



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pála** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **456379**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav fyziky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh a řízení pohybu manipulátoru vzorků**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design and rotation control of the sample manipulator**

Pokyny pro vypracování:

Úkolem je návrh a řízení rotace manipulátoru vzorků.

Dílčí úkoly:

1. Analýza současného stavu aparatury IBAD a vytýčení požadavků na její úpravu.
2. Specifikace technických parametrů řešení.
3. Návrh řešení manipulátoru pro různé konfigurace substrátů během depozice.

Seznam doporučené literatury:

- [1] M. Chakaroun, R. Antony, P. Taillepiere, A. Moliton, Lifetime obtained by ion beam assisted deposition, Materials Science and Engineering C 27 (2007) 1043-1045.  
[2] S. Wei, T. Shao, Investigation of carbon nitride films deposited by ion beam-assisted deposition with low bombarding energy of N ions, Materials Chemistry and Physics 135 (2012) 733-737.  
[3] P. Nuchuay, T. Chaikereee, M. Horprathum et al., Engineered omnidirectional antireflection ITO nanorod films with super hydrophobic surface via glancing-angle ion-assisted electron-beam evaporation deposition, Current Applied Physics 17 (2017) 222-229.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Vlčák, Ph.D., ústav fyziky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

\_\_\_\_\_

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Petr Vlčák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. Petr Vlčák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Petru Vlčákovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

Název práce: Návrh a řízení pohybu manipulátoru vzorků

Autor: Michal Pála

Vedoucí závěrečné práce: Ing. Petr Vlčák, Ph.D.

Abstrakt: V této práci se zabývám návrhem víceúčelového rotačního manipulátoru. Manipulátor slouží pro polohování vzorků depozičního zařízení IBAD (Ion Beam Assisted Deposition – depozice s asistencí iontového svazku). Tato práce by měla depozici metodou IBAD zefektivnit z hlediska úspory času. V současnosti je třeba vytvořit vakuum v aparatuře před depozicí každé varianty vzorků. S tímto manipulátorem lze tvořit několik různých sad vzorků na pouhé jedno vyčerpání vzduchu. Manipulátor funguje na principu zastínění již nadeponovaných vzorků před dalším nanášením. Jedná se o speciální záležitost, protože toho zařízení pracuje ve vakuu a při různých teplotách. Za účelem vysvětlení vývoje návrhu manipulátoru se práce zabývá teoretickým úvodem do vakuové techniky, depozičních procesů a dalších odvětví, protože to se tyto faktory zpětně odráží v návrhu řešení.

Cílem práce je usnadnit proces depozice tak, aby bylo možné připravit různé varianty vyvíjených vzorků v jednom procesu.

Abstract: In this work I am focused into design of a multipurpose rotary sample holder. The manipulator is designed to serve in depositing device IBAD (Ion Beam Assisted Deposition). This thesis should make the IBAD method more time-saving. At present, it is necessary to create a vacuum in the device before each depositing of every sample variant. With this manipulator, you can create several different sets of models for just one air exhaustion. The manipulator operates on the principle of hiding already deposited samples. This sample holder works in vacuum and works in many different temperatures. In order to explain the development of manipulator design, the thesis deals with the theoretical introduction of vacuum technology, deposition processes and other industries cause of influencing solutions.

The aim of the thesis is to make the deposition process easier so it is possible to prepare different variants of the developed samples in only one process.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

V ..... dne .....

Podpis autora

# Obsah

Úvod	5
<b>1 Teoretická část</b>	<b>6</b>
1.1 Úvod do problematiky depozice	6
1.2 Povlakovacích techniky	13
1.2.1 Upřesnění základních pojmů a názvosloví	13
1.2.2 Chemická depozice z plynné fáze (CVD)	14
1.2.3 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)	15
1.2.4 IBAD (ion beam assisted deposition)	16
1.3 Poznatky z výzkumů tenkých vrstev	17
1.3.1 Tenká vrstva CrN	17
1.3.2 Tenká vrstva Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18
1.3.3 Tenká vrstva MgO	19
1.3.4 Tenká vrstva SinX a CrNX	19
1.4 Kluzné chování	20
<b>2 Praktická část</b>	<b>22</b>
2.1 Požadavky a specifikace konstrukčního řešení	22
2.1.1 Technická specifikata manipulátoru	22
2.1.2 Požadavky konstrukčního řešení	22
2.1.3 Analýza současného stavu zařízení	23
2.1.4 Vytyčení požadavků na úpravy zařízení	24
2.2 Princip funkce navrženého řešení	24
2.3 Konstrukční řešení	26
2.3.1 Aspekty a pojednání o konstrukčních nesnázích	26
2.3.2 Hlavní funkční části konstrukce	27
2.4 Elektrická a řídicí část	36
2.4.1 Řídicí systém	36
2.4.2 Dotykový panel	37
2.4.3 Kontroler k elektromotoru	37
2.4.4 Senzor natočení	37
<b>Závěr</b>	<b>39</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>40</b>
<b>Seznam použitého softwaru</b>	<b>46</b>

# Úvod

Povlakování součástí se dnes stává standartní záležitostí. Z tohoto důvodu se snažíme naleznout nové vhodné tenkovrstvé materiály. Nezbytnou nutností pro optimální vlastnosti povlaku je důležité vzorky dobře založit do vakuové komory a polohovat s nimi. Existují různé procesy povlakování, které s sebou ze své povahy a principu nesou obtíže či specifika toho, jak má být polohovací zařízení zkonstruováno. V důsledku kvality nanášení vrstev na výrobky různých tvarů se konstruuje různé upevňovací zařízení tak, aby se povlakovaly rovnoměrně plochy, které jsou žádoucí. Pro dosažení vrstvy požadovaných parametrů je potřeba vytvořit vysoké vakuum. Samotné vyčerpání vzduchu trvá několik hodin. Proto se snažíme navrhnout vhodné polohovací zařízení (víceúčelový manipulátor), které nám umožní tvořit více různých povlaků a jejich kombinací na vzorcích na pouhé jedno vyčerpání komory. Tímto řešením si tedy ušetříme spoustu času a energie a zefektivníme celý proces napařování. Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh konstrukce a řízení depozičního manipulátoru vzorků zařízení IBAD (Ion Beam Assisted Deposition – depozice s asistencí iontového svazku), které slouží pro vývoj nových povlaků. Konkrétní aparatura, pro kterou navrhují tento manipulátor, je využívána na Ústavu fyziky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

# Teoretická část

## 1.1 Úvod do problematiky depozice

Aby bylo možné navrhnout akceschopný manipulátor je vhodné se seznámit se samotnou problematikou depozice a vakuové techniky, protože tím je zásadním způsobem ovlivněn jeho návrh, design a funkční vlastnosti.

Vakuum je nutný předpoklad pro nanášení tenkých vrstev a zároveň nese specifické požadavky na konstrukci manipulátoru, neboť nemůžeme používat jakékoli materiály a libovolná maziva tak, jak jsme běžně zvyklí. S nižším tlakem se ve vakuu dostáváme do oblasti suchého tření, což také zvyšuje třecí sílu.

Důležitou roli hraje i poloha a natočení tohoto manipulátoru v aparatuře vůči zdroji deponovaného materiálu a svazku iontů. S tím jsou spojené různé povlakovací techniky, kterých se tato problematika týká. Při nedodržení základních podmínek určených povahou depoziční techniky snížíme kvalitu budoucí nanesené vrstvy.

Rozmanitost povlakovacích technik stojí za různými konstrukcemi manipulátoru, která pro některé techniky může vyhovovat a pro jiné ne.

### Vakuum a vakuová technika

Vakuum je potřebné z hlediska realizace procesu povlakování. Bude ovšem klást nároky na konstrukční materiál a to spolu nese i mazivo či utěsnění z důvodu požadované rotace manipulátoru. Návrhem manipulátoru a jeho vložením do depozičního zařízení můžeme zhoršit kvalitu samotného vakua uvnitř komory. Svou povahou může ovlivňovat rychlost čerpání a celkové složení vakua v aparatuře. Proto se stručně zmiňuji o vakuové technice.

Teoreticky je vakuum prostor neobsahující částice (prázdny prostor), ale může obsahovat pole (gravitační, magnetické aj.). Je tam nulový tlak. V praxi se jako vakuum označuje prostředí v místech, kde je snížený počet částic a snížený tlak. Z povahy čerpání se mohou vyskytovat určité úrovně vakua a dělí se na určité stupně, např. [3]

1. Dokonalé vakuum 0 Pa (ideální)
2. Extrémně vysoké vakuum  $1 \cdot 10^{-10}$  Pa
3. Ultravysoké vakuum  $1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-7}$  Pa
4. Vysoké vakuum  $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-2}$  Pa
5. Nízké vakuum  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^2$  Pa



## Střední volná dráha molekul

Střední volná dráha molekul je důležitý parametr pro depozici vrstvy. Atom (molekula) musí urazit dráhu ze zdroje nanášeného materiálu až k substrátu. Ideálně by se cestou neměl srazit s žádným jiným atomem prvku nebo molekulou. Při srážce se molekula odchyluje ze své dráhy a nemusela by dopadnout na substrát. Při srážení také dochází k nerovnoměrnému nanášení atomů. [3]

Střední volná dráha molekul udává průměrnou vzdálenost, za kterou by se tato molekula měla srazit jedenkrát s jinou molekulou: [3]

$$\lambda = \frac{R \cdot T}{p \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot N_A} \quad (1.1)$$

Kde  $p$  [Pa] je tlak,  $R$  [ $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ] je Molární konstanta,  $T$  [K] je Termodynamická teplota,  $\sigma$  [m] je Srážkový průměr částic,  $N_A$  [ $mol^{-1}$ ] je Avogadrova konstanta,  $\lambda$  [m] je Střední volná dráha molekul

Při konstantní teplotě ovlivňujeme střední volnou dráhu pouze tlakem resp. množstvím částic (molekul, atomů). Zmenšující se tlak tuto dráhu prodlužuje. [3]

## Střední rychlost pohybu molekul

Střední rychlost pohybu molekul udává průměrnou rychlost, kterou se molekula pohybuje a je dána vztahem

## Vakuová vodivost

Vakuovou vodivostí lze vyjádřit, jak je plyn schopen proudit mezi vakuovými systémy (otvory a spojovací potrubí). Vypočteme ji dle následujícího vztahu

Při výpočtu vakuové vodivosti pro potrubí využijeme odvozeného vztahu

Při návrhu je potřeba rozlišit, zda se jedná o viskózní tok či molekulátorní tok plynu.

Při **viskózním toku** se odráží molekuly plynu mezi sebou. Platí při vztahu mezi střední volnou dráhou molekul a průměrem potrubí. Na rozdíl od viskózního toku se **molekulární tok** vyznačuje tím, že proudící molekuly narážejí o vnitřní stěnu potrubí. [3]

## Vývěvy

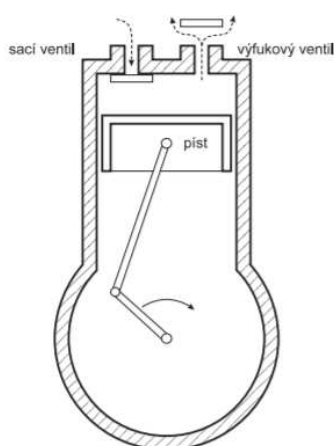
Jedná se o zařízení, které odčerpává plyny s cílem vytvoření vakua. Snížení tlaku můžeme dosáhnout snížením teploty, zvýšením objemu a nebo snížením látkového množství v objemu. Podle způsobu snížení tlaku se vývěvy dělí na transportní a adsorpční. Transportní vývěvy se dále dělí na vývěvy mechanické a hybnostní. [3]

Vývěvy se dělí podle principu přenosu molekul a z konstrukčního hlediska. Při adsorpci pokrývají molekuly plynu vnitřní povrch stěny vývěvy. Transportní vývěvy odčerpávají molekuly plynu ven skrze vývěvu. Podle typů přečerpávaných plynů se volí části vývěvy z vhodných materiálů pro tyto plyny.

## Vývěvy transportní - mechanické

Mechanické vývěvy fungují na principu čerpadla či pumpy. Pracují na základě změny objemu. K jejich čerpání využívají rotační pohyb z motoru. Mechanické vývěvy se dělí na pístové a rotační.

Princip **pístových vývěv** spočívá ve změně objemu pohybu pístu ve válci. V první fázi načerpávají vzduch (plyny) z odčerpávaného prostoru (komory). Ve druhé fázi se načerpaný vzduch v prostoru nad pístem vytlačí do ovzduší.



Obrázek 1.1: Schéma pístové vývěvy, převzato z [4]

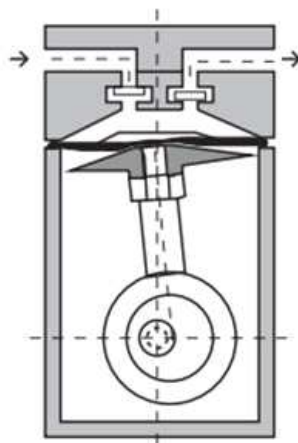
Pístové vývěvy dosahují řádově  $10^2$  Pa. Tento typ vývěv nachází problémy se třením mezi pístem a válcem (menší účinnost) a těsností mezi pístem a válcem (menší efektivita). Z důvodu těchto nedokonalostí se tento typ vývěv nepoužívá v procesech pro depozici tenkých vrstev. [3] [4]

**Membránová vývěva** pracuje na principu pístové vývěvy. Rotační pohyb přechází na pohyb posuvný vratný. Nedostatky pístové vývěvy jsou vyřešeny přidáním membrány, která nahrazuje funkci pístu ve válci. Tato membrána může být vyrobena z chlopropenu, což ji zaručuje dlouhou životnost při namáhání (při použití agresivních plynů se materiál liší). Navíc je tato vývěva bezolejová. Nedochozí tedy k poškozování oleje čerpáním agresivních plynů a nevychází nám ven z vývěvy karcinogenní olejové páry.

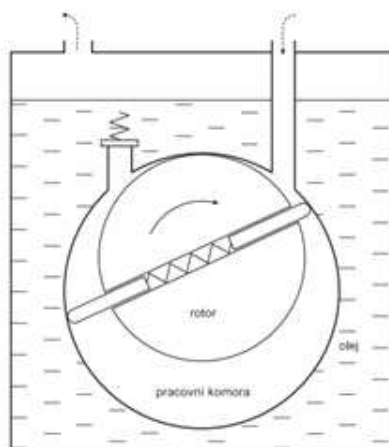
**Rotační vývěva s rotorovými křídly** je nejčastěji používaná vývěva. Dosahuje otáček do 1500 ot/min (výjimečně 3000ot/min) s čerpací rychlostí až několik desítek l/s. [4]

Nevýhodou této vývěvy je spalování přehřátého oleje. Olej zde těsní, chladí a zároveň maže všechny pohyblivé části. Tento plyn ze spáleného oleje je karcinogenní. Problém se řeší přidáním filtru či odvedením kouře ven z laboratoře. Často jsou využívány dvoustupňové rotační vývěvy. [4] Tato vývěva je použita v naší IBAD aparatuře.

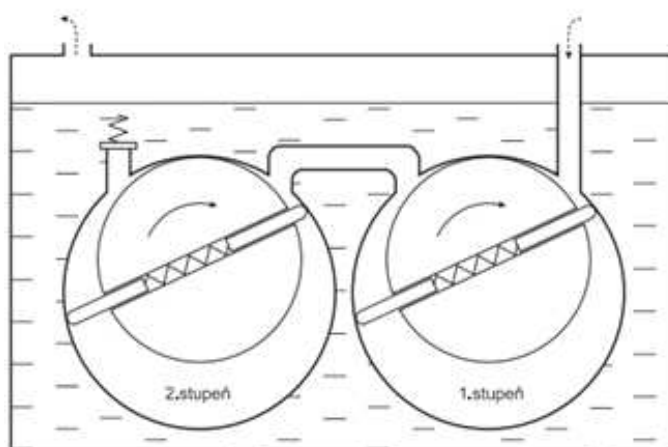
Tímto zapojením vývěv do série získáváme s použitím minerálního plynu tlaku 0,5 Pa. Při použití syntetického oleje, které mohou odčerpávat i agresivní plyny dosahujeme tlaků až 0,05 Pa. Nevýhodou syntetických olejů jejich vysoká cena. [4]



Obrázek 1.2: Schéma membránové vývěvy, převzato z [4]



Obrázek 1.3: Schéma rotační vývěvy, převzato z [4]



Obrázek 1.4: Schéma dvoustupňové rotační vývěvy, převzato z [4]

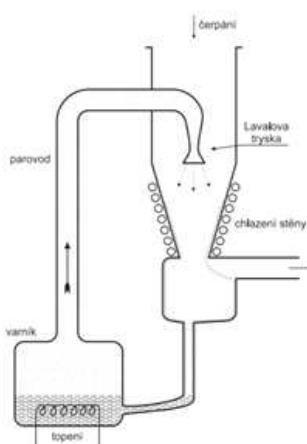
## Vývěvy transportní - hybnostní

Hybnostní vývěvy vyčerpávají molekuly na základě předání impulsu čerpaným molekulám ve směru ven z čerpané komory. Tento impuls mohou získávat i při srážkách s jinými molekulami.

## Vývěvy tryskové

**Ejektorová vývěva** využívá Bernoulliho rovnice. Podle ní je tlak v místě proudící kapaliny nižší, než v místě pomaleji proudící kapaliny. Podtlak nasává plyn a předává mu hybnost směrem z odsávané komory. [3] [4]

Místo vody používáme olejové páry a Lavalovu trysku. S touto kombinací dosahujeme nadzvukové rychlosti páry. Výhodou Ejektorové vývěvy je velká čerpací rychlost, která je bohužel kompenzována značným zpětným tokem plynu. [3] [4]

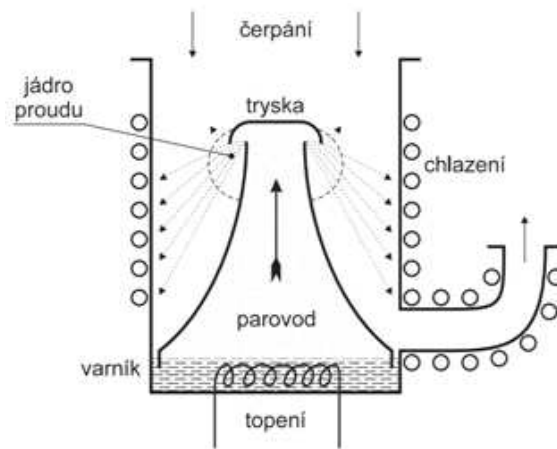


Obrázek 1.5: Schéma ejektorové vývěvy, převzato z [4]

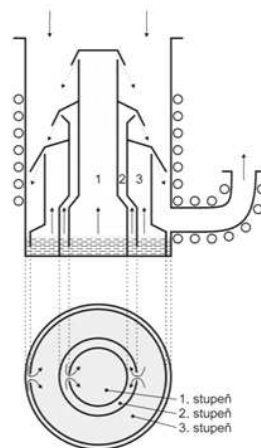
**Difuzní vývěva** vznikla úpravou vývěvy ejektorové. K tvorbě par využívá syntetické oleje (silikonové oleje či polyfenylethery). K použití difuzní vývěvy musíme nejprve předčerpat komoru do řádů až desítek Pa. K předčerpání se většinou používá olejová rotační vývěva. [3] [4]

Ve varníku se ohřívá olej. Vzniklá pára putuje skrz parovod. Stejně jako u ejektorové vývěvy mají páry nadzvukovou rychlost. Rozdílem tlaků s sebou pára strhává molekuly plynu obsažené v komoře a přidává jim impuls směrem z vývěvy. Stěny vývěvy jsou chlazeny, aby docházelo ke kondenzaci par oleje, což shromažďuje olej ve varníku a celý proces se opakuje. Od počtu stupňů difuzní vývěvy se odvíjí jejich mezní tlak. Tyto vývěvy se běžně vyrábějí třístupňové. [4]

Výhodou difuzní vývěvy je jednoduchá konstrukce, nízká pořizovací cena, odolnost a čerpaní jakéhokoli plynu. Mezi nevýhody patří možné znečištění vakua olejovými parami (předcházíme vymrazovací prsty a lapači oleje). Čerpací rychlost je několik desítek l/s až několik desítek tisíc l/s) a proto je potřeba odčerpávat plyn i desítky hodin k vytvoření vakua. Další nevýhodou je dlouhá doba náběhu a odstavení. [3] [4]



Obrázek 1.6: Schéma difuzní vývěvy, převzato z [4]



Obrázek 1.7: Schéma třístupeňové difuzní vývěvy, převzato z [4]

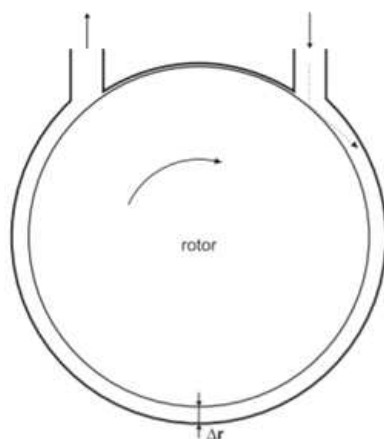
## Molekulární vývěvy

Molekulární vývěvy odráží molekuly svou obvodovou rychlostí. Pro obvodovou rychlost platí vztah

$$v = \omega \cdot r \quad (1.2)$$

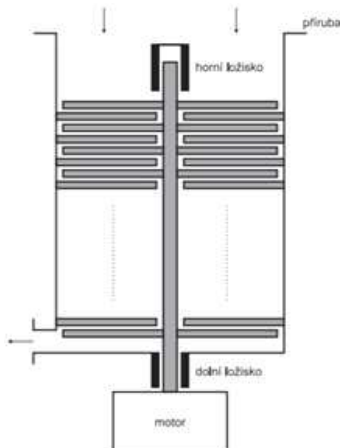
kde  $\omega$  [ $s^{-1}$ ] je úhlová rychlost vývěvy,  $r$  [m] je poloměr vývěvy. [4]

**Gaedeho molekulární vývěva** svou nerovností na povrchu rotujícího kotouče odráží molekuly směrem ven z aparatury. [3] Mezera  $\Delta r$  je velká přibližně 0,1mm. Po roztočení rotoru potřebujeme, aby byla mezera  $\Delta r$  užší než střední volná dráha molekul. K použití této vývěvy se komora předem předčerpává. Nevýhodou je nízká čerpací rychlost. [4] Dosahuje otáček 16-20 tisíc za minutu. [3]



Obrázek 1.8: Schéma Gaedeho molekulární vývěvy, převzato z [4]

**Turbomolekulární vývěva** pracuje na principu molekulární vývěvy přemísťováním molekul ven z aparatury. Disk je nahrazen lopatkami. Dosahuje velmi vysokých otáček. [3]



Obrázek 1.9: Schéma turbomolekulární vývěvy, převzato z [4]

Její čerpací rychlost je mnohonásobně větší oproti molekulární vývěvě. Tato vývěva zvládá čerpat až do  $1 \cdot 10^{-11}$  Pa. Při použití turbomolekulární vývěvy je třeba nejdříve předčerpat, protože při atmosférického tlaku by odpor vzduchu lopatky mohl poškodit. Prakticky nepředstavuje zdroj kontaminantů vakua. [3] [4]

## 1.2 Povlakovacích techniky

Povaha povlakovacích technik ovlivňuje konstrukci manipulátoru. Proto se bude vhodné zmínit o základních povlakovacích technikách, ze kterých by mohly vyplývat jejich nároky a zároveň jejich odlišnosti z pohledu designu manipulátoru. Hlavní rozdělení metod depozice je CVD (Chemical vapor deposition) a PVD (Physical vapor deposition). Tyto techniky se dělí ve způsobu nanášení a dalších podmínkách (např. teplota a tlak). Např. metoda IBAD kombinuje některé vlastnosti těchto technik.

### 1.2.1 Upřesnění základních pojmů a názvosloví

S návrhem manipulátoru souvisí proces depozice, proto zde uvádím základní informace týkající se této problematiky. Z vlastností různých technik vyplývá, pro jaké techniky bude navržený manipulátor vhodný a pro které nikoli.

#### Substrát

Základní materiál (povlakovaný předmět), na který nanášíme tenkou vrstvu materiálu a tím měníme jeho vlastnosti.

#### Povlak

Vrstva cizího (nanášeného) materiálu o takové tloušťce, že se začínají podstatně projevovat samotné vlastnosti naneseného materiálů bez významného podílu přechodové oblasti a bez samotného podkladového materiálu. Při nanesení tohoto materiálu na plast a kov bude mít tato vrstva u obou materiálů prakticky stejné užité vlastnosti. Povlak bývá často tlustší, než vrstva. Tloušťka povlaků se běžně pohybuje kolem  $0,5 - 10 \mu\text{m}$ . [5]

Jako povlakovanou součást si můžeme představit například Sprchovou hlavici a obroučky světel automobilů. Jsou to plastové součásti potažené chromem. Kovová součást je nahrazena plastovou při zachování kovového vzhledu a získání nižší hmotnosti.

#### Tenká vrstva (film)

Nanesený materiál o takové tloušťce, že vlastnosti jeho povrchu jsou podstatným způsobem ovlivněny přechodovou oblastí a vlastnostmi základního materiálu. Vrstva a základní materiál tvoří tzv. „systém“. Vlastnosti tenké vrstvy nanesené např. na plast a na kov budou rozdílné. Stejná vrstva materiálu bude mít na substrátech z odlišného materiálu úplně jiné vlastnosti. Tloušťka vrstev se běžně pohybuje do 500 nm. [5] [7]

Tenké vrstvy se rozlišují na jednovrstvé povlaky (monovrstvy) a vícevrstvé povlaky (multivrstvy). Multivrstvy dosahují lepších vlastností i při stejném složení (větší tvrdost, otěruvzdornost a odolnost proti šíření trhlin). [1]

Každá tato vrstva má svoji určitou vlastnost. U první vrstvy (která je ve styku se substrátem) se klade důraz na adhezi. U dalších se může klást například požadavek na tvrdost nebo odolnost proti korozi. U tenkých vrstev můžeme měřit nějaké vlastnosti. Ať už průběžně, nebo po skončení depozice můžeme měřit například tloušťku vrstvy. [1]

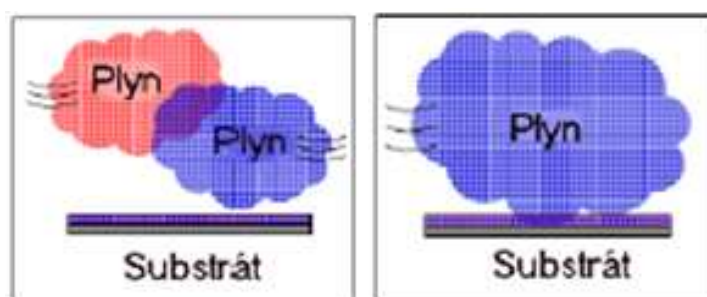
## Depozice

Depozice je proces, při kterém nanášíme vrstvy materiálu na jiný materiál. Provádí se až jako finální úprava povrchu součásti. Depozice probíhá za vakua a často při vyšších teplotách. CVD a PVD jsou plazmově podporované metody depozice. Nízkoteplotní plazma se pohybuje při teplotách mezi 27 -730 °C. [1]

### 1.2.2 Chemická depozice z plynné fáze (CVD)

Při této metodě se tvoří tenká vrstva ze směsi reaktivních plynů [6] a nebo kapalinou (prekurzor), který je nutné zplynovat. [2]

V první kroku se provádí mechanické čištění, odmašťování v parách a poté čištění v ultrazvukových čištěnkách. Nakonec se povrch substrátu bombarduje atomy argonu ve vlastní deponiční komoře [8]. Do komory se následně přivádějí reakční složky v plynné fázi. Při takto vysoké teplotě v těchto plynech dojde k disociaci molekul (rozdělení na kladně a záporně nabitě částice). Vysoká teplota také posiluje chemickou reakci přivedených plynů. Tenká vrstva vzniká na povrchu substrátu. Reaktivními plyny mohou být např.  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  pro vytváření uhlíkových povlaků. [6]



Obrázek 1.10: Schéma principu metody CVD, převzato z [1]

CVD se rozděluje podle použité technologie, podle procesního tlaku a nebo podle fyzikálních vlastností plynné fáze. [2] Proces CVD probíhá při teplotách kolem 800 - 1050 °C [8].

Uplatnění metody CVD je vhodné pro řezné nástroje. Často je využíváno k nanášení vrstev mědi, titanu a dalších různých kovů, křemíku, uhlíku a jejich sloučeniny až po syntetický diamant. [2]

**Výhody CVD:** [6]

1. Ekonomicky výhodnější pro tvorbu silných vrstev



2. Nanáší vrstvu i do špatně přístupných míst (drážky a dutiny)
3. Vysoká adheze – vrstva dobře zakotvena do substrátu
4. Vysoká odolnost proti opotřebení
5. Vysoká teplotní stabilita

**Nevýhody CVD:** [6] [7]

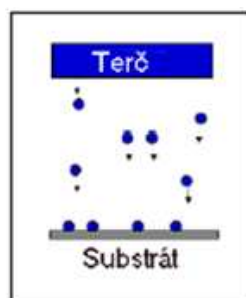
1. Špatný ekologický dopad vzhledem k plynným pracovním směsím
2. Vysoká teplota při procesu
3. Dlouhý pracovní cyklus (8-10hod.)
4. Tahová pnutí ve vrstvě
5. Nelze nanášet některé typy vrstev

Nový manipulátor nebude konstruován pro metody CVD, protože pod tuto skupinu metod nepatří depoziční metoda IBAD. Vyžadovalo by to jiné konstrukční řešení a postupy. Z tohoto důvodu se technologií CVD nebudeme dále zabývat a zaměříme se pouze na technologie PVD.

### 1.2.3 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)

Oproti CVD se při metodě PVD používá nanášený materiál nejčastěji v podobě pevného skupenství.

Nanášený materiál převedeme z pevné fáze do fáze plynné napařováním, napařováním, bombardováním svazkem elektronů nebo laserovým svazkem. Poté je důležité přenesení těchto plynných částic na substrát. Přenesení lze docílit přímočaře, tepelným rozptylováním či za podmínek molekulárního toku (Molekuly mění svůj směr pohybu z důvodu srážek se stěnou potrubí) [1] [3]. Po dopadu částic na substrát dochází ke kondenzaci (substrát má mnohem nižší teplotu), což začíná tvořit rostoucí tenkou vrstvu. [1]



Obrázek 1.11: Schéma principu metody PVD, převzato z [1]

Proces PVD probíhá při teplotách substrátu kolem 150 - 500 °C ve vakuu 100 – 10<sup>-8</sup> Pa [1]. S vyšším vakuem (nižší hodnotou tlaku) dochází k definovanější depozici, rovnoměrné distribuci kondenzujícího povlaku, jeho růstu, uspořádanosti a tím k lepším vlastnostem a kvalitě. Tloušťky se pohybují kolem 2 - 5 μm [1].

PVD se dělí na napařování, naprašování a iontové plátování. [1] Výhodou PVD depozice je možnost tvoření velkého množství různých tenkých vrstev a jejich kombinací. Tato metoda je nejšetrnější metoda z ekologického hlediska. Aplikace PVD nalezneme např. u rezných nástrojů. [7]

### Napařování

Nejprve vložíme substrát do komory nad terč (nanášený materiál). Terč musí být uveden do plynného stavu dodáním tepla (např. odporový či indukční ohřev). Molekuly par materiálu putují přímočaře směrem nahoru k substrátu. Při styku molekul par a substrátu dochází ke kondenzaci těchto par (z důvodu značně nižší teploty substrátu) na povrchu substrátu. [1]

Napařováním lze tvořit epitaxní vrstvy. Krystalická mřížka této vrstvy a substrátu na sebe přímo navazují. [1]

### Naprašování v plazmatu

V komoře se nachází terč z vodivého materiálu o záporném potenciálu v řádu tisíce voltů. Na druhé straně se nachází substrát. Mezi nimi je vpuštěn plyn (např. argon), který bombarduje povrch terče. V okolí terče se zapálí doutnavý výboj. Vzniká jev podobný plazmatu (ionizovaný plyn). Tyto ionty jsou tedy vytvořeny z plazmatu. Kladné ionty plynu jsou přitahovány směrem k terči a bombardují ho. Záporné ionty dopadají na uzemněnou kostru vakuové komory. Bombardováním terče dochází k vytrhávání atomů, které se usazují všude kolem (i na substrát). Rovnoměrným pohybem (nebo rotací) substrátu dosahujeme rovnoměrně nanesené vrstvy. [9]

Naprašování se dále rozděluje na Diodové naprašování, s předpětím, magnetronové vysokonapětové aj. [1]

Dnes je magnetronové naprašování pokročilá technologie a používá se velmi frekventovaně. S vývojem se začala používat střídavá plazma (např. u plastů a keramik), což střídavě nabíjí a vybíjí elektrické náboje na deponované součásti [10]

**Magnetronové naprašování** vychází ze stejného principu jako klasické naprašování. Rozdílem je přidání magnetronu vně komory. Ten tvoří magnetické pole (mikrovlnné záření) v okolí terče. V důsledku Lorentzovy síly je ovlivňována dráha interagujících částic (elektronů, iontů) při naprašování a zvyšuje se tak ionizace dalších atomů pracovního plynu. Mezi výhody magnetronového naprašování patří udržení výboje při menším napětí (v řádech stovky voltů) a navíc je možné udržet výboj při nižším tlaku, což přináší větší kvalitu nanesené vrstvy. [9] [1]

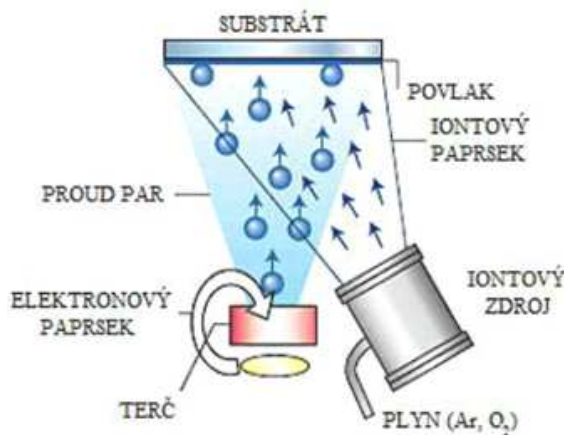
### 1.2.4 IBAD (ion beam assisted deposition)

IBAD (Ion Beam Assisted Deposition – depozice s asistencí iontového svazku) je metoda depozice (PVD) kombinující vytváření vrstev a bombardování ionty generované z iontového zdroje. U iontového svazku lze řídit tok, energii a směr pohybu iontů (úhel pod jakým ionty dopadají na terč). [1]

V našem případě řešíme problém pro IBAD vycházející z technologie PVD. Vrstvu nanášíme pomocí elektronového paprsku, který odpařuje deponovaný materiál (terč). Odpařovaný materiál míří přímočaře směrem k terči a tvoří vrstvu. Ion-

rový svazek je namířen na substrát a bombarduje ho ionty, což podporuje napařovací proces. To ovlivňuje vlastnosti deponované vrstvy.

IBAD může mít více modifikací. Další z nich může být bombardování jedním iontovým svazkem a napařování druhým iontovým svazkem. **Tyto ionty nejsou na rozdíl od napařování obsaženy v plazmě, ale vycházejí přímo z iontového děla.**



Obrázek 1.12: Schéma principu metody IBAD, převzato z [1]

## 1.3 Poznatky z výzkumů tenkých vrstev

Výzkum depozice tenkých vrstev je velmi perspektivní. Jeho výzkum neustále probíhá, což lze dokázat následující rešerší současného poznání depozice vrstev metodou IBAD.

### 1.3.1 Tenká vrstva CrN

Perspektivním zlepšením korozní odolnosti materiálů nanosením tenkých vrstev se zabývali F. Černý J. Pitter, S. Konvičková a V. Jech. [11]

Na Fakultě strojní ČVUT v Praze proběhl výzkum za účelem nalezení anti-korozních vrstev tenkých vrstev z nitridu chromu a oxidu chromu. Vrstvy nitridu chromu byly nanášeny metodou IBAD a vrstvy oxidu chromu metodou PACVD. Substrátem byly vzorky z nereznoucí oceli AISI 316. [11]

Chemické složení naneseného materiálu byl vyhodnoceno pomocí mikroanalýzy elektronovým paprskem. Mechanické vlastnosti byly ověřeny měřením tvrdosti podle Vickerse, dále byly otestovány proti škrábancům a kalotestem. Filmy byly testovány, jak dobře odolávají oxidaci v teplotách 700 - 1000 °C ve vzduchu a byly vyhodnoceny gravimetrickou metodou. Korozie na povrchu dosahovala hodnot 1000 hodin. Tenké vrstvy snížili stupeň oxidace na nanesených materiálech. [11]

Ve své práci také zveřejnili charakteristiky oxidace vrstev nitridu chromu. Pro příklad přikládám pouze nějaké charakteristiky, viz obr. 1.13.

Vzorky vytvořené metodou IBAD byly vystaveny dané teplotě po dobu 200 hodin. Energie iontů byla o velikosti 90 keV a nanášená tloušťka materiálu byla 2  $\mu\text{m}$ .

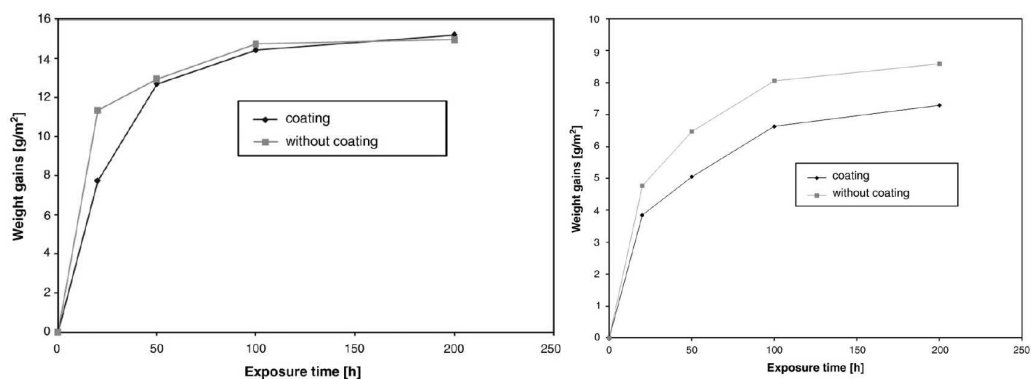
U metody PACVD byl vzorek vystaven po dobu 1000 hodin v teplotách 800 °C, 900 °C a 1000 °C. Tloušťka vrstvy dosahovala 5  $\mu\text{m}$ . Pro každou naměřenou hodnotu bylo použito 10 vzorků. Výsledky mikroanalýzy elektronovou sondou ukázaly, že vrstva chrom nitridu vytvořena metodou IBAD obsahovala velké množství nezreagovaného chromu. Mikrotvrdost tenké vrstvy tvořené metodou IBAD měla 1200 HV, od technologie PACVD dosahovala tvrdost 1500 HV. Tenká vrstva chrom nitridu má chránící vlastnosti pro 700 °C a 800 °C. Při 900 °C nenajdeme při oxidaci skoro žádný rozdíl mezi povlakovaným a nepovlakovaným vzorkem. Výsledky dopadly lépe pro metodu PACVD. [11]

### 1.3.2 Tenká vrstva Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

V laboratoři magnetických materiálů a zařízení v Číně, provedli Shoudong Mao, Tingting Xie a další pracovníci výzkum s nanesením vrstvy hliníku/oxidu hlinitého metodou IBAD. [12]

Povlak Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je hojně využíván k potahování neodymových magnetů. Neodymové magnety vyráběné práškovou metalurgií jsou hojně využívány pro jejich vynikající magnetické vlastnosti. K jejich využití ale často brání jejich chabá odolnost proti korozi, ke které v různých prostředích dochází. Často jsou natírány povrchovými nátěry pro zvýšení této odolnosti. Do průmyslu dostačuje neodymové magnety elektrolyticky pokovat. Tím získáme příznivou odolnost proti korozi za nízké náklady. Nevýhoda je v narušování životního prostředí, v horší přilnavosti a také v mírném zhoršení magnetických vlastností. Dnes již konkuruje tomuto vylepšení povlakování tenkými vrstvami depozicí z plynné fáze (PVD). Hliník se díky jeho vrstvičce oxidu hlinitého hodí jako příznivá ochrana před korozi samotného neodymového magnetu. [12]

Při magnetronovém naprašování aplikovaných na spečené neodymové magnety se objevovala sloupcová struktura. Zjistilo se, že kvalita naprašované vrstvy závisí na teplotě, tlaku a parciálních tlacích plynů obsažených v procesu. To ovlivňuje uspořádání zrn v povrchu vrstvy. [12]



Obrázek 1.13: Závislost zvýšení hmotnosti nitridu chromu na čase (Vlevo pro 900 °C, vpravo pro 800 °C [11])

### 1.3.3 Tenká vrstva MgO

M.Z. Khan, Y. Zhao a dalších několik lidí z výzkumných středisek z Finska a Číny se podíleli na výzkumu tenkých vrstev oxidu hořečnatého nanášeném metodou IBAD. [12]

Oxid hořečnatý se využívá jako supravodič a hodí se pro tvorbu elektrických obvodů. V tomto článku byla zkoumána funkce mezi rostoucími teploty a tloušťkou filmu v malém měřítku supravodiče YBCO, který byl napařen na základovou vrstvu MgO s přidaným izolantem. Studovali strukturní a supervodivé vlastnosti, protože si myslí, že jsou důležité pro práci s magnetickým polem. [12]

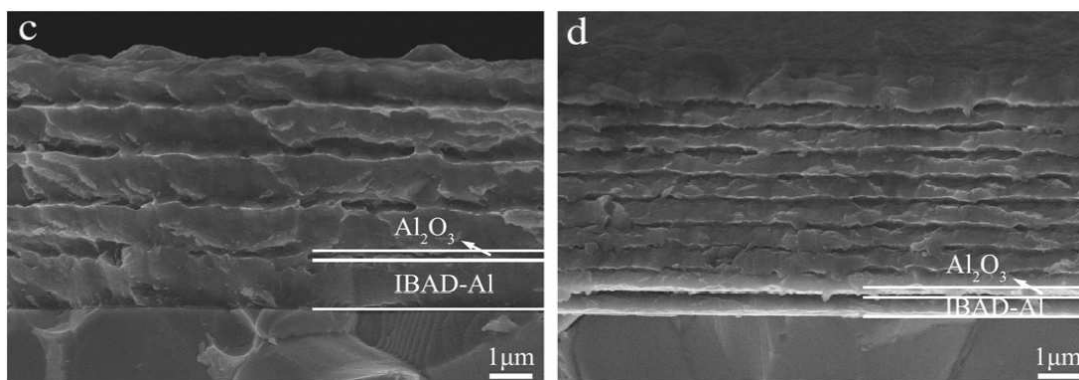
Ukázalo se, že tloušťka 200 - 300 nm YBCO supravodiče je optimální pro žádoucí vlastnosti. Mezi nejvhodnější kombinace takto rozměrově malých částí patří MgO na substrátu ze slitiny hastellow C276 (vyráběná v Šanghaji). Předpokládají, že tato kombinace je skvělou alternativou pro optimalizaci a zlepšení nyní používaných vrstevových struktur pro budoucí povlaky vedení proudu. [12]

### 1.3.4 Tenká vrstva SinX a CrNX

Další článek z Fakulty strojní ČVUT v Praze se zabývá výzkumem tenkých vrstev nitridu křemíku a opět nitridu chromu. Tyto vrstvy byly nanášeny metodou IBAD. Jejich tloušťka se pohybovala kolem 1 - 2  $\mu\text{m}$  a energie iontového svazku byla 90 keV. Použitou ocelí byla AISI 310 a 316. Tyto vzorky byly vystaveny prostředí s nízkým obsahem oxidů a později na vzduchu. Stupeň koroze byl určen gravimetrickou metodou. Pro teploty 700  $^{\circ}\text{C}$  a 800  $^{\circ}\text{C}$  byly vrstvy CrN příznivé z hlediska větší odolnosti vůči oxidaci. Pro teplotu 900  $^{\circ}\text{C}$  již tenká vrstva neměla téměř žádný význam. [14]

U vrstev SiN byly jejich vlastnosti příznivé pro 700  $^{\circ}\text{C}$  i 800  $^{\circ}\text{C}$  (800  $^{\circ}\text{C}$  v článku chybí, ale v závěru tuto informaci uvádějí), ale pro 900  $^{\circ}\text{C}$  také neměly téměř žádný význam. [14]

Filmy nitridu tedy pomohly odolávat substrátům proti korozi ve vysokých teplotách i při malých tloušťkách. Do teplot 800  $^{\circ}\text{C}$  pomáhají vrstvy odolávat korozi po dlouhou dobu vystavenému prostředí. Při 900  $^{\circ}\text{C}$  už bohužel povlaky nemají na ochranu žádný vliv. [14]



Obrázek 1.14: Průřez multivrstvou nanášenou metodou IBAD (c) pět vrstev (d) deset vrstev Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , převzato z [12]

## 1.4 Kluzné chování

Při konstrukčním řešení je důležité brát v potaz třecí síly, které při pohybu dvou vzájemně pohyblivých těles působí proti směru pohybu. Ve vakuu jsou tyto síly větší oproti prostředí atmosférického tlaku. Při řešení konstrukčního problému nás bude zajímat tribologie. Manipulátor se bude v určitých časech pohybovat, což s sebou přináší tření a třecí síly. Tribologie se zabývá třením a opotřebením. Opotřebením vede k následné výměně opotřebeného dílu. [15]

Tření je odpor proti pohybu jednoho tělesa ve styku s druhým tělesem. Dělí se na suché, polosuché (mezní) a kapalinné. V našem případě (v oblasti vakua) se zaměříme pouze na tření suché. Dále se dělí na tření statické a dynamické. Statické tření je takové, kdy jsou dvě tělesa vůči sobě v klidu a my se s nimi snažíme pohnout. Dynamické tření se projevuje, když se tělesa vůči sobě pohybují). Statické tření je zpravidla větší než dynamické. [16]

V této práci se zaměříme pouze na tření smykové.

### Tření smykové

Tření je odpor proti pohybu jednoho tělesa ve styku s druhým tělesem. Dělí se na suché, polosuché (mezní) a kapalinné. V našem případě (v oblasti vakua) se zaměříme pouze na tření suché. Dále se dělí na tření statické a dynamické. Statické tření je takové, kdy jsou dvě tělesa vůči sobě v klidu a my se s nimi snažíme pohnout. Dynamické tření se projevuje, když se tělesa vůči sobě pohybují). Statické tření je zpravidla větší než dynamické.

### Výpočet smykového (suchého) tření

Třecí síla závisí na síle normálové, nikoli na tíze (to pouze v případě na vodorovné podložce) a ani na ploše styku tělesa s podložkou. Třecí síly působí proti směru pohybu. Suché tření je způsobeno nerovnostmi povrchů a adhezí povrchových atomů (projevuje se u čistých kovů **ve vakuu**) [16]

K výpočtu statické třecí síly použijeme vztah

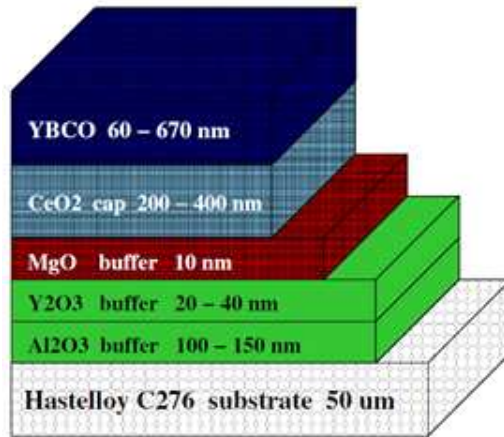
$$F_T = N \cdot f_s \quad (1.3)$$

a k výpočtu dynamické třecí síly dojdeme vztahem

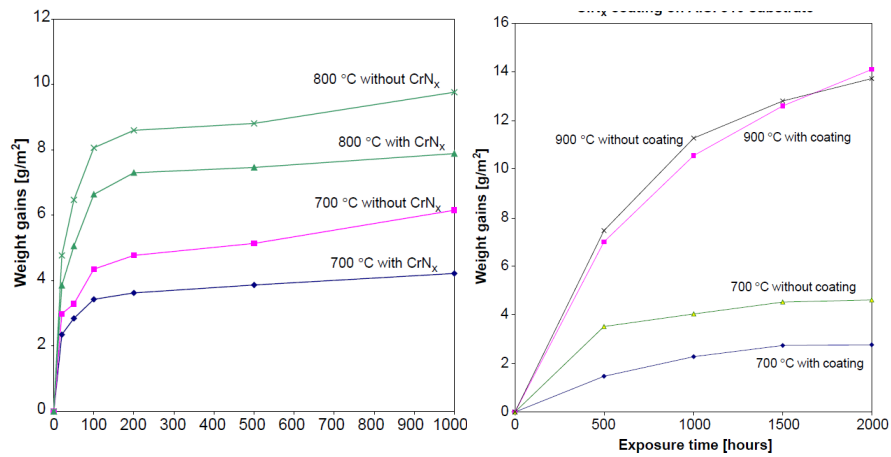
$$F_T = N \cdot f_d \quad (1.4)$$

kde  $F_T$  [N] je třecí síla  $N$  [N] je normálová síla,  $f$  [-] je součinitel smykového tření.

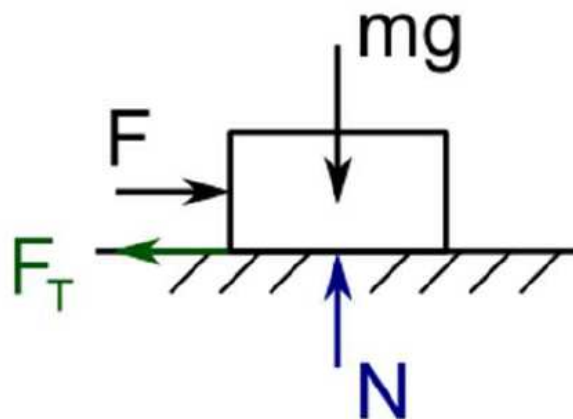
Třecí součinitel  $f$  je ovlivněn drsností povrchu, oxidací, povrchovými vrstvy a mazivem.



Obrázek 1.15: Schématicky zobrazené tenké vrstvy a jejich tloušťky na substrátu, převzato z [13]



Obrázek 1.16: Závislost zvýšení hmotnosti CrNX (vlevo) a SiNX (vpravo) na čase [14]



Obrázek 1.17: Znázornění třecích sil, převzato z [16]

# Praktická část

V praktické části si přiblížíme daný problém, princip jeho řešení a jeho postup řešení. Před samotným postupem je potřeba zanalyzovat současný stav aparatury a zamyslet se nad konstrukčními nesnázi v daném prostředí.

Cílem práce je navrhnout takový manipulátor, který po určitém čase zamezí nanášení vrstvy na již napařené vzorky a vystaví nanášení další sadu vzorků. Tímto postupem je potřeba nanést vrstvu na všechny vzorku upevněné v manipulátoru.

## 2.1 Požadavky a specifikace konstrukčního řešení

Konstrukční řešení musí být přizpůsobeno požadavkům, které jsou specifické, protože se jedná o povlakovací zařízení a přípravek bude pracovat ve vakuu.

### 2.1.1 Technická specifikata manipulátoru

Manipulátor bude vystaven teplotám -10 až 800 °C. Typický tlak uvnitř armatury se bude pohybovat kolem  $1 \cdot 10^{-7}$  Pa až  $1 \cdot 10^{-3}$  Pa (oblast vysokého vakua). Chemikálie uvnitř komory nejsou předpokládány. Bude vystaven pracovním plynům, běžně argon, kyslík, dusík a běžné atmosféře.

### 2.1.2 Požadavky konstrukčního řešení

Požadavky konstrukčního řešení jsou následující:

- Rotace manipulátoru konstantní rychlostí během procesu depozice
- práce při vyšších teplotách do 800 °C
- Práce v prostředí se sníženým tlakem (střední vakuum)
- Práce v atmosférách bohatých na kyslík, dusík a argon
- Řízení procesu polohování manipulátoru
- Vyrobitelnost
- Bezporuchovost
- Uživatelsky přístupné řešení



## Zkrácení časové náročnosti depozičního procesu – příklad

Představme si 24 vzorků v manipulátoru, z nichž se jedna sada skládá ze šesti vzorků. Každou sadu budeme deponovat po dobu 10 minut a chceme dosáhnout 4 různých sad vzorků. Odčerpání komory bude trvat 6 hodin.

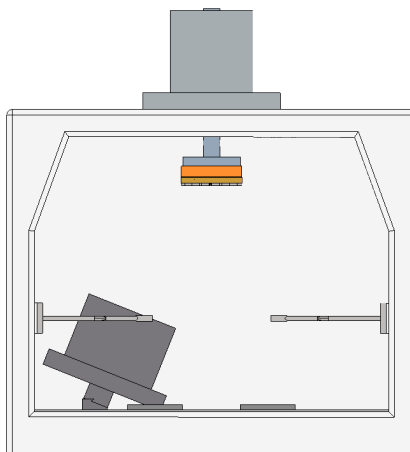
V aktuálním stavu aparatury vysajeme komoru čtyřikrát pro vytvoření 4 sad vzorků. Zanedbáme dobu potřebnou na vyjmutí vzorků a jejich výměnu. Pro jednu sadu potřebujeme 6 hodin na odčerpání vzduchu a 10 minut pro depozici. Celý proces je potřeba zopakovat čtyřikrát. Celkový čas je **24 hodin 40 minut**. V případě nového manipulátoru dosáhneme stejného množství sad vzorků za čas **6 hodin a 40 minut**. Důvodem je pouhé jedno odsátí vzduchu namísto čtyř odsátí vzduchu.

Výsledkem řešení je tedy obrovská úspora času. Při těchto podmínkách získáme stejné vzorky 3,7x rychleji.

### 2.1.3 Analýza současného stavu zařízení

Před řešením problému je vhodné zanalyzovat současný stav a zanalyzovat okolní prostředí nového manipulátoru. Nejprve si přiblížíme, co bychom v aparatuře mohli využít k našemu řešení a jakým způsobem.

Pro proces depozice se používá více různých zařízení točících s manipulátorem skrze průchodku. Toto zařízení budu nazývat depoziční hlavou či hlavicí. Na vrchu hlavice se nachází stejnosměrný elektromotor, který rotuje přes hřídel se vzorky. Současné ovládání elektromotoru spočívá v otáčení potenciometrem na požadovanou stranu (pouze manuálně).



Obrázek 2.1: Schéma současného stavu aparatury

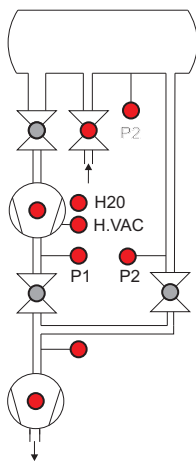
Řízení procesu depozice je neznámo. Proto bude aplikace nového řešení spuštěna na nových zařízeních, které budou sloužit jen pro ovládání rotace a přehazování vzorků.

V komoře se nachází iontové dělo mířící směrem k substrátu. Ve spodní části komory se nachází dva kelímky, do kterých se vkládá nanášený materiál. Nad nimi se nacházejí krystalová čidla (mikrováhy), měřící tloušťku vrstvy. Současný rotační manipulátor najdeme v horní části armatury.

V současném stavu je před depozicí každé sady vzorků potřeba vytvořit vakuum. Odsávání vzduchu je velmi zdoluhavý proces v řádu několika hodin (odvíjí se

podle kvality vakua). Vakuum je měřeno tlakoměry na střední a hrubé vakuum. V následující době se uvažuje nad přidáním dalšího tlakoměru měřící vysoké a ultra-vysoké vakuum. Vakuum tvoří dvě vývěvy. Nejprve dvoustupňová rotační vývěva, která má za úkol předčerpat vakuum. V oblasti vysokého/nízkého vakua se pomocí pneumatických ventilů přepne obvod odčerpávaného vzduchu a vzduch se odčerpá skrze rotační vývěvu společně s turbomolekulární vývěvou.

Vnitřní stěny aparatury jsou pokryty plechy, které stíní aparaturu před nanášením materiálu mimo substráty.



Obrázek 2.2: Vizualizace vakuového obvodu aparatury

### 2.1.4 Vytyčení požadavků na úpravy zařízení

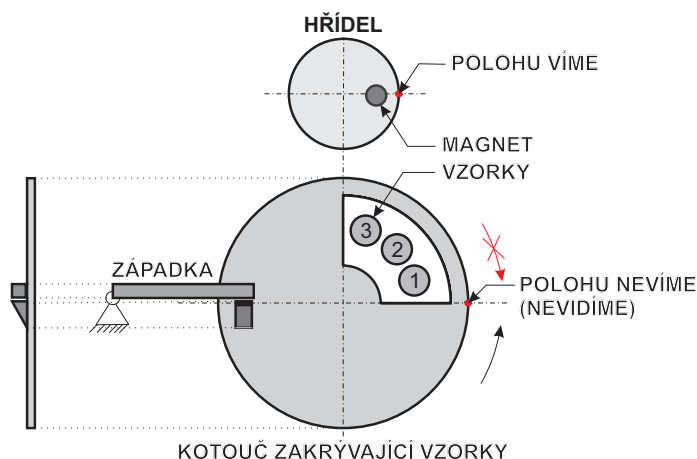
Pro aplikaci nového řešení rotačního manipulátoru, je potřeba využít PLC (Programovatelný logický automat), který bude proces automatizace řídit. K PLC je vhodné připojit dotykový panel, skrze který lze zadávat data a parametry dalšího nanášení. Skrze zpětné vazby z mikrováhy je PLC schopno zjistit, kdy dochází k napařování a kdy nikoli. Nemá problém stopovat čas či dopočítat tloušťku vrstvy. Na hřídel vyčnívající z aparatury se aplikuje senzor natočení. Zpětnou vazbou tohoto senzoru PLC zjistí natočení hřídele uvnitř komory. K řízení motoru (natačení) je třeba změnit momentální zapojení.

Plech umístěný v horní části aparatury požaduje úpravu pro připevnění držáku západky, aby nemusela být uchycena přímo do stěny samotné aparatury. Současný manipulátor bude kompletně změněn.

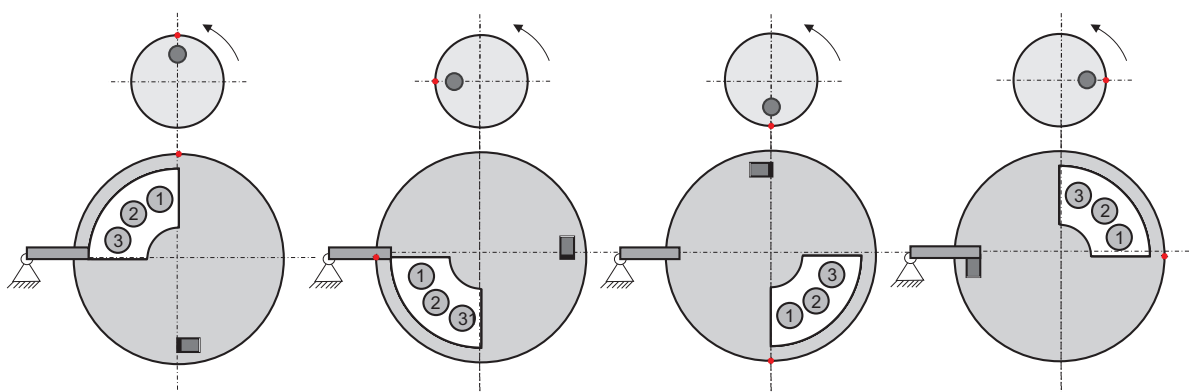
## 2.2 Princip funkce navrženého řešení

Na základě požadavků konstrukčního řešení a po zanalyzování současného stavu jsem navrhl princip řešení využívající západkový mechanismus.

Vzorky se vloží do manipulátoru. Nejprve se vytvoří silné vakuum. Poté začíná proces depozice. V momentu, kdy materiál dopadá na substrát získáváme zpětnou vazbu z měřících krystalů v podobě analogového elektrického signálu a elektromotor začíná konstantně otáčet vzorky spolu s kotoučem v jednom směru. V tento moment se začíná měřit čas depozice.



Obrázek 2.3: Schéma principu funkce navrženého řešení

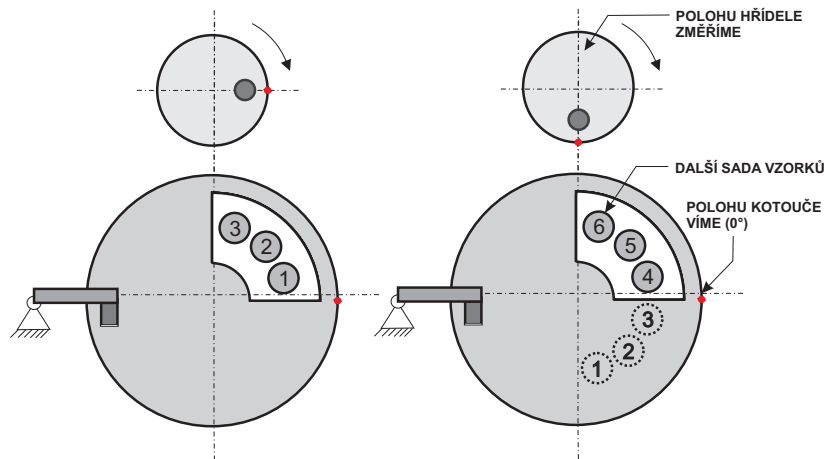


Obrázek 2.4: Schéma principu funkce navrženého řešení - proces napařování

Po dosažení určitého času či určité tloušťky deponované vrstvy je elektromotor přepnut na druhý směr otáčení. Je důležité otočit o více než jednu otáčku, aby došlo ke kalibraci polohy. Vzhledem k západkovému mechanismu se v tomto okamžiku neotáčí celá jednotka, ale jen talíř. Nyní víme, že talíř je v základní poloze (nemůže se otáčet zpět a zarazí se na úhlu  $0^\circ$ ). Odměří se požadovaný úhel pootočení držáku vzorků vůči kotouči s dírou, který zakrývá ostatní vzorky. Tím je odkryta další várka vzorků.

Poloha natočení hřídele je měřena pomocí čidla. Stejným principem se operace opakuje až nanesení požadované vrstvy na všech vzorcích. Poté je aparatura napuštěna vzduchem. Nyní lze vzorky vyjmout a testovat jejich vlastnosti.

Při vytváření vzorků nejsme pouze nuceni tvořit stejné vzorky dokola, ale můžeme vytvářet každou sadu vzorku s jinými zadanými parametry. Lze měnit čas napařování, lze napařovat v závislosti na aktuální tloušťce vrstvy, či různě měnit poměr mezi napařovanými dvěma materiály. Při tvorbě vzorků můžeme tvořit jiný typ vzorků prodloužením času, zesílením vrstvy nebo například napařením jiného poměru dvou různých materiálů.



Obrázek 2.5: Schéma principu funkce navrženého řešení - zakrytí stávající sady vzorku náhradou za další sadu

## 2.3 Konstrukční řešení

Následuje samotné konstrukční řešení, od volby materiálu až po finální řízení.

### 2.3.1 Aspekty a pojednání o konstrukčních nesnázích

Před samotným návrhem je třeba se zamyslet nad problémy, které by se mohly vyskytnout při použití navrženého řešení v provozu.

#### Volba vhodného materiálu

Jelikož se celý proces odehrává ve vakuu a ve vyšší teplotě do 800 °C, je potřeba zvolit vhodné materiály. Nevhodnými materiály se pro nás stává Zinek a jeho slitiny (Mosaz). Při nízkém tlaku a vysoké teplotě se z těchto kovů mohou uvolňovat jejich příměsi, tím kontaminovat vakuum a zvyšovat tlak v aparatuře. Z tohoto důvodu tyto materiály nebudeme používat.

Opačné chování však mají nerezové oceli, měď a její slitiny. Tyto materiály využijeme při samotném konstrukčním řešení.

#### Poloha a vzdálenost krycího kotouče vůči vzorkům

Nerovnoměrnému nanášení vrstvy předchází konstantní úhlovou rychlostí držáku vzorků vyvolanou z elektromotoru. Nevhodně zvolená konstrukce a její rozměry by mohly vzorky zastínit, viz. 2.15.

#### Zamezení nanášení vrstvy na funkční části manipulátoru

Je nevhodné, aby se na funkční části (jako jsou závitové dvojice a pohyblivé části) nenanášel materiál z důvodu funkčnosti těchto částí. Tomu lze zabránit vhodně zvolenou konstrukcí manipulátoru.

## Stabilita talíře (náklon)

Při zatížení talíře ve směru, kdy měníme polohu natočení kotouče oproti vzorkům může nastat, že se kotouč vychýlí, viz. Obr 2.18. Tomuto předejdeme vhodně zvolenou konstrukcí našeho manipulátoru.

## Tepelná roztažnost

Při velkých teplotách, v jakých se budeme pohybovat (cca do 800 °C) je třeba počítat s tepelnou roztažností a zajistit tak v pohyblivých místech dostatečné vůle umožňující vzájemný pohyb součástí.

### 2.3.2 Hlavní funkční části konstrukce

Následuje samotné řešení konstrukce rotačního manipulátoru vzorků.

#### Přenos rotačního pohybu

K přepínání polohy natočení manipulátoru je potřeba pohyb zakrývacího kotouče vůči držáku vzorků. Aby nedošlo k narušení vakua, nedojde k přivádění žádných jiných zdrojů pohybu do aparatury, ať už jde mechanický pohyb či jen napájecí kabely od motoru. Snížením kvality vakua by se zhoršila kvalita deponované vrstvy.

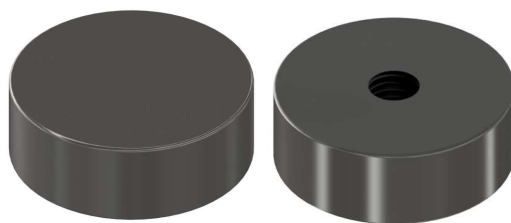
Ve vakuu převládá vysoké tření. Není zde vhodné využívat mazání, které vede ke snížení třecího součinitele (z důvodu možnosti vypařování maziva do prostoru aparatury). Je proto důležité se vyhnout vazelině, oleji a dalším mazivům. Z tohoto důvodu ani neuvažují použití valivých ložisek a v případě nutnosti použití ložisek je nahradím ložisky kluznými.

V aparatuře se je již jeden rotační pohyb vyvoláván. Proto si vystačíme s rotační hlavou, která je v komoře již namontována. Umí se točit dvěma směry. Jedním směrem konstantně rotuje, aby došlo k nanesení rovnoměrné vrstvy. Druhý směr tedy využijí na změnu polohy manipulátoru vůči vzorkům což odkryje další sadu vzorků. Tento mechanismus tedy bude fungovat jen jedním směrem. Navrhnou vhodný západkový mechanismus.

#### Vzorky

S ohledem na optimální konstrukci kotouče zakrývací vzorky je nutné již při návrhu uvažovat jednotný rozměr (rozsah) vzorků. Vzorky používané v novém rotačním manipulátoru budou stejné, jako jsou v současnosti. Vzorek je válcového tvaru o výšce 5 mm a průměru 14 mm. Materiál vzorku je různý (např. titan, ocel). Vzorky mají zespodu díru se závitem a upínají se pomocí šroubu M3 k držáku vzorku.

Momentální návrhy obsahují na talíři 24 vzorků, z toho jedna depoziční várka bude obsahovat 6 vzorků. Po určitém čase/tloušťce vrstvy se talíř pootočí na další tuto várku. Tato várka lze jednoduše změnit a pomocí řídicího systému postačuje nastavit jiný úhel a počet natáčení talíře. Lze vidět na obr. 2.10 Pohled na jednu várku (sadu) vzorků.



Obrázek 2.6: Model vzorku

## Západkový mechanismus a jeho návrh řešení

**Západkový mechanismus** patří do skupiny mechanismů s přerušovaným pohybem. Jedná se o jednoduchý mechanismus, i přesto má své výhody a nevýhody. Dovoluji si vypsát pouze vlastnosti, které nás v našem případě zajímají a zároveň mohou omezovat [17] Nevýhody západkového mechanismu: [17]

- Náročná montáž
- Velké pasivní odpory
- Značné opotřebení funkčních částí
- Hlučný provoz a rázy v mechanismu

Montáží západky do armatury a pasivními odpory se budu zabývat v jedné z dalších kapitol. Hlučný provoz a rázy v mechanismu provoz neomezují. Opotřebení funkčních částí je značně výhodnější oproti zhoršení kvality vakua. K tomuto zhoršení by mohlo dojít přivedením dalších hnacích prvků skrze stěny aparatury. Proto i přes tyto nevýhody, které západkový mechanismus nese, bude uvažováno konstrukční řešení pouze s použitím západkového mechanismu.

**Prvotním nápadem západkového mechanismu** byla aplikace mechanismu podobného náboji zadního kola bicyklu. Rohatky tvoří držák vzorků a západky tvoří část sloužící k následnému upevnění kotouče zakrývajícího vzorky a víčka. Později se ukázalo, že přesnost polohování tohoto návrhu je ovlivněna počtem rohatek. Po obvodu kotouče, který zakrývá vzorky je třeba udržovat konstantní sílu. Tato síla musí být větší, než třecí síla uvnitř mechanismu, aby zpětném směru došlo k přetočení kotouče vůči držáku vzorků. Síla po obvodu kotouče lze vyvolat kotoučovou brzdou. Vzhledem k uvažované nepřesnosti polohování jsem došel k závěru, že toto řešení nebude vhodné. Například pro přesnost natočení půl stupně by musela rohatka mít 720 zubů.

**Nový západkový mechanismus** je tvořen rohatkou a západkou. Na kotouči je shora zarážka sloužící jako rohatka.

Západka je upevněna k vidlici pomocí čepu. Čep je zajištěn pojistnými kroužky vůči axiálnímu posuvu. Celá konstrukce západky je upevněna horní stěně/stropu (základna západky) k přítomnému plechu pomocí čtyř šroubů M6 se šestihrannou hlavou. Další možností úchyty je přiděláním záklapky přímo do armatury.

K vidlici je upevněn dvěma imbusovými šrouby M4 plech kryjící funkční část čepu před napařením, viz.2.8.

Výhodou jediné zarážky rohatky je, že po protočení celého manipulátoru zpět o více než jednu otáčku bude poloha kotouče zakrývajícího vzorky vždy stejná.



Obrázek 2.7: Prvotní model držáku vzorků inspirovaný nábojem kola (vlevo) a kotoučová brzda (vpravo)



Obrázek 2.8: Detail západkového mechanismu a pohled na stínící plech

To lze využít k jednoduchému natočení kotouče do referenčního úhlu. Jelikož do depozičního stroje není zvenku vidět, tohle je řešení k rozeznání polohy natočení, dle obrázku 2.4.

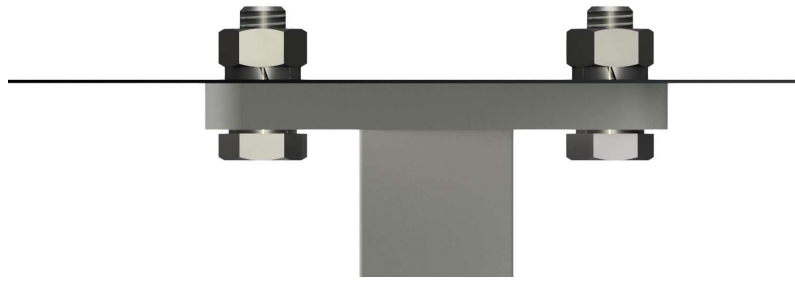
### Kotouč zakrývající vzorky

Zakrývající kotouč zakrývá všechny vzorky, kromě momentálně napařované sady vzorků. Pro tento díl jsem zvolil jako materiál ocel, protože je vhodná do vakua a oproti mědi levná.

Kotouč zakrývající vzorky stíní vzorky před nanesením vrstvy. Zároveň odhaluje sadu, která je aktuálně napařována. Průměr kotouče je 180 mm, výška 4 mm a celková výška je 15 mm.

### Držák vzorků

Držák vzorků upevňuje samotné vzorky. Rozhodl jsem se použít rozměry, jaké jsou momentálně používány v aparatuře, pro kterou řešíme daný problém. Vzorky budou rozmístěny po  $22,5^\circ$  v rozteči 97 mm. Druhá řada vzorků je rozmístěna po  $45^\circ$  na rozteči o průměru 70 mm. Návrh nese celkem 24 vzorků. Každý vzorek je upevněn šroubem M3. Samotný držák vzorků je přichycen dvěma šrouby k vyhřívané části rotační hlavy. Úkolem této součásti je držet vzorky a zároveň mít dobrou tepelnou vodivost při napařování s vyhřívaným manipulátorem. Materiálem této součásti bude měď.



Obrázek 2.9: Upevnění vidlice k plechu



Obrázek 2.10: Pohled na odkrytou sadu vzorků zdola

**Nová verze držáku vzorků** musí být schopna držet kotouč zakrývající (stínící) vzorky. Návrh mého řešení držáku vzorků lze vidět na obr. 2.13

Otvor ve spodní části slouží k aretaci **víčka**. Víčko drží rotační manipulátor pohromadě. Ve víčku se nachází díra pro šroub s vnitřním šestihranem a excentrická díra s vnitřním závitem. Do excentrické díry je našroubován šroub M4 se zápusťnou hlavou. Tento šroub zajišťuje, že se víčko vůči držáku vzorků nemůže potočit. V případě nepojištění by došlo k povolení šroubu s vnitřním šestihranem, a manipulátor by nedržel pohromadě.

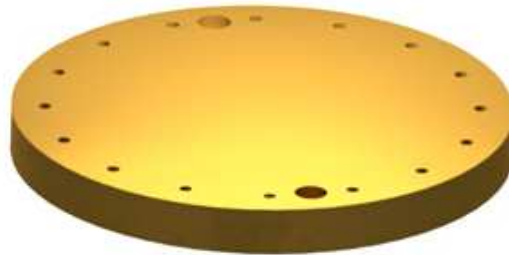
**Excentrický šroub** je našroubován ve víčku, nikoli v držáku vzorků. V držáku vzorků je pouze nasunut dovnitř díry. Víčko je nízké a má sražené hrany pod velkým úhlem, aby nedošlo k zastínění vzorků víčkem či šroubem.

Celé sestavení manipulátoru spočívá v nasunutí kotouče, který zakrývá vzorky spolu s víčkem. Sestavení celého manipulátoru je uživatelsky přívětivé a stačí pouze nandat talíř zakrývající vzorky s víčkem a zajistit šroubem. Vše je navrženo tak, aby nedocházelo k napařování materiálu na funkční části, jako jsou závitové dvojice a čep západky.





Obrázek 2.11: Model kotouče zakrývající vzorky



Obrázek 2.12: Momentální držák vzorků

### Výpočet třecích sil

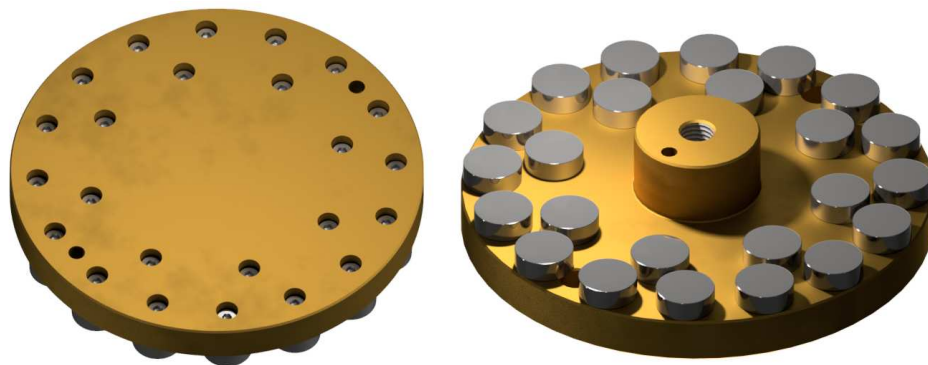
Z teorie vyplývá, že ve vodorovné poloze by měla třecí síla vznikat pouze od tíhy tělesa.

V programu Autodesk Inventor 2019 je přibližný výpočet hmotnosti součásti. Hmotnost talíře zakrývající vzorky je 0,719 kg. Hmotnost západky udává 0,188 kg. Vzhledem k uložení západky (vlevo podepřena talířem, vpravo čepem) uvažuji jako tíhu západky pouze její polovinu (vyplývá ze statiky). Tvar západky napovídá, že tato tíha bude ve skutečnosti ještě menší. Součinitele tření jsou převzaty z [18]

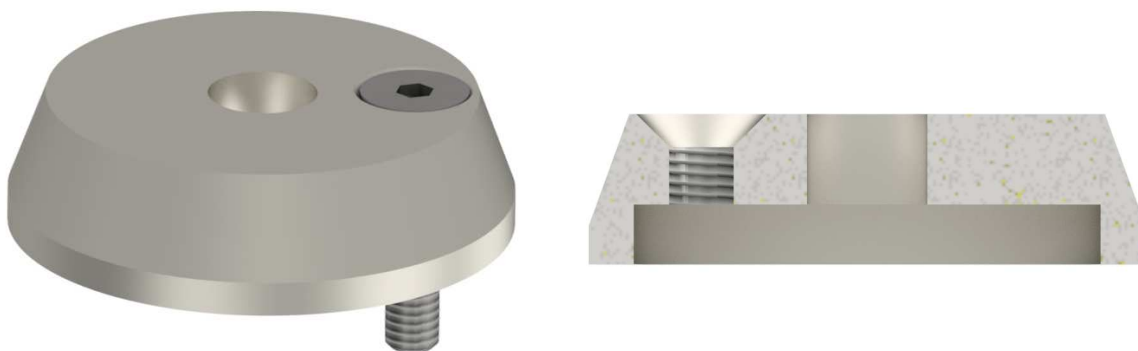
Třecí součinitele jsou převzaty ze zdroje [18]

Třecí součinitel měď/ocel (suché)  $f_{MO} = 0,53[-]$

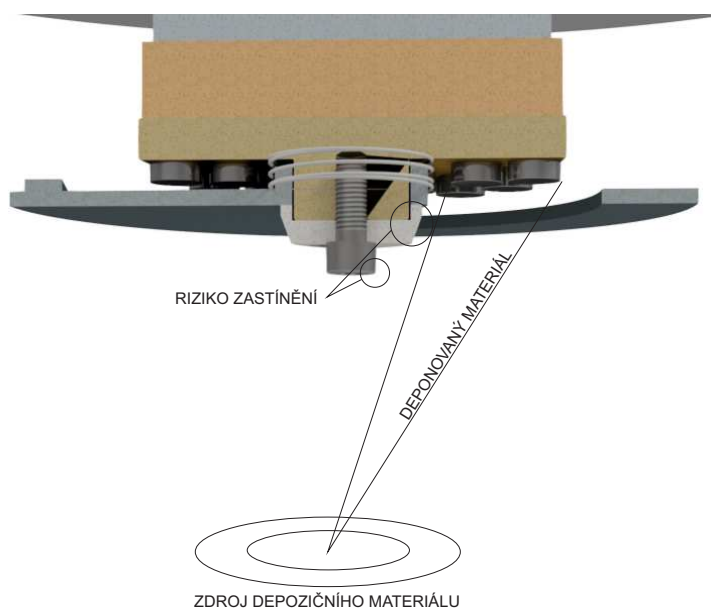
Třecí součinitel ocel/ocel (suché)  $f_{OO} = 0,74[-]$



Obrázek 2.13: Pohled na model nového držáku vzorků s nasazenými vzorky



Obrázek 2.14: Model víčka, boční pohled vlevo a pohled v řezu vpravo



Obrázek 2.15: Rizika zastínění vzorků

Normálová síla působící od kotouče na držák vzorků

$$N_1 = G_1 = m_1 \cdot g = 0,719 \cdot 9,81 = 7,0534 \text{ N}$$

Třecí síla mezi kotoučem a držákem vzorků

$$F_{T1} = f_{MO} \cdot N_1 = 0,53 \cdot 7,0534 = 3,738 \text{ N}$$

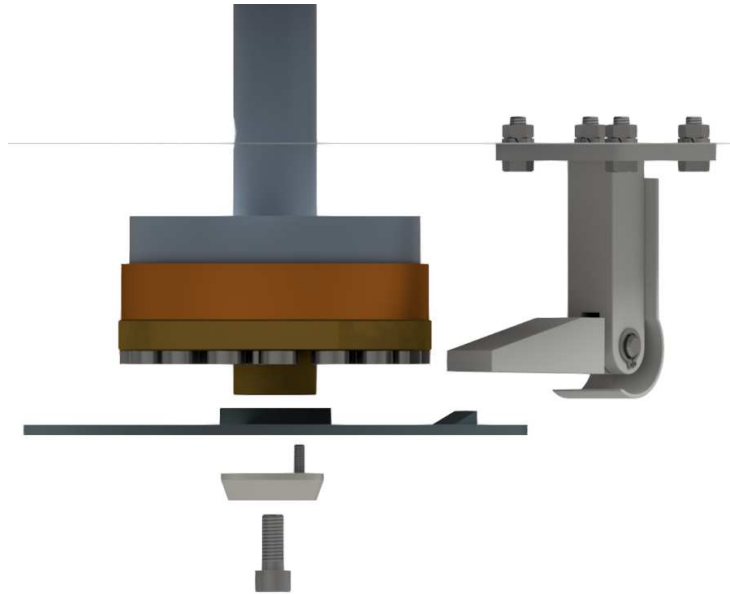
Normálová síla působící od západky na kotouč

$$N_2 = G_2 = m_2 \cdot g = 0,188 \cdot 9,81 = 0,922 \text{ N}$$

Třecí síla mezi západkou a kotoučem

$$F_{T2} = f_{MO} \cdot N_1 = 0,74 \cdot 0,922 = 0,68 \text{ N}$$

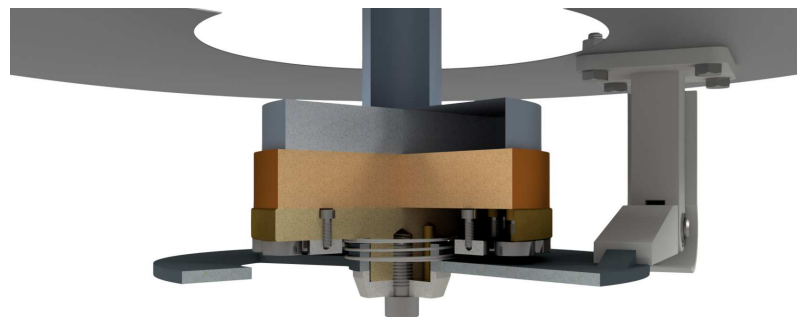
Veličina  $g [m \cdot s^{-2}]$  je gravitační zrychlení o hodnotě 9,81.



Obrázek 2.16: Sestavení manipulátoru před depozicí

$N_1$  [N] je normálová síla od kotouče,  $N_2$  [N] je normálová síla od západky,  $F_{T1}$  [N] je třecí síla mezi kotoučem a držákem vzorků,  $F_{T2}$  [N] je třecí síla mezi západkou a kotoučem

Třecí síla kotouče vůči držáku vzorků je zhruba 5,5x větší než třecí síla západky vůči kotouči. Z toho vyplývá, že se kotouč nebude protáčet z důvodu třecí síly od západky. Podle výpočtu nebude třeba tuto třecí sílu (kotouče vůči držáku) zvyšovat. Pokud by v realitě tento výpočet v realitě ve vakuu neplatil a kotouč by se samovolně protáčel, lze přidat externí sílu, vyvolanou např. pružinou. V případě, že pružina nebude také vyhovovat, lze ji vypodložit podložky ke zvýšení tlačné síly. Externí síla zvýší normálovou sílu vycházející od kotouče na držák vzorků, což zvyšuje třecí sílu.



Obrázek 2.17: Pohled řezem manipulátoru na pružinu

Třecí síla lze snížit kluznými pouzdry. Z důvodu vakua požadujeme bezmazné pouzdro. Dle zdroje [19] jsou nejvýhodnější kluzná pouzdra grafitová. Grafit bude

fungovat jako mazivo až do teploty 790 °C. U tlaků 10<sup>-4</sup> Torr a nižších už nemaže tak dobře. Tento typ pouzdra se zdá být nejvíce vhodný, ale bylo by ho třeba otestovat. Pouzdro by se aplikovalo mezi kotouč a držák vzorků.

### Výpočet tepelné roztažnosti a vychýlení kotouče zakrývající vzorky

Jedním možným problémem, který by mohl nastat, je vychýlení kotouče vůči držáku vzorků. Maximální vychýlení se mění v závislosti na rozdílu průměrů hřídele (válcová část držáku vzorků a díry (otvor kotouče zakrývající vzorky)). Tento rozdíl je závislý na teplotní roztažnosti. Aby nedošlo k tomuto vychýlení, spočítal jsem nejprve skrze teplotní roztažnosti průměry hřídele a díry pro teploty od 0 až 800 °C pomocí vztahu [20]

$$l = l_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)] = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (2.1)$$

Stejným výpočtem je odvozen výpočet ve zdroji [21]

Příklad prvního výpočtu pro 200 °C:

$$d_1 = 30 \cdot [1 + 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot (200 - 20)] = 30,09 \text{ mm}$$

$$D_1 = 31,3 \cdot [1 + 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot (200 - 20)] = 31,38 \text{ mm}$$

$$\Delta d = D_1 - d_1 = 31,38 - 30,09 = 1,29 \text{ mm}$$

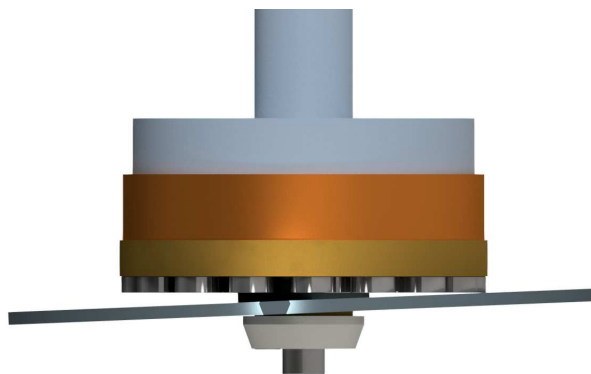
$$\Delta r = \frac{\Delta d}{2} = \frac{1,29}{2} = 0,645 \text{ mm}$$

Koeficienty teplotní součinitele teplotní roztažnosti  $\alpha$  jsou převzány z [22]

$$\alpha_{MĚĎ} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{OCEL} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

Poté jsem spočítal vychýlení kotouče držící vzorky v závislosti na jeho výšce a délce.



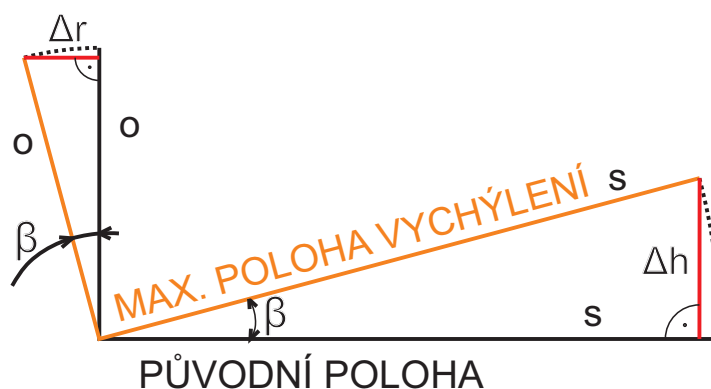
Obrázek 2.18: Vychýlení kotouče

Vztahy vyplývají z goniometrických funkcí.

$\beta$  značí úhel maximálního naklonění,  $s$  je délka části kotouče [mm],  $o$  je výška kotouče [mm],  $\Delta r$  je rozdíl poloměrů hřídele a díry,  $\Delta h$  [mm] je výška, o kterou se zvedne okraj talíře při plném naklonění.



Obrázek 2.19: Vychýlení kotouče v řezu



Obrázek 2.20: Schéma sloužící k odvození výpočtu vychýlení kotouče

Vzdálenost mezi vzorky a kotouče držící vzorky je 4,5 mm. Vzorky a kotouč se nesmějí dotknout. Součinitele tepelné roztažnosti jsou převzaty z [22]

$$s = \frac{D_1 - d_1}{2} = \frac{180 - 31,3}{2} = 74,35 \text{ mm}$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\Delta r}{o}\right) = \arcsin\left(\frac{\Delta r}{o}\right) = \arcsin\left(\frac{0,65}{15}\right) = 2,48^\circ$$

$$\Delta h = s \cdot \sin(\beta) = 74,35 \cdot \sin(2,48^\circ) = 3,22 \text{ mm}$$

Třecí síla

Tabulka 2.1: Vstupní hodnoty k výpočtu třecích sil

T	d	D	$\Delta d$	$\Delta r$	$\varphi$	x
20	30	31,3	1,3	0,65	3,22	1,278
200	30,09	31,38	1,293	0,646	3,20	1,296
400	30,19	31,48	1,285	0,642	3,18	1,316
600	30,30	31,57	1,277	0,638	3,16	1,336
800	30,40	31,67	1,268	0,634	3,14	1,356

Tabulka 2.1 obsahuje vstupní hodnoty k výpočtu třecích sil. T [°C] je teplota, d [mm] je průměr hřídele, D [mm] je průměr díry,  $\Delta d$  [mm] je rozdíl průměrů d

a  $D$ ,  $\Delta r$  [mm] je rozdíl poloměrů hřídele a díry,  $\varphi$  je úhel naklonění kotouče,  $x$  je vzdálenost vzorku od kotouče při maximálním náklonu ( $\varphi$ ). Vzdálenost  $x$  je brána pouze přibližně, protože uvažuji, jako by byl vzorek ve vzdálenosti okraje talíře. Jelikož je blíže, vzdálenost v tomto místě bude ve skutečnosti větší.

Zároveň je důležité, aby tato vzdálenost byla co nejmenší, aby nebyly vzorky stíněny ostatními součásti, viz. Obr. 2.15

## 2.4 Elektrická a řídicí část

Elektronická a řídicí část je zaměřena na vše kolem ovládání rotačního manipulátoru. Nastíním potřebnou elektroniku a princip její funkce.

### 2.4.1 Řídicí systém

PLC bude ovládat celý proces natočení manipulátoru. PLC je programovatelný logický automat, konstruovaný pro použití v průmyslu. Pomocí libovolného programu vykonává specifické funkce (např. logické, sekvenční, čítecí a časové). Má analogové i digitální vstupy a výstupy. Připojením TP (Touch Panel = dotykový panel) lze vizualizovat celý proces.

Důvodem zvolení PLC je jeho vhodné využití v průmyslu a spolehlivost. Vynikají svou odolností a spolehlivostí. Řídit takový mechanismus by ovšem dokázaly i mikrokontrolery, jako je např. Arduino. Mikrokontrolerům se vyhneme, protože jsou mnohem více náchylné na poruchy.

Jako PLC jsem zvolil TECON CLICK z důvodu příznivého poměru ceny kvality a výkonu. Velikou výhodou tohoto PLC je programovací software zdarma. Ten bychom museli u konkurence (např. Siemens) dokupovat [23]. Cena PLC Tecon Click Analog CPU Moduly je zhruba 4 tisíce Kč.



Obrázek 2.21: PLC TECON CLICK Analog CPU Moduly, převzato z [23]

**Program PLC** může mít více modifikací. Dva hlavní by běžely v manuálním a automatickém módu.

**Manuální mód** budeme moci ovládat stiskem tlačítka. Pokaždé, když obsluha stiskne tlačítko, dojde k pootočení manipulátoru a tím k napařování další sady vzorků.

V **automatickém módu** zadá obsluha na začátku programu čas depozice jedné sady vzorků. Nyní obsluha nemusí být přítomna. Ve chvíli, kdy začne docházet k

napařování, začne PLC stopovat čas (Do PLC přijde zpětná vazba od váhového krystalu). Po přednastaveném čase dojde k přepnutí manipulátoru na další vzorky. Celý proces se opakuje, dokud nedojde k nanesení vrstev na všechny vzorky upevněné v manipulátoru. Po nanesení vrstev na všechny vzorky ukončuje PLC proces deponice a na dotykový panel posílá obsluhu zpětnou vazbu o dokončení úkolu. Obsluha nyní může vzorky vyjmout, vložit nové a celý proces opakovat. V tomto módu není problémem zadat také odstupňování, po kterém dojde k přehození vzorků (každá sada se bude napařovat o toto odstupnění později). V lepší modifikaci bude obsluha zadávat požadovanou tloušťku vrstev a PLC jej bude dopočítávat přes senzory měřící tok deponovaného materiálu.

## 2.4.2 Dotykový panel

Dotykové panely Weintek jsou využívány v průmyslové výrobě. Jejich předností je nízká cena a funkčnost. Velikou výhodou je software k produktu zdarma. Tímto panelem může obsluha snadno zadávat parametry deponice a sledovat vizualizaci procesu (například stopování času a tloušťka vrstvy). Uhlopříčka displeje má velikost 7 palců [24]. Cena tohoto panelu se pohybuje kolem 10 tisíc Kč.



Obrázek 2.22: Dotykový panel Weintek 8070ie, převzato z [24]

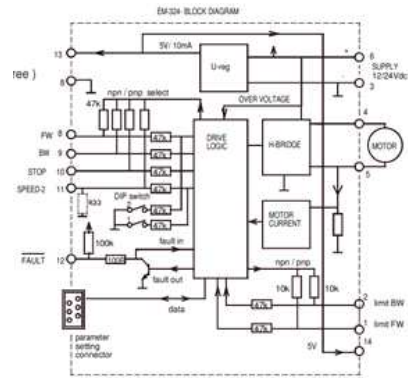
## 2.4.3 Kontroler k elektromotoru

Pro ovládání stejnosměrného elektromotoru pomocí PLC se používá tzv. H-můstek. Připojením elektromotoru k H-můstku a PLC lze elektromotor pomocí PLC ovládat. Lze řídit směr, a rychlost otáčení elektromotoru.

Tento kontroler je určen pro stejnosměrné elektromotory. Do pinů 6 a 3 zapojíme napájení, motor do pinů 4 a 5. Dopředný smysl otáčení (FW-forward) a zpětný smysl otáčení (BW-backward) jsou ovládány piny 8 a 9 [25].

## 2.4.4 Senzor natočení

Senzor AS5048A je magnetický snímač (Desková Hallova součástka). Tento senzor ve spolupráci s neodymovým magnetem měří natočení hřídelů. Pootočením hřídele se mění intenzita magnetického pole, které je zaznamenávání hallovou sondou. Před použitím tohoto senzoru je třeba senzor zkalibrovat.



Obrázek 2.23: Kontroler k elektromotoru a jeho schéma zapojení, převzato z [25]



.eps

Obrázek 2.24: Senzor AS5048A (vlevo) [27] a neodymový magnet [26]

Neodymový magnet bude upevněn na vyčnívající část hřídele, která se otáčí v závislosti na elektromotoru. Výrobce udává nepřesnost natočení 0,5 stupně [19]. Pořizovací cena senzoru AS5048A je kolem jednoho tisíce Kč.



## Závěr

Při řešení této bakalářské práce jsem nejprve na základě úkolu zanalyzoval současný stav aparatury. Rotační motor otáčející s manipulátorem se jeví jako vhodný k přehazování sad nového manipulátoru, protože do armatury nelze přivádět další elektrické zařízení z důvodu vysoké teploty. Jediným přívětivým řešením k dosažení přehazování vzorků je nyní pomocí západkového mechanismu. Na tomto základě jsem navrhl řešení. Velikou výhodou navrženého mechanismu je jeho vlastní kalibrace před každým přehozením vzorků. Další výhodou je, že vydrží požadované tlaky a teploty a tím splňuje všechny požadavky konstrukčního řešení.

Pro řízení procesu jsem zvolil PLC od značky Tecon v kombinaci s dotykovým displejem Weintek a se senzorem natočení od firmy ASM. Při návrhu řešení jsem také aplikoval některé výpočty, pomocí kterých lze předejít nějakým problémům.

Dosažené výsledky vedly ke splnění všech cílů práce.

# Seznam použité literatury

- [1] GÜNZEL, Martin. Metody depozice tenkých vrstev pomocí nízkoteplotního plazmatu. České Budějovice, 2013. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
- [2] HUDEČEK, Jan. DEPOZICE TENKÝCH VRSTEV POMOCÍ IONTOVÉHO NAPRAŠOVÁNÍ IBS/IBAD. Brno, 2015. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR DVORÁK.
- [3] Vakuum erben ERBEN, Milan. *Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií* [online]. Pardubice, 2008 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [https://www.upce.cz/sites/default/binary\\_www\\_old/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf](https://www.upce.cz/sites/default/binary_www_old/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf)
- [4] RUSŇÁK, Karel. [online]. 2013 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/AFY/skripta.fyvtv.pdf>
- [5] *Využití plazmových metod ve strojírenství* [online]. In: . 2012, s. 24 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_6.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_6.pdf)
- [6] *Metody depozice povlaků - CVD* [online]. In: . 2012, s. 19 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_7.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_7.pdf)
- [7] *Tenké vrstvy* [online]. In: PODANÝ, Pavel. 2006, s. 77 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)
- [8] ELUC. *ELUC* [online]. Olomouc [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1429>
- [9] Naprašování tenkých vrstev. *Časopis elektro* [online]. 2013, **2013**(07) [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev>
- [10] Magnetronové naprašování. *Chempoint* [online]. 2012, **2012**, 1 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/magnetronove-naprasovani>
- [11] High temperature oxidation protective chromium-based coatings prepared by IBAD and PACVD methods. *ScienceDirect* [online]. 2009, **2009**, 5 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897209001662>

- [12] Structures and properties of sintered NdFeB coated with IBAD-Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multilayers. *ScienceDirect* [online]. 2012, **2012**, 6 [cit. 2018-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.048>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897212006172?via%3Dihub>
- [13] Improved interface growth and enhanced flux pinning in YBCO films deposited on an advanced IBAD-MgO based template. *ScienceDirect* [online]. 2018, **2018**, 8 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453417301971#bib001>
- [14] High temperature corrosion properties of SiN<sub>x</sub> and CrN<sub>x</sub> coatings deposited by IBAD method. *ScienceDirect* [online]. 2005, **2005** [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897205002379>
- [15] BEČKA, Jan. *Základy tribologie* [online]. In: . 2016, s. 15 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/beckajan/predn\\_design\\_KON\\_I.2.pdf](http://users.fs.cvut.cz/beckajan/predn_design_KON_I.2.pdf)
- [16] *Statika s pasivními odpory - smykové tření* [online]. In: ŠIDLOF, Petr. Liberec, 2010, s. 10 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=184> tření
- [17] *Převody a mechanismy* [online]. In: SVOBODOVÁ, Magdalena. Brno, 2013, s. 12 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY\\_32\\_INOVACE\\_15-17.pdf](http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_15-17.pdf)
- [18] Coefficient of Friction. *Engineer's Handbook* [online]. 2006 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>
- [19] Dry Lubricants for Vacuum Service. *Vac Aero* [online]. Kanada, 2015 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [vacaero.com](http://vacaero.com)
- [20] ŠEDIVÝ, Přemysl. *Teplotní závislost fyzikálních veličin: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku* [online]. In: . s. 44 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/teplota.pdf>
- [21] Temperature and thermal expansion. *BU Physics* [online]. Boston University [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://physics.bu.edu/duffy/py105/Temperature.html>
- [22] Tepelná roztažnost. *Měděné rozvody* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://medenerozvody.cz/tepelna-roztaznost>
- [23] Tecon. *Tecon* [online]. Vrchlábí [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: [https://www.tecon.cz/prod\\_automaty\\_click.php](https://www.tecon.cz/prod_automaty_click.php)
- [24] Wintek HMI. *Shoreline Technology* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://shorelinetek.com/product/mt8070ie>
- [25] EM-324C DC-MOTOR CONTROLLER 12-24V 3/4A. *Electromen* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://electromen.com/en/products/item/motor-controllers/dc-motor-below-10A/EM-324C>

- [26] KT-06-03-N. *Unimagnet* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/322-KT-06-03-N.html>
- [27] AS5048A High-Resolution Position Sensor. *Ams* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://ams.com/as5048a>

# Seznam obrázků

1.1	Schéma pístové vývěvy, převzato z [4]	8
1.2	Schéma membránové vývěvy, převzato z [4]	9
1.3	Schéma rotační vývěvy, převzato z [4]	9
1.4	Schéma dvoustupňové rotační vývěvy, převzato z [4]	9
1.5	Schéma ejektorové vývěvy, převzato z [4]	10
1.6	Schéma difuzní vývěvy, převzato z [4]	11
1.7	Schéma třístupňové difuzní vývěvy, převzato z [4]	11
1.8	Schéma Gaedeho molekulární vývěvy, převzato z [4]	12
1.9	Schéma turbomolekulární vývěvy, převzato z [4]	12
1.10	Schéma principu metody CVD, převzato z [1]	14
1.11	Schéma principu metody PVD, převzato z [1]	15
1.12	Schéma principu metody IBAD, převzato z [1]	17
1.13	Závislost zvýšení hmotnosti nitridu chromu na čase (Vlevo pro 900 °C, vpravo pro 800 °C)	
1.14	Průřez multivrstvou nanesenou metodou IBAD (c) pět vrstev (d) deset vrstev Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
1.15	Schématicky zobrazené tenké vrstvy a jejich tloušťky na substrátu, převzato z [13]	21
1.16	Závislost zvýšení hmotnosti CrNX (vlevo) a SiNX (vpravo) na čase [14]	21
1.17	Znázornění třecích sil, převzato z [16]	21
2.1	Schéma současného stavu aparatury	23
2.2	Vizualizace vakuového obvodu aparatury	24
2.3	Schéma principu funkce navrženého řešení	25
2.4	Schéma principu funkce navrženého řešení - proces napařování	25
2.5	Schéma principu funkce navrženého řešení - zakrytí stávající sady vzorku náhradou za c	
2.6	Model vzorku	28
2.7	Prvotní model držáku vzorků inspirovaný nábojem kola (vlevo) a kotoučová brzda (vpravo)	
2.8	Detail západkového mechanismu a pohled na stínící plech	29
2.9	Upevnění vidlice k plechu	30
2.10	Pohled na odkrytou sadu vzorků zdola	30
2.11	Model kotouče zakrývající vzorky	31
2.12	Momentální držák vzorků	31
2.13	Pohled na model nového držáku vzorků s nasazenými vzorky	31
2.14	Model víčka, boční pohled vlevo a pohled v řezu vpravo	32
2.15	Rizika zastínění vzorků	32
2.16	Sestavení manipulátoru před depozicí	33
2.17	Pohled řezem manipulátoru na pružinu	33
2.18	Vychýlení kotouče	34
2.19	Vychýlení kotouče v řezu	35
2.20	Schéma sloužící k odvození výpočtu vychýlení kotouče	35

2.21 PLC TECON CLICK Analog CPU Moduly, převzato z [23] . . . . .	36
2.22 Dotykový panel Weintek 8070ie, převzato z [24] . . . . .	37
2.23 Kontroler k elektromotoru a jeho schéma zapojení, převzato z [25] . .	38
2.24 Senzor AS5048A (vlevo) [27] a neodymový magnet [26] . . . . .	38

# Seznam tabulek

2.1	Vstupní hodnoty k výpočtu třecích sil . . . . .	35
-----	---	----

# Seznam použitého softwaru

- Autodesk Inventor Professional 2019
- CorelDRAW 2018 (64-Bit)
- ShareLaTeX online editor
- Microsoft Excel 365