuje na povrchu vzorku nebo substrátu a vytváří tak ultratenkou vrstvu. Proces, při němž plyn prochází otvorem, který je výrazně menší než střední volná dráha částic plynu, se nazývá efuzní tok – odtud název efuzní cela.

Efuzní cela použitá ve vyvíjeném UHV SEM byla navržena Bc. Ondřejem Křápkem. Její schéma je na obrázku 3.5. Molybdenový kalíšek je naplněn deponovaným materiálem a tvoří kladnou anodu. Z wolframového žhaveného vlákna (katody) vylétávají elektrony, které kalíšek bombardují, čímž se deponovaný materiál zahřívá a odpařuje kolimátorem ven z efuzní cely. Vše je připevněno k přírubě typu CF, v níž je několik průchodek (na posuv uzávěrky kolimátoru, elektrické průchodky, přívod vodního chlazení) – viz obr. 3.6 [27].



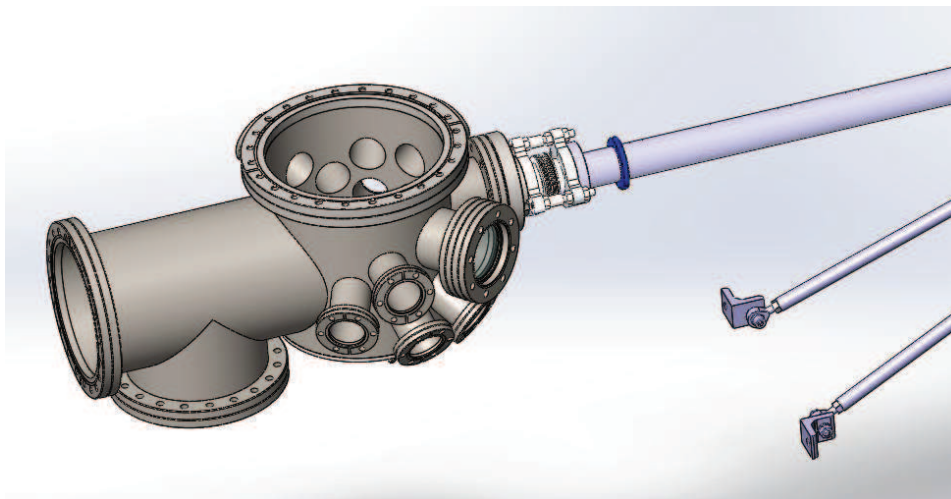
Obr. 3.5 – Schéma efuzní cely. Převzato z [27].



Obr. 3.6 – Efuzní cely. Převzato z [27].

4 Návrh manipulátoru pro přípravnou komoru

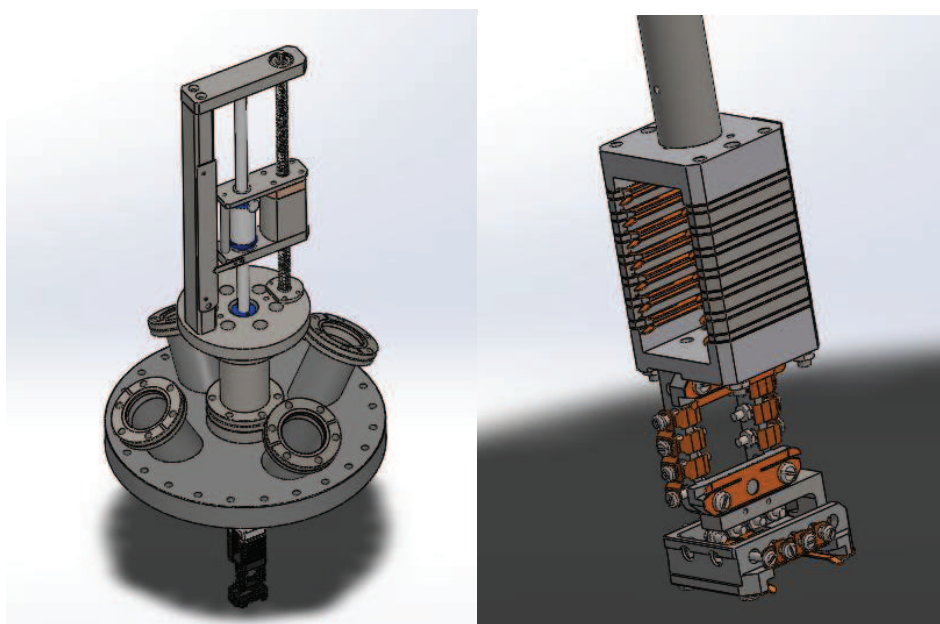
Manipulátor, který bude připevněn k vrchní přírubě preparační komory (viz obr. 4.1), má především umožňovat posun paletky se vzorky ve směru osy z (osa válcové přípravné komory) a jejich rotaci kolem této osy. Jednou z hlavních součástí manipulátoru je zásobník, který bude uvnitř přípravné komory a do něj se budou jedním z portů komory vkládat zakládací tyčí paletky se vzorky. Možnost rotace tohoto zásobníku a jeho axiálního posunu je nutná k vkládání a vyjímání paletek, případně k jejich umístění do takové polohy, v níž lze na vzorcích provádět potřebné úpravy.



Obr. 4.1 – Model preparační komory.

4.1 Konstrukce manipulátoru

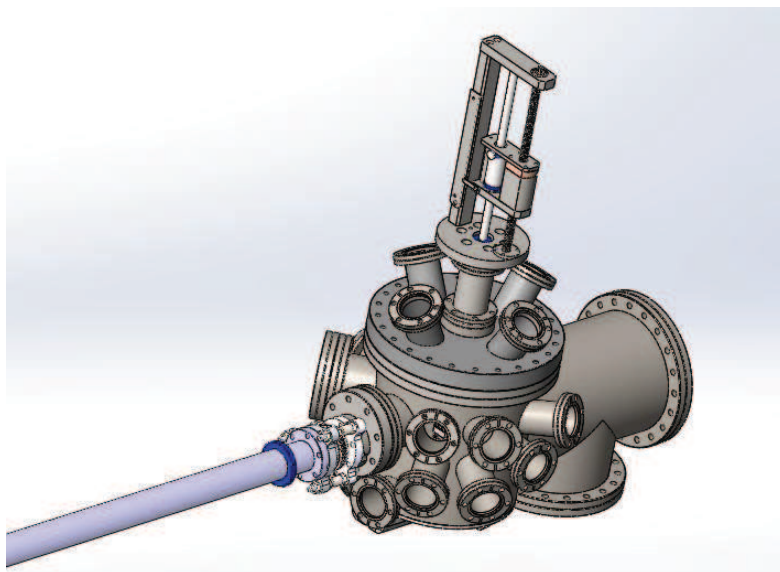
Model navrhnutého manipulátoru je na obrázku 4.2.



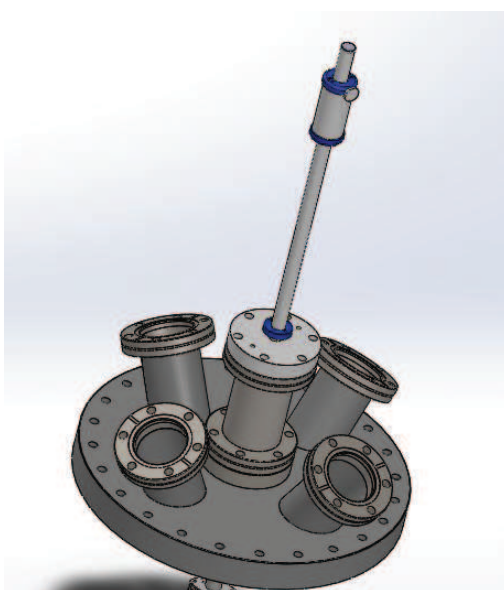
Obr. 4.2 – Model manipulátoru a detail na zásobník paletek.

Přichycení k preparační komoře

Manipulátor je k přípravné komoře přichycen přes redukcí z příruby DN 200 CF na DN 40 CF. K této redukci jsou přivařeny pod úhlem 30° vůči svislé ose další 4 porty s přírubami DN 40 CF, které v současné době nemají konkrétní využití. Na prostřední přírubu DN 40 CF je namontována magnetická tyč s Port Alignerem – vlnovcem, který slouží k naklonění magnetické tyče až o 5° vůči kolmé ose z. (Takovéto seřízení může být nutné, aby bylo možné bez problému vkládat a vyjímat vzorky ze zásobníku upevněného na mag. tyči.) Port Aligner může být nahrazen nástavcem, sestávajícím z trubky s přírubami na obou koncích (viz obr. 4.4). Magnetická tyč umožňuje lineární posun a rotaci menší tyče uvnitř ní, která se nachází uvnitř odzdušněného prostoru vakuové aparatury. K této vnitřní tyči je připevněn zásobník se vzorky. (Mag. tyč a Port Aligner jsou hotové výrobky, zakoupené od švýcarské firmy Ferrovac GmbH.)



Obr. 4.3 – Manipulátor na preparační komoře (model).



Obr. 4.4 – Uchycení mag. tyče (model).



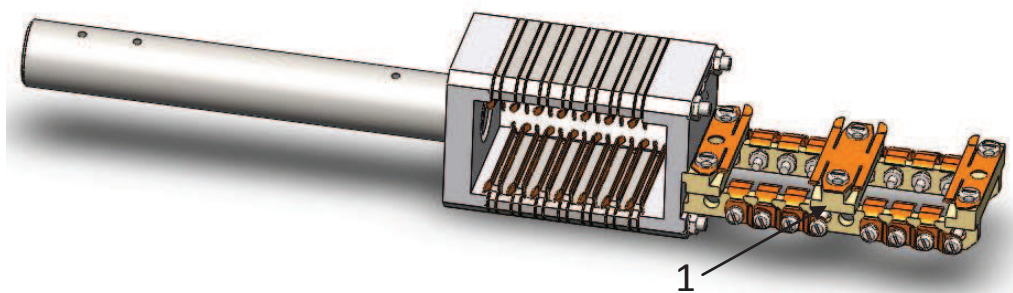
Obr. 4.5 – Port Aligner. Převzato z [28].

Zásobník na paletky

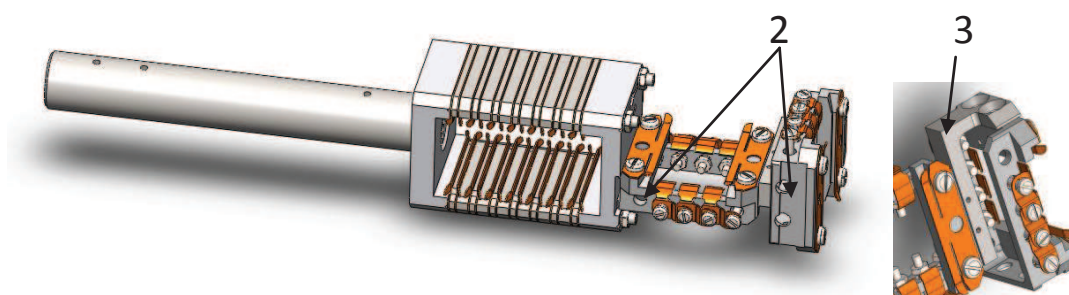
Při návrhu zásobníku byl použit model, který navrhnul v rámci své bakalářské práce Bc. Tomáš Axman. Na tomto zásobníku je celkem 9 pozic pro paletky. První dvě, vybavené elektrickými kontakty, jsou svislé. Zbýlých 7 je vodorovných. Detailněji je konstrukce zásobníku popsána v bakalářské práci ([26]) s názvem „Vývoj nosiče vzorků pro měření elektrických vlastností v UHV SEM“.

Tento model zásobníku byl pro účel manipulátoru pozměněn tak, aby první pozice (s elektrickými kontakty) byla vodorovná. Původní dvojkus (č. 1 na obr. 4.6, 4.7) byl upraven na 2 shodné díly (2), které jsou spojeny dílem ve tvaru L (3). Při návrhu součástí, které se budou nacházet ve vakuu, bylo třeba odvdušnit všechny vyvrtané díry, aby se tyto nestaly zdrojem nežádoucí vzduchové zátěže uvnitř aparatury. Rovněž bylo třeba navrhnout součásti tak, aby průmět zásobníku do roviny x-y ležel uvnitř kruhového průřezu o průměru 37 mm, což je vnitřní průměr těsnění příruby DN 40 CF, a bylo tak možné celý zásobník vkládat a vyjímat přes redukci z preparační komory.

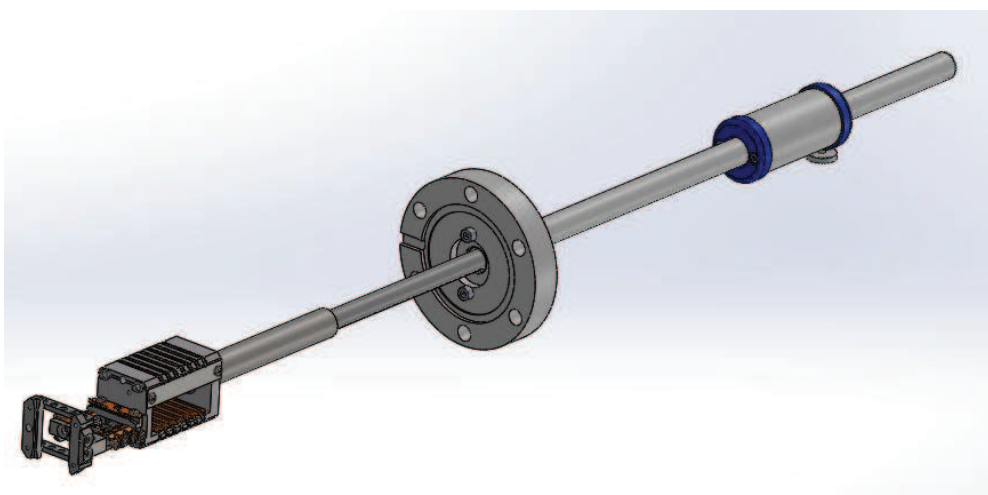
Zásobník je přišroubován k vnitřní části magnetické tyče šroubem M4. Do jednotlivých přihrádek se paletky zasouvají zakládací tyčí preparační komory (obr. 4.9). Zakládací tyč je kolmá na mag. tyč se zásobníkem (viz obr. 4.3).



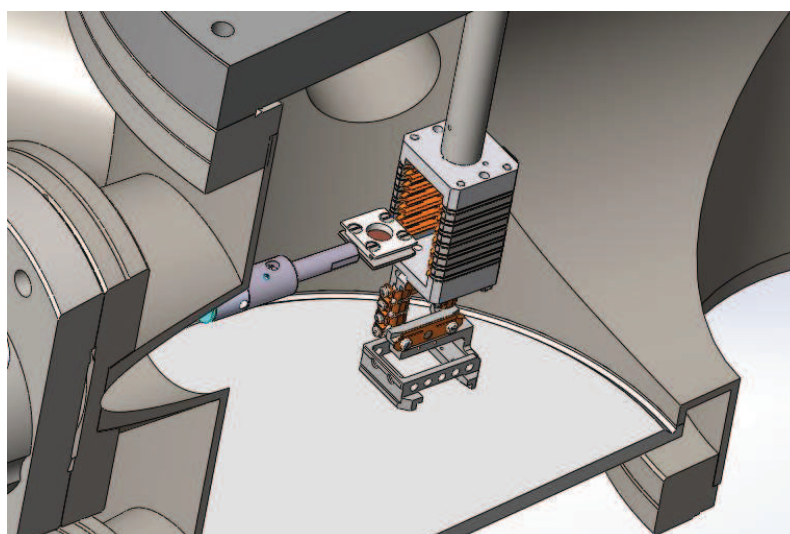
Obr. 4.6 – Model zásobníku Bc. Tomáše Axmana.



Obr. 4.7 – Model upraveného zásobníku pro manipulátor.



Obr. 4.8 – Magnetická tyč s našroubovaným zásobníkem paletek.

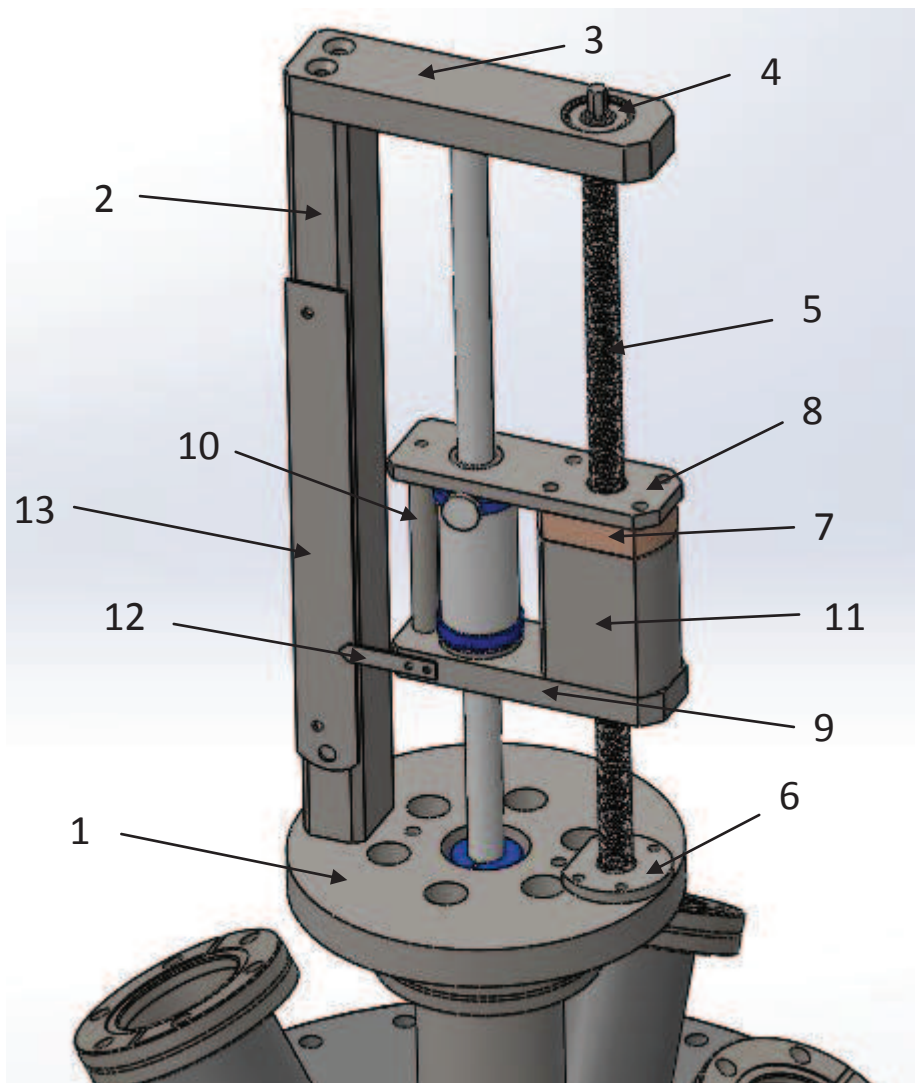


Obr. 4.9 – Vkládání paletky do zásobníku. (Pootáčením základací tyče a posouváním tyče manipulátoru lze nastavit různé pozice pro vkládání a vyjímání paletek. Mag. tyč manipulátoru také umožňuje rotaci, která kromě snadného zasunutí paletek také slouží k natočení vůči různým zařízením preparační komory.)

Posouvací mechanismus

Rotace zásobníku se provádí ručním otáčením posuvníku magnetické tyče. Pro nastavení axiální polohy zásobníku však bylo třeba navrhnout přesnější mechanismus, který převádí otáčivý pohyb šroubovice na lineární pohyb posuvníku. Dále bylo nutné manipulátor vybavit stupnicí, na které lze posunuté zásobníku odečítat.

Výsledný návrh je na obrázku 4.10.



Obr. 4.10 – Posuvný mechanismus.

Na přírubě magnetické tyče je dvěma šrouby M4 přišroubován kruhový podstavec (1), na který je dvěma M4 našroubována podpěra (2). Tato podpěra společně s další součástí (3) zajišťuje celkovou stabilitu mag. tyče a posuvného mechanismu. Ve dvou ložiskách 608 2RS (4), umístěných v součástech (1) a (3), je uložený pohybový trapézový šroub Tr10x2 (5), na němž je našroubována bronzová trapézová matice (7). Trapézový šroub je na vrchním konci zakončený inbusem HEX6. Na toto zakončení lze v budoucnu nasadit další součásti nebo nástroje (např. motor). Bronzová matice je spojena s posuvníkem magnetické tyče klecí, složené ze součástí (8), (9), (10) a (11). Na této kleci je našroubován ukazatel (12), který slouží k odečítání hodnot ze stupnice na nerezovém pravítku (13), přišroubovaném k podpěře (2). Pro posun zásobníku do první pozice (pro vkládání paletek do vodorovné přihrádky s el. kontakty) je třeba nastavit na stupnici 50 mm. Pro další pozice pak po řadě 77 mm; 100,5 mm; 104,8 mm; 109,1 mm; 113,4 mm; 117,7 mm; 122 mm; 126,3 mm.

Výroba a materiál

Většina součástí bude vyrobena z duralu (EN AW 6060) a nerezové oceli 1.4301 (X5CrNi 18-10), která je odolná proti vysokým teplotám při vypékání. Výjimku tvoří trapézová matice, která je pro lepší kluznost trapézového spoje vyrobena z bronzu, dále pak některé součásti zásobníku vyrobené ze slitiny mědi (el. kontakty, tenké plíšky).

Součásti budou vyrobeny v Activair s.r.o. v Brně a ve VAKUUM PRAHA, spol. s r.o. v Praze.

4.2 Postup montáže

(V dalším budou součásti číslovány podle čísla výkresu.)

Manipulátor

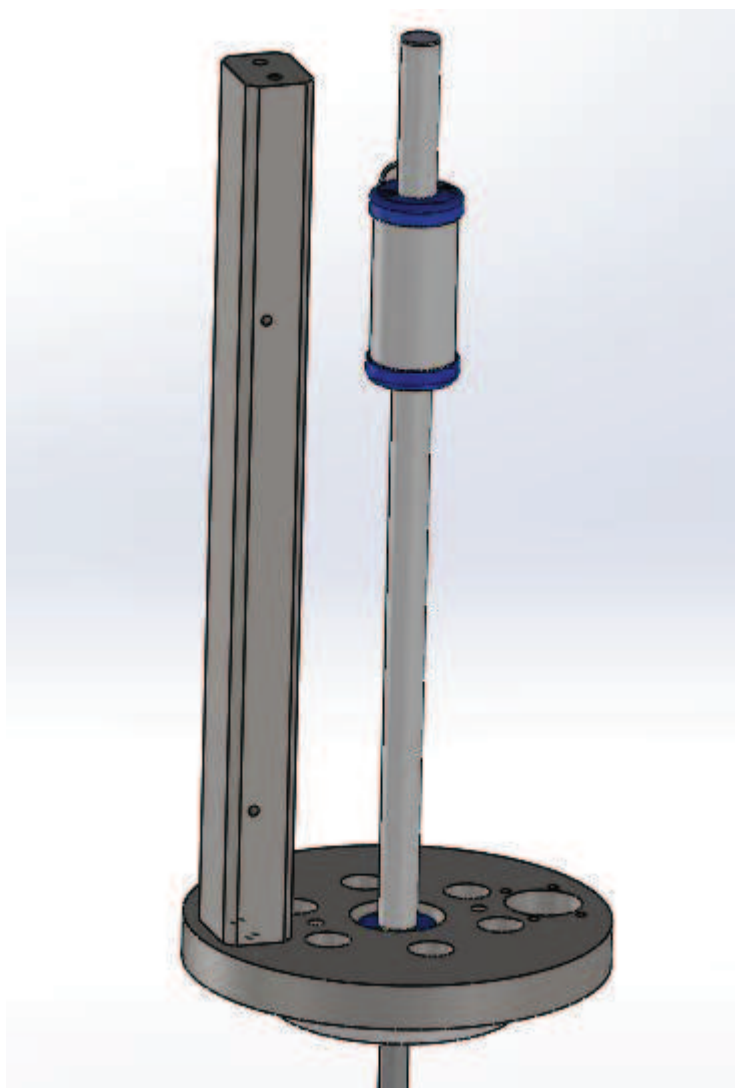
Jako první se našroubuje redukce (1) 24 šrouby M6 s maticemi na přírubu preparační komory, mezi příruby se vloží těsnění. Poté se k přírubě DN 40 CF přišroubuje 6 šrouby M6 Port Aligner (nebo místo něj nástavec (2)). Mezi součásti se opět před sešroubováním vloží těsnění.

V dalším kroku se umístí magnetická tyč do pozice, kdy příruba bude dole a posuvník nahoře, a následně se z ní posuvník vyvlékne. Na magnetickou tyč se nasadí podstavec (5), tak, aby zahlužení pro ložisko (\varnothing 22 mm) v podstavci bylo na vrchní straně a menší průměr (\varnothing 19) na straně spodní, a přišroubuje se k vnější části příruby dvěma šrouby M4. K podstavci se dvěma šrouby M4 přišroubuje podpěra (6). Do podpěry jsou vyvrtány ze strany dvě díry se závity M3 (pro připevnění pravítka), jejichž vzdálenost od konců podpěry je různá. Podpěru je třeba umístit tak, aby byl k podstavci přišroubován ten konec podpěry, od nějž je kratší vzdálenost k závitové díře. Zároveň je nutné, aby při takovém pohledu na sestavu, kdy je podstavec dole a zahlužení v podstavci (\varnothing 22) napravo, byly závitové díry vidět (viz obr. 4.11).

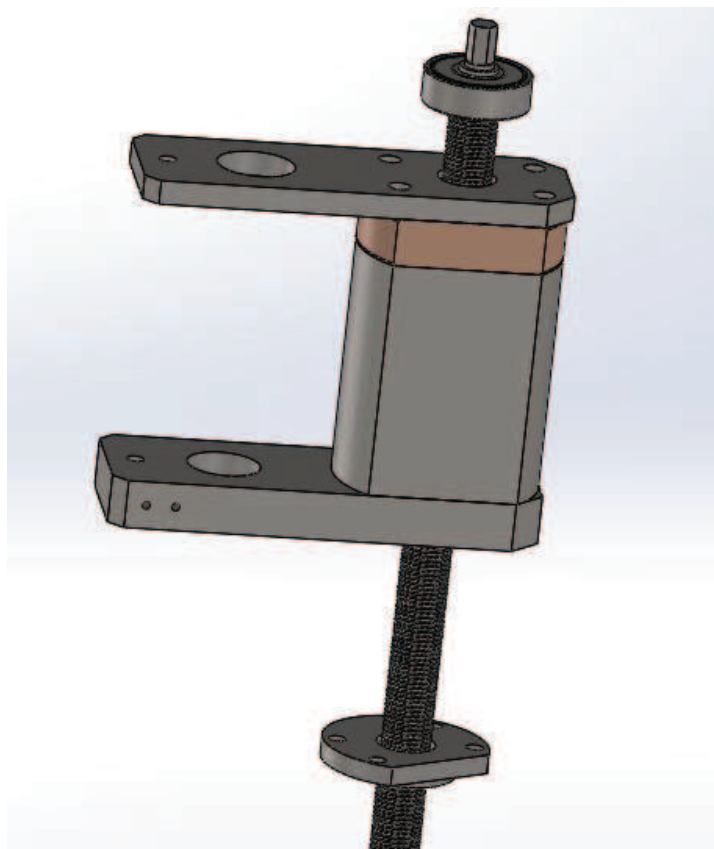
V dalším kroku se na trapézový šroub (9), na konec, na kterém je inbus, nalisuje ložisko 608 2RS. Poté se na druhý konec trapézového šroubu navlékne přes menší ze dvou děr (\varnothing 12) vrchní deska (14), dále se na šroub našroubuje trapézová matice (10) (tak, aby příruba matice přilehla k vrchní desce) a následně se na šroub navlékne postupně kryt (12), spodní deska (15) a víko (8). Spodní deska (navléknutá přes díru \varnothing 12) musí být orientována tak, aby při takovém pohledu, kdy inbusové zakončení na trapézovém šroubu je nahoře a větší část spodní desky po levé straně, byly dvě závitové díry M2 na spodní desce vidět (viz obr. 4.12). Víko se musí po navlečení dotýkat spodní desky svou plochou stranou. Na trapézový šroub se poté nalisuje druhé ložisko 608 2RS. Ke krytu se z obou stran čtyřmi šrouby M4 přišroubuje vrchní a spodní deska. Dále se do díry na vrchní desce (\varnothing 16), resp. do díry na spodní desce (\varnothing 15) vloží delrinový kroužek 1 (16) o vnějším průměru \varnothing 16, resp. delrinový kroužek 2 (17) o vnějším průměru \varnothing 15. Mezi tyto kroužky se vloží posuvník mag. tyče a mezi vrchní a spodní desku se vloží sloupek (13), který se z obou stran přišroubuje šroubem M3.

V dalším kroku se podsestava trapézového šroubu s klecí nasadí na magnetickou tyč (tak, aby inbusové zakončení šroubu bylo nahoře), ložisko na šroubu se uloží do zahlužení v podstavci (5) a zajistí se přišroubováním víka (8) čtyřmi šrouby M3. Na podpěru (6), mag. tyč a tr. šroub (9) se nasadí a dvěma šrouby M4 přišroubuje spojka (7). Na závěr se k podpěře přišroubuje

dvěma šrouby M3 pravítko (11) – stupnice musí jít shora dolů – a ke spodní desce dvěma M2 ukazatel (18).



Obr. 4.11 – Montování podpěry na podstavec.

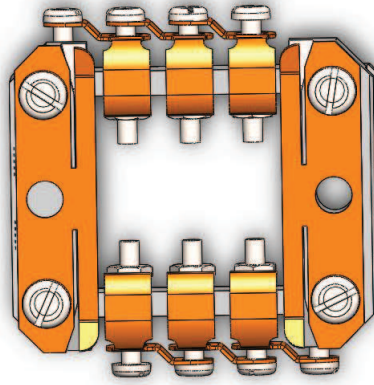


Obr. 4.12 – Montování klece na trapézový šroub.

Zásobník

Do závitové díry M4 nacházející se v zahloubení ($\varnothing 8$) na jednom z konců součásti prodloužení (UTC-01-08) se zašroubuje stavěcí šroub M4x16. Druhý konec prodloužení se vloží do zahloubení ($\varnothing 12$) v koncovce I. (UTC-01-05) a součásti se spojí šroubem M4. Následně se do čtyř závitových děr M2,5 na koncovce I. našroubují spojnice (UTC-01-10). Na tyto se nasadí (na obě protilehlé strany koncovky I.) postupně jednoduchý přítlak (UTC-01-03), podložka 1,2 mm (UTC-01-01), další jednoduchý přítlak a podložka 2,5 mm (UTC-01-02). Přítlaky je třeba orientovat tak, aby jejich zahnuté části směřovaly od sebe. Toto se zopakuje ještě 5x (pro obě strany), poté se nasadí jednoduchý přítlak, podložka 1,2 mm, jednoduchý přítlak a na závěr koncovka II. (UTC-01-06) a součásti se zajistí maticemi s podložkami, které se našroubují na spojnice. Ke koncovce I. a koncovce II. se dvěma šrouby M2 přišroubuje zarážka (UTC-01-07) tak, aby okraje zarážky byly zarovnané s okraji koncovek.

V dalším kroku se k součásti držák (4) celkem čtyřmi šrouby přišroubují dva jednoduché přítlaky a přes 4 díry ($\varnothing 2,8$) na obou stranách držáku se přišroubují šrouby M1,6 s maticemi a izolací 3 kontaktní plechy (UTB-02-12) (viz obr. 4.13 a bakalářský projekt Bc. Tomáše Axmana). Totéž se zopakuje s druhým kusem držáku (4).



Obr. 4.13 – Uspořádání plíšků na držáku (na modelu chybí izolace).

Jeden z držáků se dvěma šrouby M3 přišroubuje ke koncovce II. Druhý držák se dvěma šrouby M2,5 přišroubuje ke kratší části elka (3) tak, aby při takovém pohledu na držák, kdy přítlaky (UTC-01-03) jsou nahoře a skupina 5 děr ($\varnothing 2,8$) dole, byla delší část elka dole. Na závěr se elko s držákem přišroubuje dvěma M2,5 k druhému držáku (tak, aby kratší část elka byla na stejné straně sestavy zásobníku jako zarážka).

Složení celé sestavy manipulátoru a montáž na preparační komoru

Sestava zásobníku se přišroubuje (přes stavěcí šroub v prodloužení (UTC-01-08)) k vnitřní části magnetické tyče manipulátoru. Následně se manipulátor nasadí na přírubu DN 40 CF Port Aligneru (nebo nástavce (2)) připevněného k redukci na preparační komoře a to tak, aby stupnice na manipulátoru byla na stejné straně jako zakládací tyč přípravné komory. K přírubě se sestava přišroubuje 6 šrouby M6 s maticemi (mezi součásti se před sešroubováním opět vloží těsnění). Tímto je montáž hotová.

Závěr

Hlavní cíl této bakalářské práce byl úspěšně splněn. Byl vytvořen model manipulátoru pro ultravakuový elektronový mikroskop (UHV SEM) vyvíjený společností TESCAN ORSAY HOLDING a.s. ve spolupráci s Ústavem fyzikálního inženýrství FSI VUT. Na základě modelu byla vypracována veškerá výkresová dokumentace potřebná (spolu s informacemi v textu bakalářské práce) k výrobě a sestavení tohoto manipulátoru a jeho instalaci na vyvíjený prototyp. Rovněž byly nakoupeny všechny nevyroběné součásti manipulátoru.

Součástí manipulátoru je zásobník na vzorky, inspirovaný z velké části návrhem Bc. Tomáše Axmana (pouze některé součásti byly změněny). Zásobník obsahuje celkem 2 pozice opatřené el. kontakty (jedna vodorovná, druhá svislá) a 7 dalších vodorovných pozic. Manipulátor umožňuje pomocí magnetické tyče zvenku operovat se zásobníkem, který je uvnitř vakuové komory. Mechanismus na manipulátoru slouží k jemnému axiálnímu posunu zásobníku.

Předmětem dalších prací může být například návrh dalších součástí, mechanismů či pohonu k trapézovému šroubu, jehož otáčením se nastavuje výška zásobníku, nebo mechanismu na otáčení posuvníku mag. tyče.

Použitá literatura

- [1] Vacuum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum>
- [2] RUSŇÁK, Karel. *Vakuová měření* [online]. 2002 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYTV/mereni.pdf>
- [3] O'HANLON, John F. *A user's guide to vacuum technology*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003. ISBN 0-471-27052-0.
- [4] *Budenberg* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/budenberg/product-14671-916801.html>
- [5] WIKA. *Bourdon tube pressure gauge* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://en.wika.com/landingpage_bourdon_tube_pressure_gauge_en_co.WIKA
- [6] PFEIFFER VACUUM. *Pirani Gauge PPT 200* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.vacuum-shop.com/category/2073474/pirani-gauge-ppt-200-1--10--1000-hpa.html>
- [7] Hot-filament ionization gauge. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hot-filament_ionization_gauge
- [8] WITTKÉ, James H. *ELECTRON MICROANALYSIS CORE FACILITY* [online]. 2015 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://nau.edu/cefns/labs/electron-microprobe/glg-510-class-notes/instrumentation/>
- [9] KURT J. LESKER COMPANY. *Vacuum Pump Repair & Services* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/pumpservice_overview.cfm
- [10] DIENER ELECTRONIC GMBH. *Vacuum pumps* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.plasma.com/en/products/vacuum-pumps/>
- [11] Turbomolecular pump. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Turbomolecular_pump
- [12] ODE. *MOCAREEL™* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.ode.it/en/ode-presents-mocareel-the-new-rotary-vane-pump/>
- [13] HERRING, Dan. *Oil Sealed Rotary Vane Pumps* [online]. 2016 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://vacaero.com/information-resources/vacuum-pump-technology-education-and-training/1040-oil-sealed-rotary-vane-pumps-part-1.html>
- [14] *Turbomolecular Pump Market* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.technologynewsextra.com/global-turbomolecular-pump-market-2017-osaka-vacuum-shimadzu-ebara-technologies-ulvac/22960.html>

- [15] KURT J. LESKER COMPANY. *Gamma Titanium Sublimation Pumps* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/ionpump_gamma_ionpump_tisub.cfm
- [16] TITANIUM SUBLIMATION PUMPS [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.gammavacuum.com/index.php/product?id=23>
- [17] IDEAL VACUUM. *Agilent Varian Vaclon Plus 75 StarCell Ion Pump* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.idealvac.com/product.asp?pid=5778>
- [18] Cryopump. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cryopump>
- [19] *Electron microscope* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Electron_microscope
- [20] *Scanning electron microscope* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope#References
- [21] HAMANN, Gernot. *Electron Microscopy: Nonmagnetic Drives and Stages for Vacuum* [online]. 2015 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.pi-usa.us/blog/electron-microscopy-nonmagnonmagnetic-vacuum-compatible-and-high-precision-drives-and-positioning-systems-for-electron-microscopesnetic-drives-stages-for-vacuum/>
- [22] MCMULLAN, D. *SCANNING ELECTRON MICROSCOPY 1928 - 1965* [online]. 1993 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/achievements/mcmullan/mcm.htm>
- [23] GRAHAM, Alana. *Asbestos Identification and Quantification in Bulk Samples* [online]. 2008 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.emlab.com/resources/education/environmental-reporter/asbestos-identification-and-quantification-in-bulk-samples/>
- [24] SKLADANY, R. *Adaptace aparatury UHV SEM pro tvorbu a charakterizaci nanostruktur*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, 2016. 40 s. Vedoucí práce Ing. Michal Páleníček
- [25] KURT J. LESKER COMPANY. *Produktový katalog* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_cf_304ss.cfm?pgid=2d75in
- [26] AXMAN, T. *Vývoj nosiče vzorků pro měření elektrických vlastností v UHV SEM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, 2016. 40 s. Vedoucí práce Ing. Petr Bátor, Ph.D.
- [27] MACH, J. *Vývoj a aplikace UHV zařízení pro depozice tenkých vrstev (Atomární a iontové svazkové systémy)* [Dizertační práce]. Brno: VUT, FSI, 2009, 103 s.
- [28] FERROVAC GMBH. *Port Aligner DN40CF* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.ferrovac.com/?tool=ProductDescription&product=PA40W>

Seznam příloh

Pozn.: Výkresy č. 1 – 18 byly vytvořeny v rámci této bakalářské práce. Zbývající výkresy nakreslil Bc. Tomáš Axman a jsou součástí jeho bakalářské práce ([26]).

Číslo	Název	Formát
1	Redukce	A3
2	Nástavec	A4
3	Elko	A3
4	Držák	A3
5	Podstavec	A4
6	Podpěra	A4
7	Spojka	A4
8	Víko	A4
9	Šroub Trapézový	A4
10	Matice Trapézová	A4
11	Pravítko	A4
12	Kryt	A4
13	Sloupek	A4
14	Vrchní deska	A4
15	Spodní deska	A4
16	Delrinový kroužek 1	A4
17	Delrinový kroužek 2	A4
18	Ukazatel	A4
UTB-02-12	Plech kontaktní	A3
UTC-01-01	Podložka 1,2 mm	A4
UTC-01-02	Podložka 2,5 mm	A4
UTC-01-03	Přítlak jednoduchý	A4
UTC-01-05	Koncovka I.	A3

UTC-01-06	Koncovka II.	A3
UTC-01-07	Zarážka	A4
UTC-01-08	Prodloužení	A3
UTC-01-10	Spojnice	A4