



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**NÁVRH MECHANISMU JUSTÁŽE WEHNELTOVA
VÁLCE ELEKTRONOVÉ TRYSKY**

DESIGN OF ADJUSTMENT MECHANISM OF WEHNELT CYLINDER OF ELECTRON GUN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Viktor Franc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Zlámal, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Viktor Franc**

Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Zlámal, Ph.D.**

Akademický rok: 2019/20

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 mechanismu justáže Wehneltova válce elektronové trysky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro správnou funkci termoemisní elektronové trysky je nutné nastavit přesnou pozici Wehneltova válce, elektrody, která určuje emisní vlastnosti trysky. Nastavení pozice musí být přesné a stabilní, jak teplotně, tak mechanicky. Důležitá je také kompatibilita použitého řešení s provozem ve vakuu.

Cíle bakalářské práce:

Proveďte rešerši možných způsobů konstrukčního řešení uchycení Wehneltova válce v termoemisních tryskách. Navrhněte konstrukční uspořádání a vytvořte výkresovou dokumentaci důležitých částí.

Seznam doporučené literatury:

WILLIAMS, David Bernard a C. Barry CARTER. Transmission electron microscopy: a textbook for materials science. Second edition. New York: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-76500-6.

HORÁK, Michal. Charakterizace elektronové trysky. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT v Brně.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku
2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc. ředitel ústavu

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

Abstrakt

Jednou z důležitých komponent termoemisní elektronové trysky je Wehneltův válec a mechanismus jeho justáže. Tato bakalářská práce se věnuje konstrukčnímu návrhu tohoto mechanismu. Dále jsou v práci popsány různé druhy elektronových trysek a principy jejich fungování.

Klíčová slova

Wehneltův válec, termoemise, vakuum, diferenciální šroub, centrování katodového hrotu.

Abstract

One of the essential elements of thermionic electron gun is Wehnelt cylinder and it's adjustment mechanism. This bachelor thesis is dedicated to the design of the mechanism. There are also described different types of electron guns and their function.

Key words

Wehnelt cylinder, thermionic emission, vacuum, differential screw, centering of the cathode tip

Citace

FRANC, Viktor. Návrh mechanismu justáže Wehneltova válce elektronové trysky [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125274>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Jakub Zlámal.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh mechanismu justáže Wehneltova válce elektronové trysky“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a dalších osob v oboru znalých, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích osobnostních práv a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §270 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně, dne 7.5. 2020

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval všem lidem, kteří byli ochotní věnovat mi čas a podíleli se na rozšíření mých znalostí o tématu mé práce. Jmenovitě pak děkuji panu Ing. Radku Čěškovi z firmy Thermo Fisher Scientific Brno, který byl vždy velmi ochotný mi pomoci a předal mi spoustu odborných informací z praxe. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jakubu Zlámalovi, Ph.D. za jeho podporu jak při volbě bakalářské práce, tak i při tvorbě samotné. V neposlední řadě bych rád poděkoval Ing. Ivanu Vlčkovi, Ph.D. a Ing. Jindřichu Machovi, Ph.D. za konzultace konstrukce vakuových komponent. Velké díky patří také mým rodičům za jejich morální podporu.

Obsah

1	Úvod	3
2	Elektronová tryska	4
2.1	Termoemisní zdroj elektronů	4
2.1.1	Katoda termoemisního zdroje	5
2.1.2	Fokusační elektroda (Wehneltův válec)	7
2.1.3	Anoda	8
2.2	Autoemisní zdroj elektronů	8
2.3	Katoda autoemisního zdroje	9
2.3.1	Extraktor a anoda autoemisního zdroje	10
2.4	Termoautoemisní zdroj elektronů	10
2.4.1	Katoda termoautoemisního zdroje	10
2.5	Srovnání vlastností jednotlivých zdrojů elektronů	11
3	Konstrukční požadavky na zdroj elektronů	12
3.1	Vakuum	12
3.1.1	Hrubé a nízké vakuum	12
3.1.2	Vysoké a ultra vysoké vakuum	13
3.2	Materiály vhodné pro výrobu dílů	16
4	Konstrukční řešení mechanismu Wehneltova válce	19
4.1	Požadavky na konstrukci uchycení katody	19
4.2	Kompletní sestava mechanismu	20
4.3	Sestavení mechanismu	20
4.4	Diferenciální šroub	22
4.5	Parametry katody	23

4.6	Držák katody.....	23
4.7	Spojovací šroub	24
4.8	Vnější matice diferenciálního šroubu	25
4.9	Vodící tyče	27
4.10	Wehneltův válec s aperturním otvorem	29
4.11	Upínací šrouby.....	31
4.12	Ochranný klobouček.....	32
4.13	Postup výměny a justáže katody	32
5	Závěr	34
6	Seznam literatury.....	35
7	Seznam příloh.....	37

1 Úvod

Od 17. století se v mikroskopii využívalo k pozorování vzorků výhradně světelných paprsků, proto mluvíme o světelné mikroskopii. To se změnilo někdy koncem roku 1939, kdy se objevily první průmyslově vyráběné elektronové mikroskopy [1]. Hlavním rozdílem mezi světelnou a elektronovou mikroskopií je druh ozařovacího paprsku. V elektronové mikroskopii se místo světelných paprsků používá urychlených elektronů.

Od roku 1939 došlo k výraznému technologickému pokroku, ale principiálně jsou dnešní elektronové mikroskopy velice podobné těm, vyráběným dříve. Jedním ze základních prvků každého elektronového mikroskopu je elektronová tryska, tedy zařízení, jehož úkolem je emitovat a směřovat elektrony, pomocí kterých se sledovaný vzorek osvětluje.

Jedním z prvků elektronové trysky, sloužícím k směřování emitovaných elektronů, je fokusační elektroda, též známa pod názvem Wehneltův válec.

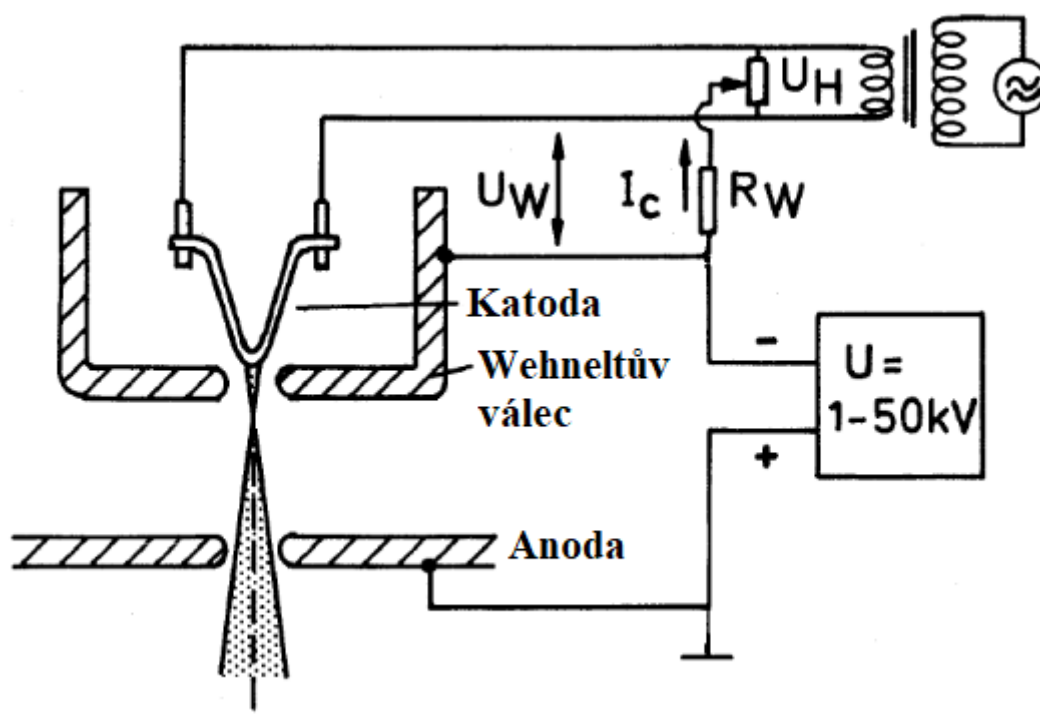
Cílem této bakalářské práce, je konstrukční návrh mechanismu seřízení Wehneltova válce pro použití v elektronové trysce.

2 Elektronová tryska

Elektronové trysky jsou důležitým prvkem přístrojů využívajících elektronový svazek. Významné uplatnění našly v elektronových mikroskopech, elektronových svářečkách, rentgenových zařízeních apod. Existují tři druhy elektronových trysek v závislosti na způsobu získávání elektronů. Prvním z nich je termoemisní elektronová tryska, druhým autoemisní elektronová tryska a třetím termoautoemisní elektronová tryska.

2.1 Termoemisní zdroj elektronů

Termoemisní elektronová tryska je složena z několika menších částí, které lze vidět na obr. 2.1. Každá hraje důležitou roli v emitování či směřování elektronů. První část tvoří katoda, která je zdrojem elektronů. Elektrony opouštějící katodu jsou fokusovány fokusační elektrodou (Wehneltovým válcem) a urychlovány k anodě.

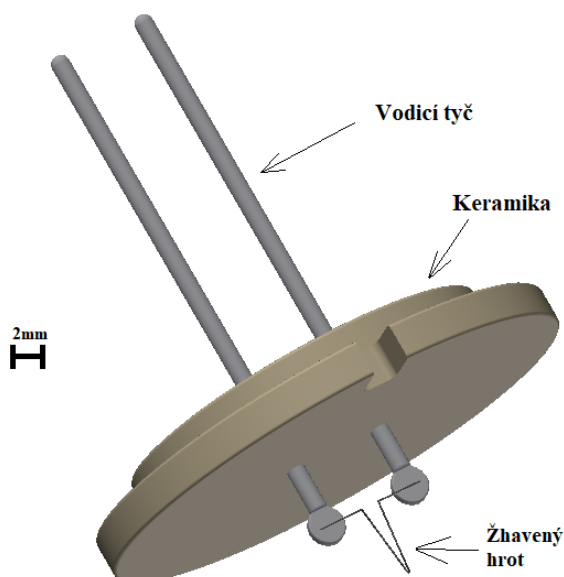


Obr. 2.1: Termoemisní elektronová tryska. Převzato a upraveno z [3].

Elektrony jsou získávány z katody pomocí termoemise. Termoemise je jev, při kterém vlivem žhavení hrotu katody, dochází k nárustu energie elektronů žhaveného materiálu na úroveň, kdy jsou schopny překonávat energiovou bariéru (výstupní práci materiálu) mezi katodou a vakuem.

2.1.1 Katoda termoemisního zdroje

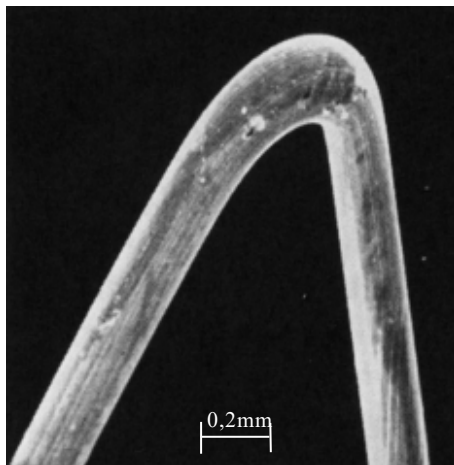
Katodou termoemisního zdroje je myšlen především hrot, který je žhaven na vhodnou teplotu. Hroty termoemisních katod se nejčastěji vyrábějí ze dvou materiálů. Těmi jsou wolfram a hexaborid lanthanu. Wolframové hroty se nejčastěji upevňují pomocí bodování ke dvěma vodícím tyčím, které jsou od sebe elektricky odizolovány keramikou, která také slouží k uchycení katody. Na konce vodících tyčí je přiveden žhavicí proud. Průchodem žhavicího proudu hrotem katody, dochází k zahřívání hrotu. Na katodu je také přivedeno urychlovací napětí pomocí zdroje vysokého napětí, které způsobuje rozdíl potenciálu mezi katodou a anodou. Tento rozdíl potenciálu určuje energii elektronů. Model průmyslově vyráběných katod s wolframovým hrotem zachycuje obr. 2.2.



Obr. 2.2: Katoda

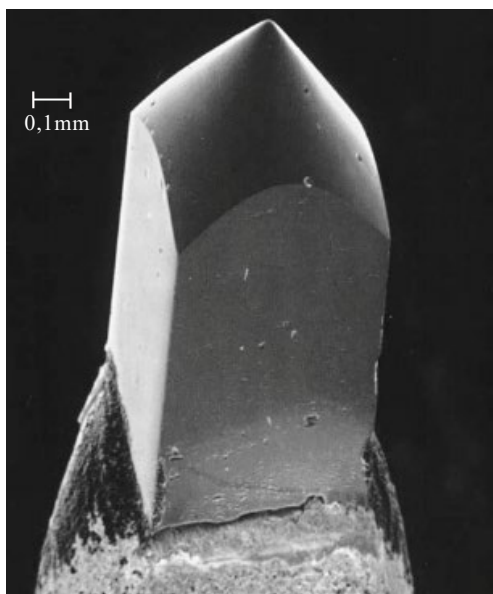
Prvním široce používaným materiálem pro výrobu termoemisních katodových hrotů je wolfram. Ten se tvaruje do drátu o průměru cca 0,2 mm a tvaru písmene V. Detail wolframového hrotu zachycuje obr. 2.3. Aby elektrony překonaly výstupní práci wolframu, je třeba jim dodat termální energii, a proto se wolframový hrot žhaví na teploty okolo 2700 K. Takto vysoké teploty však způsobují odpařování materiálu. To vede ke ztenčování wolframového hrotu až do jeho přerušení [3]. Hlavní nevýhodou těchto hrotů je tedy jejich životnost, která při teplotách okolo 2700 K dosahuje 40-200 provozních hodin. Podmínkou pro to, abychom mohli získat svazek elektronů je, aby okolo wolframové katody bylo vakuum minimálně v řádu 10^{-3} Pa [3]. Díky tomu také

nedochází k rychlé oxidaci hrotu. Mezi výhody wolframových vláken patří vysoká teplota tání 3653 K a nízká cena. Výstupní práce wolframu je $\phi = 4,5 \text{ eV}$ [5].



Obr. 2.3: Katoda z wolframového vlákna. Převzato z [5].

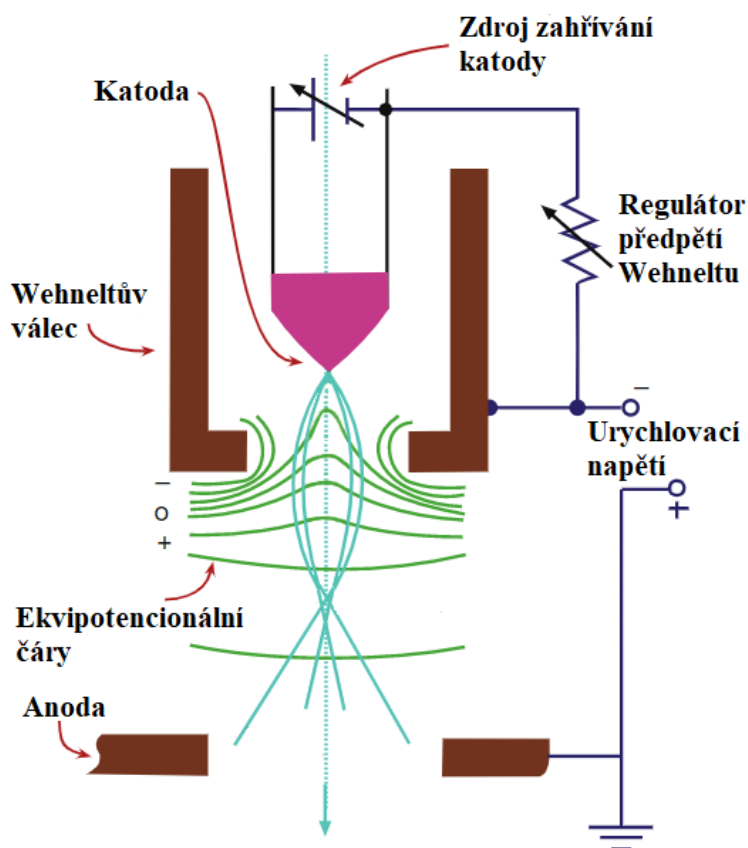
Druhým často používaným materiálem pro výrobu termoemisních katod je hexaborid lanthanu LaB_6 . Snímek hrotu lze vidět na obr. 2.4. Z důvodu menší emitující oblasti hrotu, než je u vláken wolframových, má katoda z hexaboridu lanthanu až 10krát větší jas oproti katodě z wolframu, avšak má nižší emisní proud elektronů [4]. Jednou z hlavních výhod oproti wolframu, je také podstatně větší životnost (v řádech tisíců hodin), která však vyžaduje vyšší vakuum (10^{-4} Pa) než wolframové vlákno (10^{-3} Pa). Další výhodou je, že katodu z hexaboridu lanthanu stačí žhavit jen na teplotu okolo 1900 K. LaB_6 má také nižší výstupní práci $\phi = 2,4 \text{ eV}$, avšak také nižší teplotu tání 2000 K [4,5].



Obr. 2.4: Katoda z hexaboridu lanthanu. Převzato z [5].

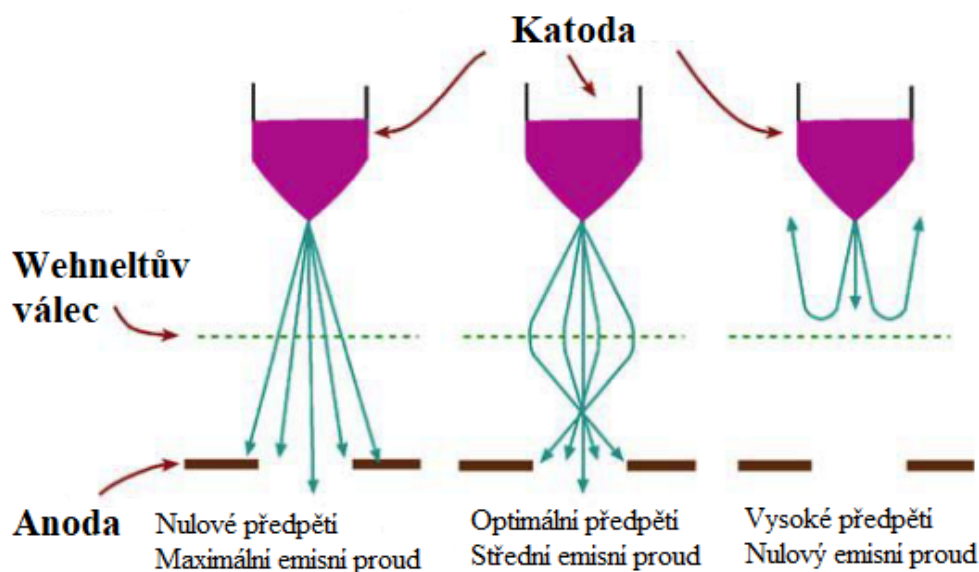
2.1.2 Fokusační elektroda (Wehneltův válec)

Wehneltův válec je ve své podstatě první elektrodou elektrostatické čočky mikroskopu. Je držen na záporném předpětí vůči katodě. Elektrické pole Wehneltova válce a anody, jehož ekvipotencionální čáry jsou viditelné na obr. 2.5, fokusuje elektrony emitované z katody a vymezuje oblast emise elektronů z katody [6].



Obr. 2.5: Princip funkce Wehneltova válce. Převzato a upraveno z [6].

Změnou předpětí Wehneltova válce dojde také ke změně elektrického pole jím vytvářeného. Z toho vyplývá, že bude existovat jistá optimální hodnota předpětí v závislosti na proudu procházejícím katodou, při které budou emitované elektrony nejlépe fokusovány tak, aby jich co nejvíce bylo využito. Tuto závislost zachycuje obr. 2.6 [6].



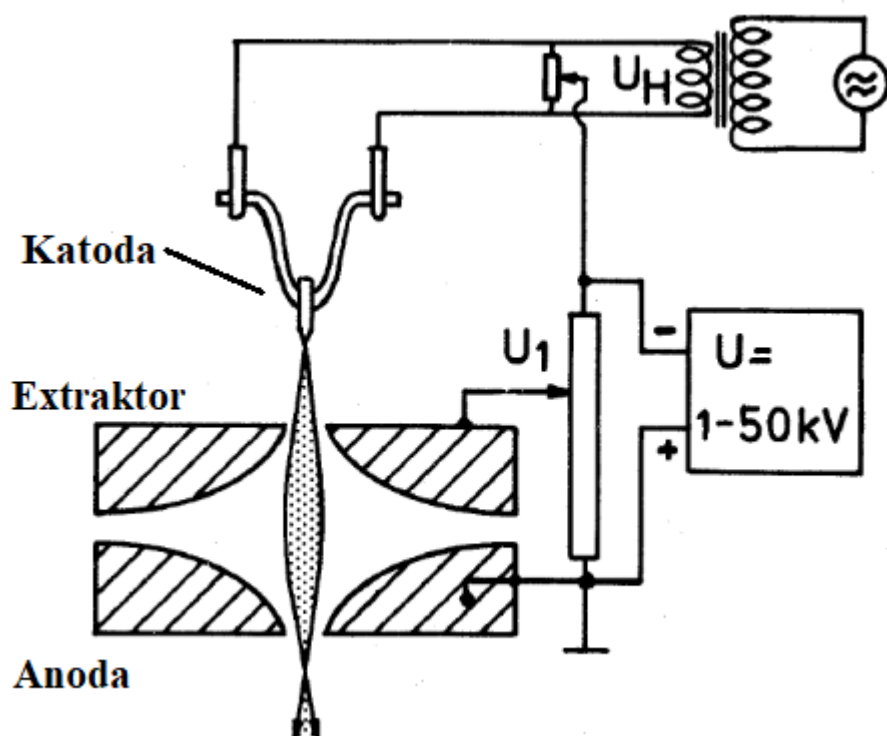
Obr. 2.6: Závislost fokusace na předpětí Wehneltova válce. Převzato a upraveno z [6].

2.1.3 Anoda

Anoda je elektroda, která má kladný potenciál vůči katodě. Z toho důvodu dochází při výstupu elektronů z katody, k jejich urychlování k anodě. Anoda bývá v praxi uzemněná a má uprostřed aperturu, která umožňuje průchod elektronů. Vlivem rozdílu potenciálů mezi anodou a katodou, dochází k prudké akceleraci elektronů. Stanovení energie elektronů se provádí změnou potenciálového rozdílu mezi katodou a anodou [4,6].

2.2 Autoemisní zdroj elektronů

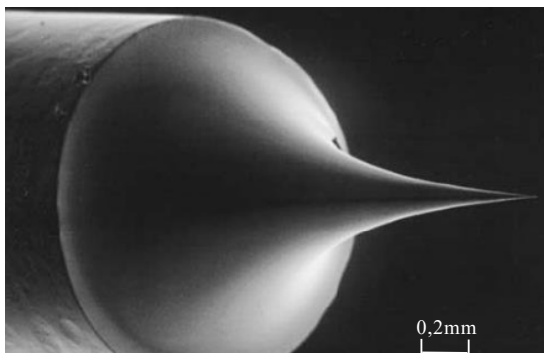
Autoemisní elektronová tryska je v mnoha ohledech odlišná od termoemisní. Je složená z katody, extraktoru a anody, jak je patrné z obr. 2.7. Primárním rozdílem je to, že autoemisní tryska nevyžaduje žhavení katody k tomu, aby elektron překonal výstupní práci. Při emisi se využívá toho, že na povrchu katody je velké elektrické pole, které snižuje potenciálovou bariéru přechodu elektronu do vakua. Roli fokusační elektrody zastává extraktor v kombinaci s anodou.



Obr. 2.7: Autoemisní elektronová tryska. Převzato a upraveno z [3].

2.3 Katoda autoemisního zdroje

Stejně tak jako termoemisní zdroj, využívá autoemisní zdroj jako materiálu katodových hrotů wolframu. Rozdíl je však v jejich tvarování. Pro autoemisní zdroje je důležité, aby hrot byl tvarovaný do špičky s co nejmenším poloměrem, jak ukazuje obr. 2.8. K tomu se využívá leptání například v roztoku hydroxidu sodného, pomocí kterého lze docílit hrotů s poloměry 60-200 nm. Oproti katodám termoemisních zdrojů, potřebují katody autoemisních zdrojů k provozu vakuum v řádu 10^{-9} Pa. Provozní teplota hrotů je zároveň podstatně nižší ($T = 300$ K) díky absenci žhavení [2,5].



Obr. 2.8: Autoemisní katoda. Převzato a upraveno z [6].

2.3.1 Extraktor a anoda autoemisního zdroje

Extraktor je elektroda s kladným napětím několik kV vzhledem ke katodě, vytvářející silné elektrické pole na katodě. Díky tomu ovlivňuje emitující plochu a zastává zároveň funkci fokusační elektrody. Jakmile elektrony překonají výstupní práci katodového hrotu, jsou extraktorem přitahovány [2,6]

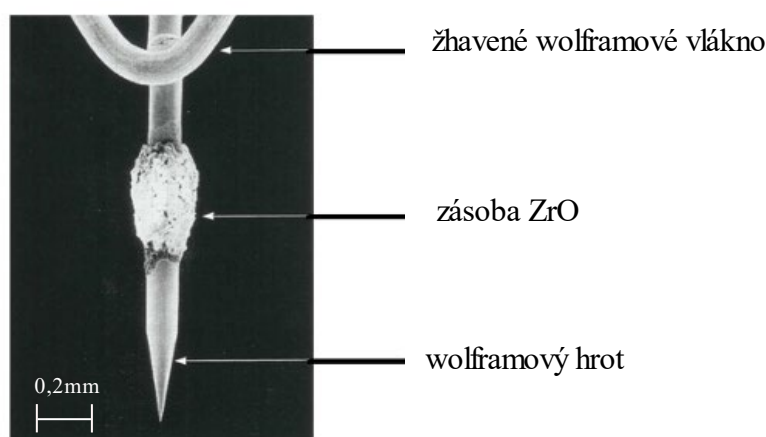
Anoda vytváří ve spojení s extraktorem elektrostatické pole, které fokusuje a urychluje svazek emitovaných elektronů a určuje jejich energii [6].

2.4 Termoautoemisní zdroj elektronů

Tento zdroj je často označován názvem Schottkyho zdroj. Je to speciální případ zdroje kombinující principy termoemise a autoemise. Termoautoemisní elektronová tryska je složena z katody, stínící elektrody, extraktoru a anody.

2.4.1 Katoda termoautoemisního zdroje

Katody u tohoto zdroje jsou tvarovány do hrotu o poloměru 0,1-1 μm . Tento hrot je dobře viditelný na obr. 2.9. Na wolframový hrot je nanesen povlak oxidu zirkonia (ZrO), který snižuje potřebnou výstupní práci z $\phi = 4,5 \text{ eV}$ na $\phi = 2,7 \text{ eV}$. Z tohoto důvodu a také díky faktu, že emise elektronů je zde z velké části zapříčiněna elektrickým polem, není třeba hrot žhavit na tak vysoké teploty, jako je tomu při čisté termoemisi. Katody termoautoemisního zdroje postačí žhavit na teplotu okolo 1800 K, což dodá elektronům dostatečnou energii k překonání výstupní práce [3].



Obr. 2.9: Schottkyho katoda. Převzato a upraveno z [13].

Oproti katodám autoemisního zdroje, nevyžadují katody termoautoemisních zdrojů tak vysoké vakuum. Zároveň u nich nedochází při provozu k tak silné kontaminaci povrchu vyžadující očištění, jak je tomu u autoemisních katod. Je to proto, že termoautoemisní katody jsou na rozdíl od autoemisních katod žhaveny. Vlivem tepla dochází k odpařování kontaminačních látek vznikajících na povrchu hrotů katod v průběhu žhavení. U autoemisních katod při provozu dochází k postupnému poklesu emisního proudu právě z důvodu kontaminace. To musí být vykompenzováno zvýšením napětí na extraktoru, nebo musí dojít k odstranění několika povrchových atomových vrstev, ve kterých došlo ke kontaminaci. Takového čištění se dosahuje pomocí krátkodobého zahřátí vlákna autoemisní katody na teplotu okolo 5000 K [6].

2.5 Srovnání vlastností jednotlivých zdrojů elektronů

Pro přehledné srovnání zmiňovaných zdrojů elektronů poslouží tab. 2.1.

Tab. 2.1: Vlastnosti katodových hrotů jednotlivých zdrojů [2, 6, 9].

Elektronová tryska: Materiál hrotu:	Termoemisní		Autoemisní	Termoautoemisní
	W	LaB ₆	W	W
Teplota žhavení [K]	2700	1900	300	1800
Vakuum [Pa]	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶
Výstupní práce [eV]	4,5	2,4	4,5	2,7
Životnost [hod]	40-200	1000	>5000	>5000
Jas [A/m ² sr]	10 ¹⁰	5 × 10 ¹¹	10 ¹³	5 × 10 ¹²

3 Konstrukční požadavky na zdroj elektronů

3.1 Vakuum

Je velice důležité, aby elektrony emitované z elektronových trysek nebyly srážkami s atomy okolního prostředí vychylovány ze svých původních trajektorií. Toho se dá docílit umístěním katody do vakua.

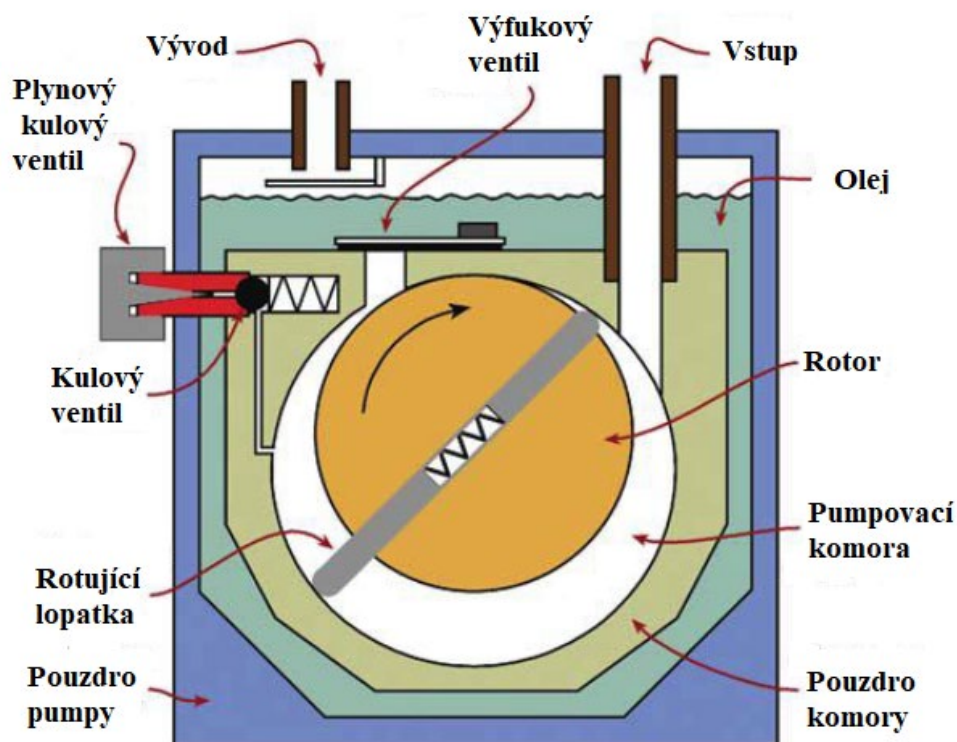
Toto uměle vytvořené vakuum však nikdy není vakuem ideálním, protože nedokážeme z prostoru odčerpat nežádoucí plyny do posledního atomu. V závislosti na zbylém množství nežádoucích plynů po odčerpání pak rozdělujeme vakuum na několik druhů a popisujeme je nejčastěji pomocí tlaku, který zbylé molekuly v prostoru vytvářejí.

K odčerpání plynu se používají vakuové pumpy. Existuje široká škála pump s použitím pro různé rozsahy tlaků a s různými výhodami i nevýhodami, které ovlivňují funkci celého přístroje vyžadujícího vakuum.

3.1.1 Hrubé a nízké vakuum

Prvním stupněm vakua je tzv. hrubé vakuum, což je prostor odčerpáný na tlak mezi 100-0,1 Pa. Těchto tlaků se dosahuje nejčastěji pomocí mechanické rotační pumpy jejíž schéma zachycuje obr. 3.1. Ta je schopna odčerpávat z atmosférického tlaku na tlak v řádu 0,1 Pa. Používá se často k předčerpání hlavně z důvodu její nízké ceny a vysoké spolehlivosti. Nevýhodou je, že je dosti hlučná, při špatném umístění může způsobovat nežádoucí chvění, které zhorší mechanickou stabilitu zařízení. Protože její fungování vyžaduje olej, může také znečistit odčerpávané prostory. Proto je dobré, umisťovat ji mimo místnost, ve které se nachází odčerpávaný prostor a spojit tento prostor s pumpou pomocí trubek s filtrem, který prostor chrání před olejovými výpary [6,7].

Po vakuu hrubém následuje nízké vakuum. Jako nízké vakuum bereme prostor dosahující tlaků od 0,1 Pa do 10^{-4} Pa. K čerpání na tyto tlaky lze využít například turbomolekulární pumpu, o které se podrobněji zmiňuje kapitola 3.1.2.

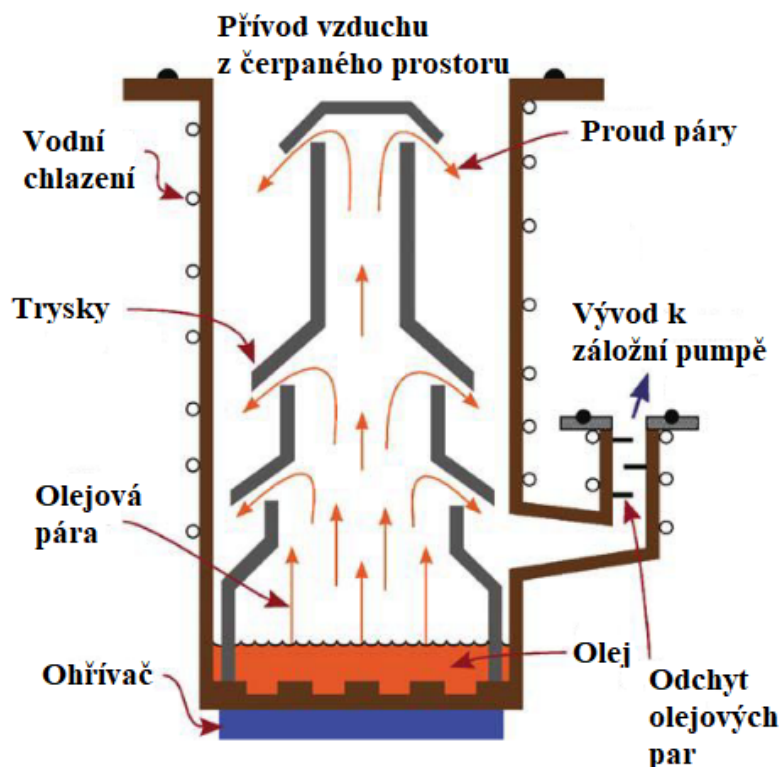


Obr. 3.1: Schéma rotační olejové pumpy. Převzato a upraveno z [6].

3.1.2 Vysoké a ultra vysoké vakuum

Po vakuu nízkém následuje vakuum vysoké a vakuum ultra vysoké. Za vakuum vysoké považujeme prostor odčerpáný na tlak od 10^{-4} Pa až do 10^{-7} Pa a jako vakuum ultra vysoké pak prostor odčerpáný na tlak menší, než je 10^{-7} Pa. Takovýchto hodnot tlaků může být dosaženo pomocí různých druhů pump. Nejčastěji používanými pumpami k vytvoření vakua vysokého a ultra vysokého jsou difuzní pumpy, turbomolekulární pumpy, ionizační pumpy a kryogenní pumpy. Každá z těchto pump má jisté výhody i nevýhody, které charakterizují její vhodnost použití pro dané situace.

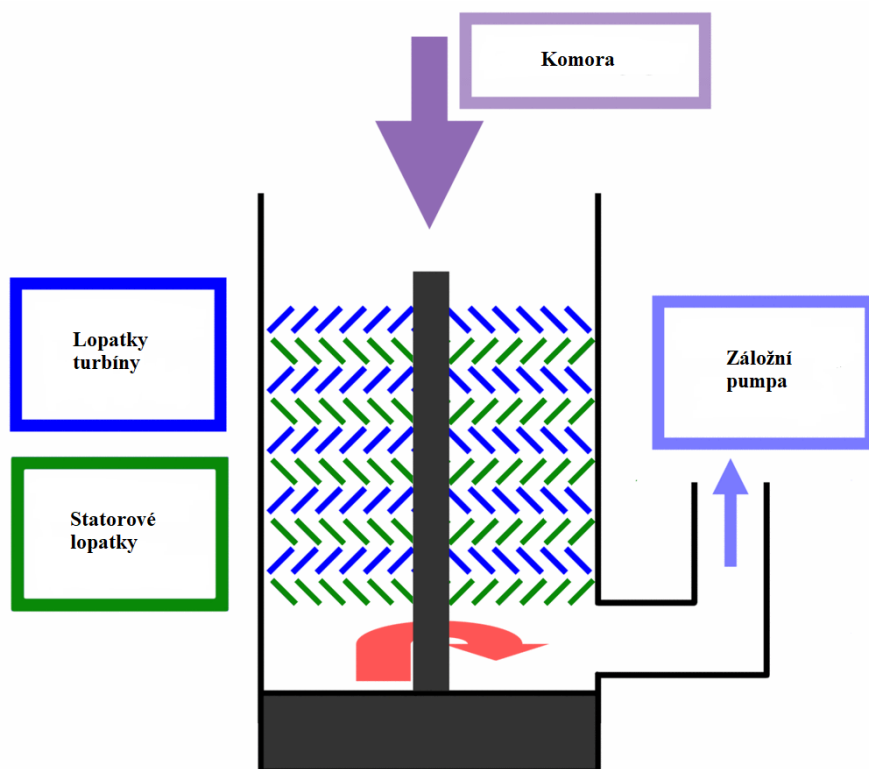
Difuzní pumpy k fungování vyžadují olej, který je ohříván a vytváří páry, které díky svému rychlému proudění strhávají molekuly plynu z čerpaného prostoru směrem dolů k vývodu. Tyto pumpy nemají žádné pohybující se části. Díky tomu jsou dosti spolehlivé, poměrně levné a velmi používané pro elektronové mikroskopy, protože nevytváří vibrace. Schéma difuzní pumpy lze vidět na obr. 3.2. Čerpací rychlost je až 100 litrů vzduchu za sekundu [6], takže jsou velmi efektivní. Dokáží však čerpat vzduch až od tlaku cca 10^{-1} Pa. Nejmenší tlak, které ho jsou schopny dosáhnout je zhruba 10^{-7} Pa [6,9].



Obr. 3.2: Schéma difuzní pumpy. Převzato a upraveno z [6].

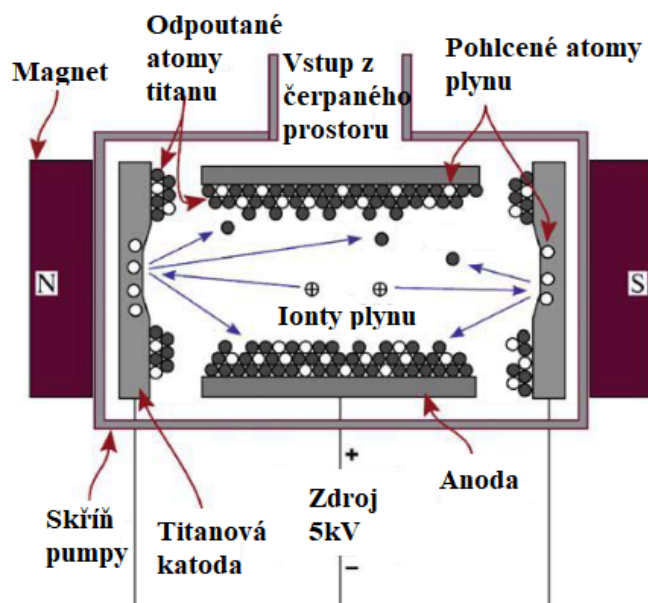
Turbomolekulární pumpy na druhou stranu nepoužívají olej vůbec, ale mají mnoho pohybujících se částí. I přesto je však dnes jejich konstrukce tak pokročilá, že při správném návrhu nepřenáší téměř žádné vibrace. K čerpání plynu využívají principu turbíny, viz obr. 3.3. Dochází ke srážkám chaoticky se pohybujících molekul plynu s rychle rotujícími lopatkami pumpy, které usměrňují molekuly mimo čerpaný prostor. Turbomolekulární pumpy vyžadují předčerpání například pomocí rotační olejové pumpy, protože jsou efektivně schopny pracovat až od tlaku 1-0,1 Pa. Hraniční tlak, kterého jsou schopny dosáhnout, je 10^{-8} Pa. Tento poměrně velký rozsah tlaků je možné získat díky jednoduché úpravě rychlosti otáčení lopatek. V praxi to funguje tak, že při začátku čerpání z tlaku např. 0,1 Pa se lopatky roztáčí pomalu a se snižujícím se tlakem čerpaného

prostoru postupně zrychlují. Díky tomu, že tyto pumpy jsou schopny čerpat napříč nízkým, vysokým a ultravysokým vakuem, patří mezi velmi často používané v různých oborech [7].



Obr. 3.3: Schéma turbomolekulární pumpy. Převzato a upraveno z [8].

Ionizační pumpy k odčerpávání plynů využívají ionizace molekul za pomoci elektronů, emitovaných z katody. Pro prodloužení dráhy elektronů je přítomno magnetické pole. Ionizované molekuly plynu jsou následně přitahovány ke katodě, která bývá pokryta tenkou vrstvou titanu. Ionty plynu mají dostatečnou energii na to, aby došlo k odprášení molekul titanu z vrstvy. Tyto molekuly titanu následně pohltí ionty plynu až do doby, kdy dojde k vypnutí pumpy. Princip fungování ionizační pumpy lze také vidět na obr. 3.4. Výhodou ionizačních pump je opět primárně to, že ke svému provozu nevyžadují olejové médium a nemají pohyblivé části, tudíž nevytváří vibrace. Jsou však efektivně schopny odčerpávat plynů až od tlaku cca 10^{-3} Pa, proto musí být před jejich zapnutím prostor odčerpán jiným typem pumpy, na což se dá použít například Rootsova vývěva s chladičem, která umožňuje čerpání z atmosférického tlaku až do řádu 10^{-3} Pa [6,7,9].



Obr. 3.4: Schéma ionizační pumpy. Převzato a upraveno z [6].

Stejně tak jako pumpy ionizační, fungují pumpy kryogenní na principu dočasného zachycování molekul plynu. K tomu využívají stěn silně ochlazených pomocí kapalného vodíku nebo hélia, na kterých molekuly plynu kondenzují. Fungují tedy bez nutnosti použití oleje a jsou schopny čerpat prostor z tlaku 1-0,1 Pa až na tlak zhruba 10^{-10} až 10^{-12} Pa. K provozu však vyžadují kompresor, který je zdrojem vibrací [6,7].

3.2 Materiály vhodné pro výrobu dílů

Pro konstrukci částí umístěných ve vakuu je důležité, aby jejich povrch byl co nejhladší. Toho se snažíme docílit proto, že jakákoliv nerovnost povrchu může být místem hromadění molekul odčerpávaných plynů. Molekuly je z takovýchto nerovností pak mnohem těžší odčerpat a dochází tak ke znehodnocení kvality vakua. Z toho důvodu je nutné zajistit vhodnou drsnost povrchu veškerých dílů mechanismu. Povrchy, které přichází do kontaktu s elektronovým svazkem je třeba obrobit na drsnost Ra 0,4. Ostatní povrchy, které do styku s elektronovým svazkem nepřichází (jsou v dostatečné vzdálenosti), postačí obrobit na drsnost Ra 0,8.

Dalším omezením, co se týká volby materiálů, je velmi často použití magnetických polí pro fokusaci elektronů. Pokud by konstrukční prvky byly vyrobeny z magnetických materiálů, mohly by ovlivnit magnetické pole elektronových čoček, což je nežádoucí.

Z toho důvodu, je nutno při konstrukci dbát na tuto skutečnost a konstruovat části, u nichž je ovlivnění magnetickým polem možné, z nemagnetických materiálů.

V případě zařízení využívajících termoemisní nebo termoautoemisní elektronové trysky pak také hraje důležitou roli teplota. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2., tyto trysky využívají katodových hrotů žhavených na vysoké teploty. Pokud by v jejich okolí byly součásti vyrobeny z materiálů náchylných na vysoké teploty (popřípadě pak na náhlé změny teploty), mohlo by dojít k jejich deformaci a tím ovlivnění jejich funkce. Pro konstrukci součástí nacházejících se v okolí zdroje tepla tedy volíme materiály s nízkou tepelnou roztažností a vysokou stabilitou při vysokých teplotách.

Materiálů splňujících výše uvedené požadavky je několik. Mezi ty nejpoužívanější patří nemagnetické nerezová ocel ČSN 17255, titan, díky jeho výborným pevnostním a tepelným vlastnostem a někdy také bronz, který bývá pro zlepšení vlastností poniklován.

Problém s vakuem nastává v momentě, kdy v něm máme zařídit pohyb dvou součástí. Tradičně bychom na plochy obou součástí, které po sobě mají klouzat, nanесли mazivo, která by snížila tření a zajistila hladký chod při posuvu. Využití běžně používaných maziv je však ve vakuu nepříjemné, protože při jejich zahřátí dochází ke vzniku par, které kontaminují čerpaný prostor. Pro řešení tohoto problému, můžeme buďto využít speciálních vakuových maziv s nízkým tlakem nasycených par (např. silikonová maziva, které vydrží teplotu do 470 K), nebo používáme speciálních suchých povlaků (např. povlak dicronite W_2S) [14].

Některé části elektronových trysek jsou připojeny na elektrické obvody, a proto se vyžaduje, aby byly navzájem elektricky izolovány. Dříve se k elektrické izolaci využívalo především sklo. To je však dnes ve většině případů nahrazováno keramickými materiály díky jejich větší mechanické pevnosti, lepším elektrickým vlastnostem a také faktu, že lépe snášejí rychlé změny teploty. Většina keramických materiálů je připravována spékáním při vysokých teplotách. Díky tomu obsahují již od výroby velmi malé množství plynů, což je pro použití ve vakuu žádané. Pro izolování elektrických polí použitých v okolí žhavených katod se nejčastěji užívá keramik z korundu (Al_2O_3). V praxi se z důvodu bezpečnosti používá tloušťka 1 mm keramiky na izolování 1 kV [14].

Veškeré kovové díly, u nichž se předpokládá, že budou umístěny ve vakuu, je nutné odplyňovat. Kovy totiž z důvodu metalurgických procesů obsahují velké množství plynů,

které by po zahřátí mohly tvořit nasycené páry. Největším problémem je voda. Veškeré díly tvořící konstrukční návrh mechanismu justáže Wehneltova válce, popsané v dalších kapitolách této práce, budou po výrobě nejdříve vyčištěny pomocí speciálních přípravků určených pro čištění do vakua. Přesná složení přípravků, si firmy vyrábějící vakuové komponenty pečlivě střeží, ale většina přípravků vždy obsahuje určité množství kyseliny citronové a isopropylenu. Po vyčištění dojde ke složení mechanismu a ten se při ohřevu termoemisní elektronové trysky sám odplyní. Minimální teplota, které díly musí dosáhnout při odplynění je 60° C.

4 Konstrukční řešení mechanismu Wehneltova válce

Cílem návrhu justážního mechanismu Wehneltova válce je zařídit centrování katodového hrotu vůči aperturnímu otvoru ve Wehneltově válci a nastavit vzdálenost hrotu. Součástí řešení není detailní rozbor uchycení celku ke zbytku zařízení, které bude elektronovou trysku využívat, a to z důvodu neznalosti konkrétního přístroje, ve kterém bude mechanismus aplikován.

Nejčastějšími prvky, které se využívají k uchycení elektronových trysek, jsou příruby (viz obr. 4.1) s těsněním. Volba způsobu těsnění příruby je závislá na použitém stupni vakua v trysce. V případě, že se po spoji vyžaduje, aby byl schopen pracovat ve vysokém a ultravysokém vakuu, a aby vydržel vyšší teploty jak 370 K, volí se těsnění kovová. Pokud spoj bude pracovat v oblasti hrubého a nízkého vakua a v teplotách pod 370 K, postačí těsnění z elastomerů. Pro kovová těsnění je běžné, že vyžadují značně větší počet spojovacích šroubů, které příruby stáhnou. K vytvoření dostatečné deformace u kovových těsnění je zapotřebí mnohonásobně větší síly, než jak je tomu u těsnění z elastomerů. Elastomery však na rozdíl od kovových těsnění není třeba měnit po jednom použití, protože mají schopnost vracet se do původního tvaru [14]. Wehneltův válec je k přírubě uchycen ze spodní strany a uchycení i wehneltův válec pracují ve vakuu, takže jejich vzájemné spojení nemusí být těsnící.



Obr. 4.1: Příruba.

4.1 Požadavky na konstrukci uchycení katody

Wehneltův válec, kromě toho, že slouží k fokusaci elektronového svazku, funguje také jako držák katody. V případě termoemisní elektronové trysky s wolframovým vláknem je třeba katodu poměrně často měnit z důvodu její krátké doby životnosti cca 100

provozních hodin. Wehneltův válec tedy musí umožňovat snadný přístup ke katodě a její jednoduchou výměnu.

Při výměně katody však dochází k tomu, že hrot vyměněné katody nemusí být ve správné poloze vůči apertuře Wehneltova válce. To je nežádoucí, protože poloha hrotu vůči apertuře ovlivňuje vlastnosti elektronového svazku. Proto se vyžaduje, aby součástí konstrukce Wehneltova válce byl také mechanismus, který po uložení katody umožňuje seřízení polohy hrotu katody vůči apertuře. Seřízení bývá nejčastěji zabezpečeno pomocí posuvu v rovině rovnoběžné s aperturou (rovina xy) a druhým nezávislým posuvem ve směru optické osy (směr osy z).

Provozní tlak katody je 10^{-4} Pa. Důležitým faktem pro konstrukční řešení je, že výměna i seřízení katody probíhají na vzduchu, tedy po vyjmutí celého Wehneltova válce z elektronové trysky a díky tomu není třeba řešit přenášení pohybů, nutných k justáži, z vnější atmosféry do oblasti vakua.

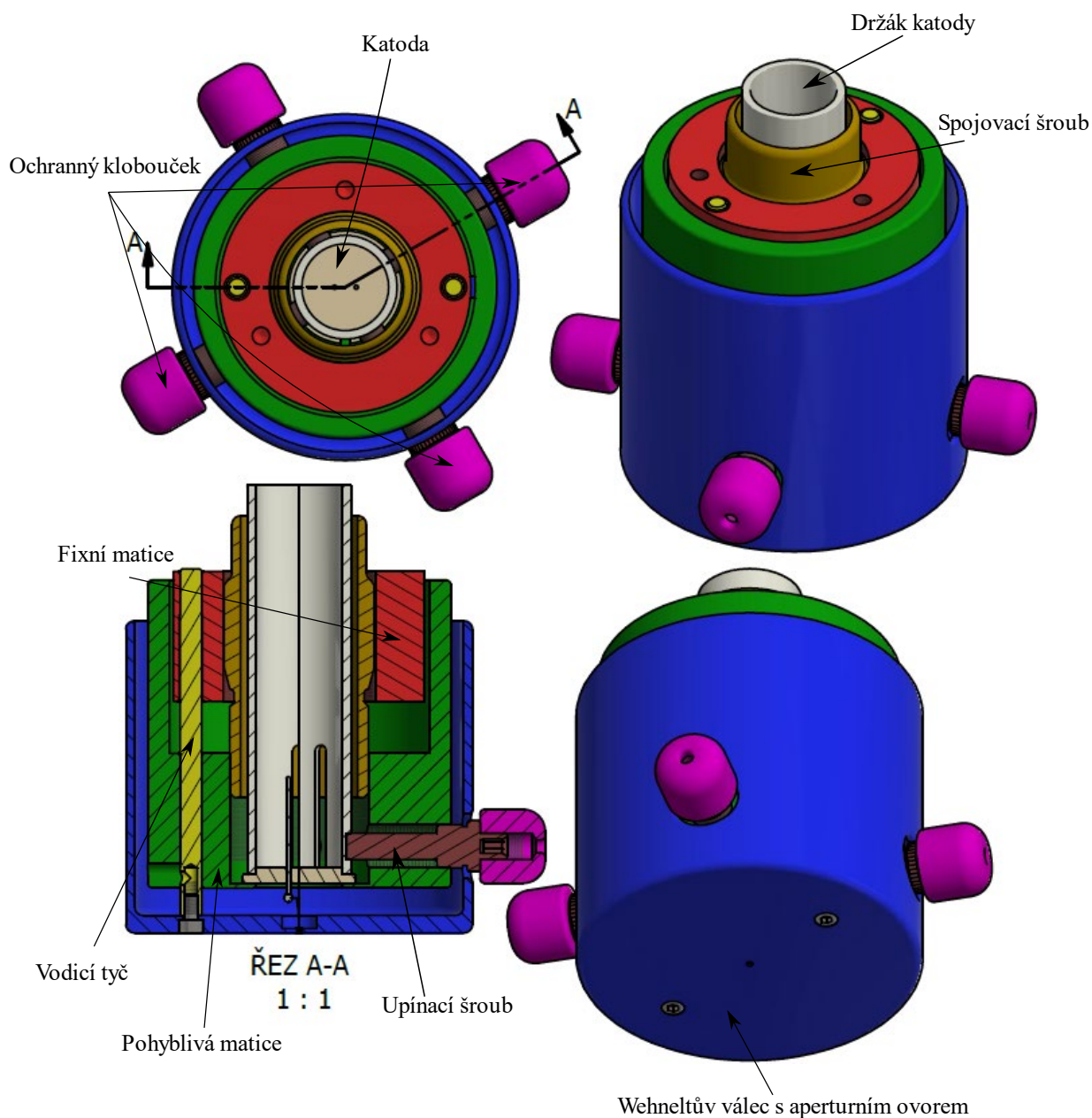
4.2 Kompletní sestava mechanismu

Obrázek 4.2 zachycuje sestavu celého mechanismu s popisem jednotlivých dílů. Mechanismus se skládá z katody, držáku katody, spojovacího šroubu, fixní matice, pohyblivé matice, dvou vodicích tyčí, čtyř upínacích šroubů a samotného Wehneltova válce s aperturním otvorem. Tyto díly budou dále podrobně popsány v následujících sekcích.

4.3 Sestavení mechanismu

Při montáži celého mechanismu je třeba dodržet jistý postup. V první řadě dojde ke spojení fixní a pohyblivé matice pomocí vodicích tyčí a spojovacího šroubu. Vodicí tyče budou do fixní matice nalisovány a následně na ně bude nasazena pohyblivá matice. Při tomto procesu je třeba dbát na to, aby nalisované vodicí tyče měly ventilační otvor umístěný tak, aby korespondoval s vyfrézovanými drážkami na dolní části pohyblivé matice. Poté dojde k zašroubování spojovacího šroubu do vnitřních závitů matic. Tyto kroky se provedou pouze jednou, a to ihned po výrobě. Následně tyto části mechanismu nebude již nutno rozebírat, protože jsou konstrukčně navrženy tak, aby nebránily výměně katody ani případnému čištění apertury Wehneltova válce. Dalším krokem je uchycení Wehneltova válce s aperturním otvorem k vodicím tyčím za pomoci dvou šroubů

ISO 4762 M3x6 a zašroubování čtyř upínacích šroubů do předpřipravených závitových děr v pohyblivé matici. Šrouby je nutno v první řadě našroubovat pouze částečně, aby nebránily vložení držáku s katodou do dutého prostoru uprostřed matic. Po uchycení katody do držáku a vsunutí do dutiny a následném dosednutí katodové keramické plochy na plochu pohyblivé matice tak, aby hrot katody procházel otvorem na spodní pohyblivé matici, dojde k dotažení upínacích šroubů. Upínací šrouby musí dosednout na předpřipravené drážky v držáku a tím uchyťt držák a katodu. Nakonec musí být na přesahující části upínacích šroubů do prostoru našroubovány ochranné kloboučky. Při nutnosti výměny katody pak již postačí povolit upínací šrouby, vytáhnout držák



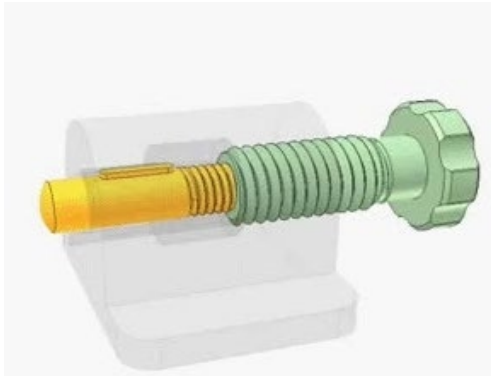
Obr. 4.2: Kompletní mechanismus justáže Wehneltova válce.

s katodou, katodu vyměnit a proces vložení držáku s katodou do dutiny matic a následné upnutí šrouby opakovat.

Veškeré kovové díly mechanismu budou na potenciálu Wehneltova válce. Toho se docílí pomocí přívodu napětí na fixní matici a díky tomu, že ostatní díly jsou na sebe navzájem vázané dotykem, dojde k přenesení potenciálu i na ostatní díly. Na katodové vodící tyče bude přivedeno samostatné napětí pomocí speciálních pružných kontaktů připojených na zdroj žhavení.

4.4 Diferenciální šroub

Posuvy, které je třeba mechanismem justáže Wehneltova válce zajistit, jsou velmi drobné a z toho důvodu náročnější na realizaci. Často se k jejich uskutečnění využívá diferenciálních šroubů. Jejich hlavní výhodou je jednoduchost a s tím spojená nízká cena.

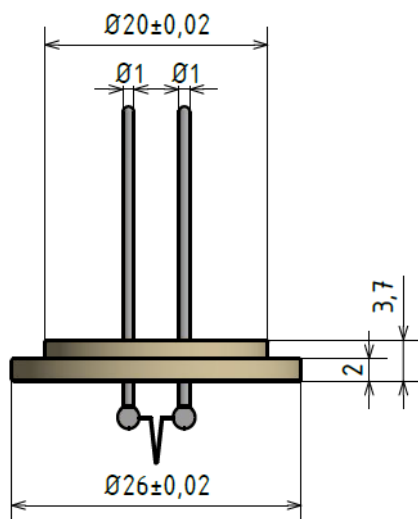


Obr. 4.3: Mechanismus diferenciálního šroubu. Převzato z [10].

Diferenciální šroub je mechanismus složený ze šroubů a matic se závity s různým stoupáním. Princip jeho fungování lze vysvětlit pomocí obr. 4.3. Při otáčení zeleným šroubem dochází k rotaci vnitřního závitu šroubu, do kterého zapadá závit oranžové tyče. To způsobuje vzájemný posuv zeleného šroubu a oranžové tyče. Velikost posuvu závisí na rozdílu mezi stoupáním jednotlivých závitů. To znamená, že pokud vnější závit zeleného šroubu a závit maticové objímky budou mít stoupání například 0,5 mm a vnější závit vodící oranžové tyče a vnitřní závit zeleného šroubu budou mít stoupání například 0,4 mm, dojde při jedné otáčce hlavy zeleného šroubu k posunutí vodící oranžové tyče o 0,1 mm.

4.5 Parametry katody

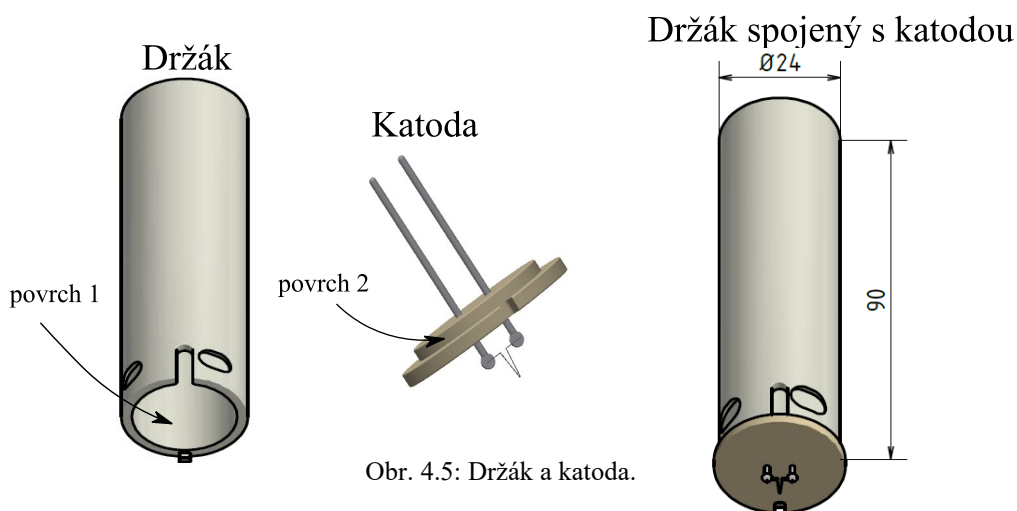
Mechanismus justáže Wehneltova válce je navržen pro použití v termoemisní elektronové trysce využívající průmyslově vyráběných katod s wolframovým vláknem. Tyto katody jsou dostupné například u prodejce TED PELLA s prodejním číslem #1403 pod názvem FEI and Philips Standard V Loop Filaments. Důležité rozměry katody pro návrh držáku zachycuje obr. 4.4, popřípadě je možné je nalézt na stránkách výrobce [15].



Obr. 4.4: Katoda.

4.6 Držák katody

Držák katody je navržen v podobě tenkého dutého válce z nerezové, nemagnetické oceli ČSN 17255. Uchycení katody je zařízení dosednutím povrchu 1 na povrch 2, označenými na obr. 4.5. Povrch 2 katody bývá vyroben s tolerancí $\pm 0,02\text{mm}$. V držáku je vyfrézovaná drážka sloužící ke zvýšení pružnosti dosedací plochy. Díky tomu bude



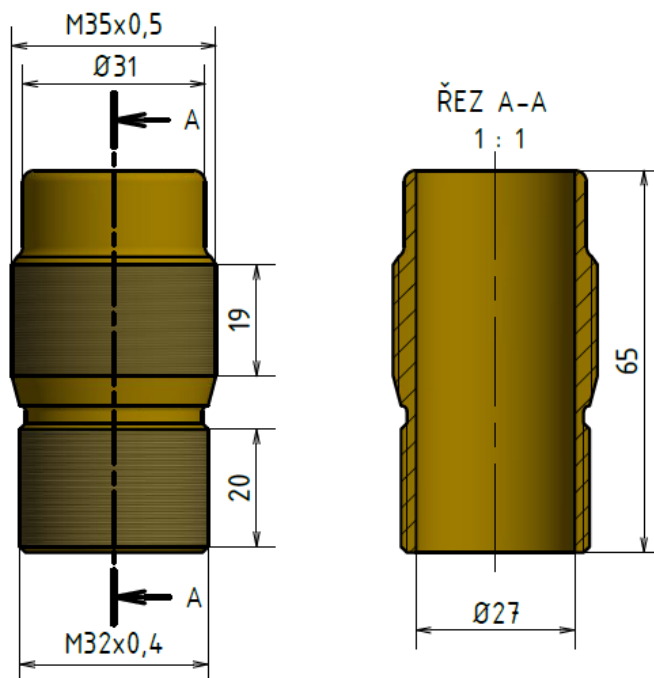
Obr. 4.5: Držák a katoda.

zajištěno snazší uchycení i vyjmutí katody. Výška držáku je volena tak, aby umožňovala jednoduché a bezpečné vložení do dalších částí konstrukčního celku Wehneltova válce. Z principu funkce držáku vyplývá, že při jeho výrobě bude třeba dbát hlavně na přesnost doléhajícího průměru.

4.7 Spojovací šroub

Spojovací šroub viditelný na obr. 4.6, je součást sloužící ke spojení dvou vnějších matic Wehneltova válce. Otáčení tímto vnitřním spojovacím šroubem je zabezpečen posuv jedné z matic ve směru osy z. Na vnějších površích jsou za tímto účelem vyhotoveny dva závity. Oba závity jsou metrické. Větší závit má nominální průměr 35 mm a stoupání 0,5 mm. Nominální průměr menšího závitu je 32 mm se stoupáním 0,4 mm. Šroub je dutý, aby umožňoval průchod držáku s katodou. Držák s katodou má pak uvnitř spojovacího šroubu vůli, díky které může být spolu s katodou centrován v rovině xy, bez toho, aby v tom spojovací šroub bránil.

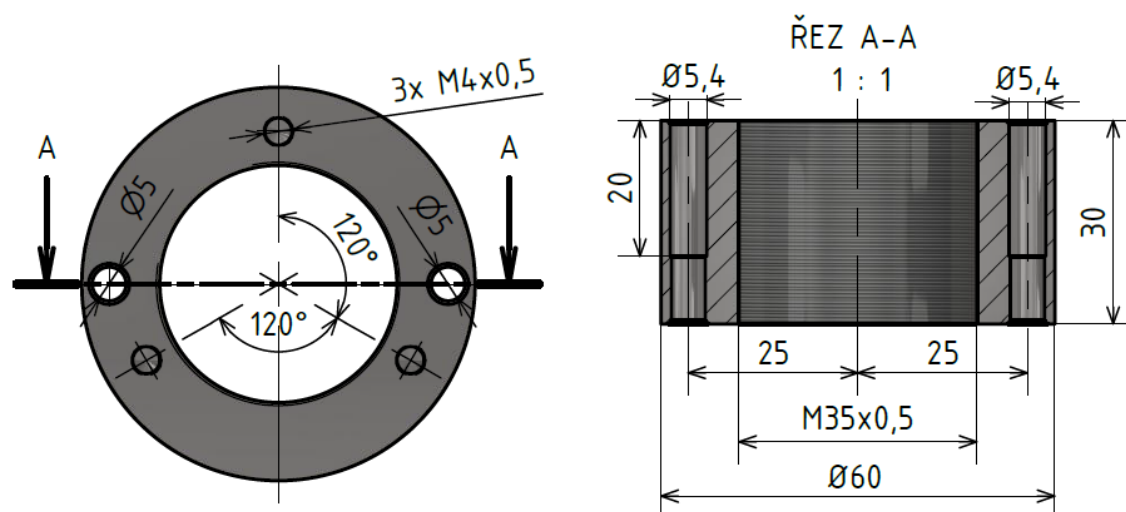
Tento šroub bude vyroben z bronz, přesně pak bude použit materiál CuSn_6 a šroub bude po vyrobení poniklován. Tento materiál je použit s ohledem na nutnost velice dobrého obrobení závitových ploch tak, aby nedocházelo k zanesení apertury Wehneltova válce ostrinami padajícími ze závitových mezer. Důležitý je také fakt, že tento materiál je nemagnetický.



Obr. 4.6: Spojovací šroub.

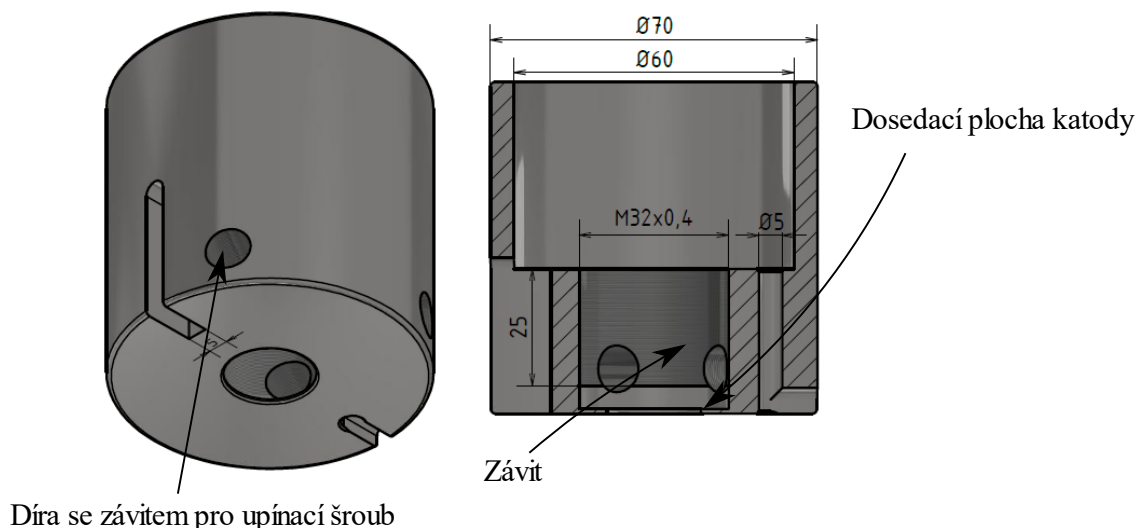
4.8 Vnější matice diferenciálního šroubu

Konstrukční návrh posuvu Wehneltova válce obsahuje dvě vnější matice tvořící společně se spojovacím šroubem mechanismus diferenciálního šroubu. Jedna z matic je fixní (obr. 4.7) a druhá pohyblivá (obr. 4.8). Matice se navzájem nedotýkají, ale jsou spojeny spojovacím šroubem a vzájemná poloha je vymezena dvěma válcovými vodicími tyčemi o průměru 5 mm, které také jistí celou sestavu proti rozpadnutí. Střed obou matic je opět dutý, aby byla zajištěna funkčnost spojovacího šroubu a průchodnost držáku s katodou.



Obr. 4.7: Fixní matice.

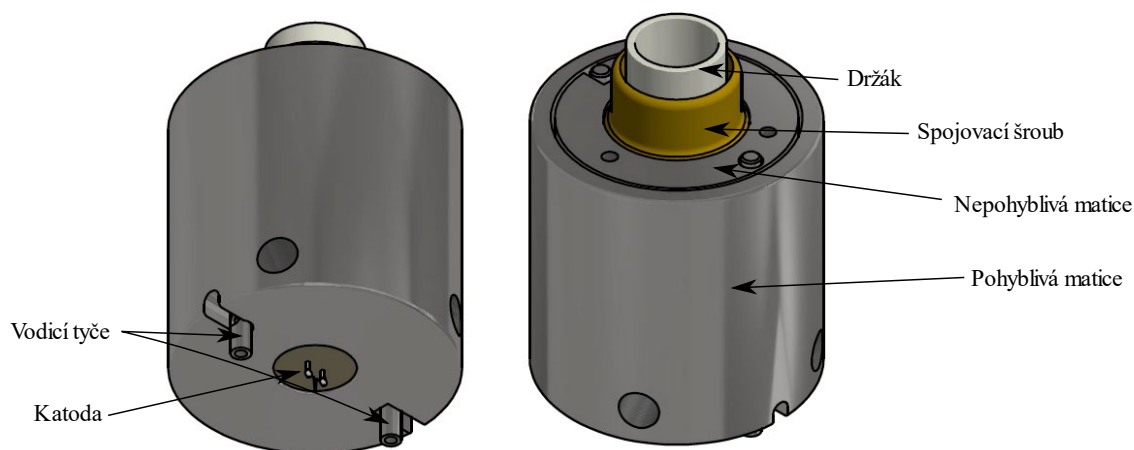
Fixní matice má na vnitřní ploše vyroben závít s nominálním průměrem 35 mm a stoupáním 0,5 mm. Ten zajišťuje spojení matice se spojovacím šroubem. Dále jsou v matici vyvrtány dvě průchozí díry o průměru 5 mm na délce 10 mm a o průměru 5,4 mm na délce 20 mm sloužící pro upevnění vodicích tyčí. Vodicí tyče budou v oblasti díry o průměru 5 mm nalisována. Díra o průměru 5 mm nesmí být vyrobena skrze celou matici, ale pouze do hloubky 10 mm, aby nedošlo k obtížím při zalisování tyčí. Fixní matice také slouží k uchycení celého mechanismu ke zbytku elektronové trysky. Za tím účelem jsou do fixní matice vyhotoveny tři závitové díry M4x0,5.



Obr. 4.8: Pohyblivá matice.

Na vnitřní ploše pohyblivé matice je závit sloužící pro spojení se spojovacím šroubem. Závit má nominální průměr 32 mm a stoupání 0,4 mm. Vodicí tyče propojují fixní matici s pohyblivou, stejně tak jako spojovací šroub. Pro první vodicí tyč je v pohyblivé matici opět vyvrtaná průchozí díra o průměru 5 mm. Druhá vodicí tyč nesmí být v pohyblivé matici uložena stejným způsobem jako tyč první. Způsobilo by to problémy při sestavování celého mechanismu a při pohybu matice. Z toho důvodu musí druhá tyč mít jistou vůli. Za tímto účelem je zde vyfrézovaná drážka, která umožňuje drobný posuv tyče v radiálním směru. Pohyblivá matice bude po tyčích při otáčení spojovacím šroubem klouzat. Z toho důvodu je na spodní část vodicích tyčí nanesen povlak dicronite (W_2S). V pohyblivé matici jsou navíc čtyři průchozí závitové díry M10x0,5 po 90° pro justážní šrouby určené k upnutí držáku katody k pohyblivé matici a jeho centrování. Dále je na konci průchozí díry pro vodicí tyč vyfrézovaná další, menší drážka, jejíž funkce souvisí s konstrukčním prvkem ve vodicích tyčích, o kterém se dále zmiňuje kapitola 4.8. Pohyblivá matice má dno se zúženým otvorem, které slouží k dosednutí plochy keramické části katody. Celková sestava držáku s katodou, obou matic a vodicích tyčí je viditelné na obrázku 4.9.

Pohyblivá i fixní matice jsou vyrobeny ze stejného materiálu, kterým je nerezová nemagnetická ocel ČSN 17255. Při výrobě je kladen důraz hlavně na co nejlepší obrobení všech závitových ploch pro zabránění zanesení apertury Wehneltova válce případnými ostrinami. Dále pak je důležitá přesnost vyvrtání průchozích děr průměru 5 mm pro vodicí tyče.



Obr. 4.9: Podsestava mechanismu.

Kombinací závitů s různým stoupáním v pohyblivé a fixní matici spolu se spojovacím šroubem je zařizován posuv katody ve směru osy z. Pomocí otáčení hlavy spojovacího šroubu dochází k posuvu pohyblivé matice. Velikost posuvu, při otočení šroubem o 360° , je dána rozdílem roztečí vnitřních závitů pohyblivé a fixní matice. V tomto případě tedy jedné otáčky šroubem odpovídá posun $z = 0,5 \text{ mm} - 0,4 \text{ mm} = 0,1 \text{ mm}$ směrem nahoru nebo dolů (v závislosti na směru otáčení šroubu viz obr. 4.10).

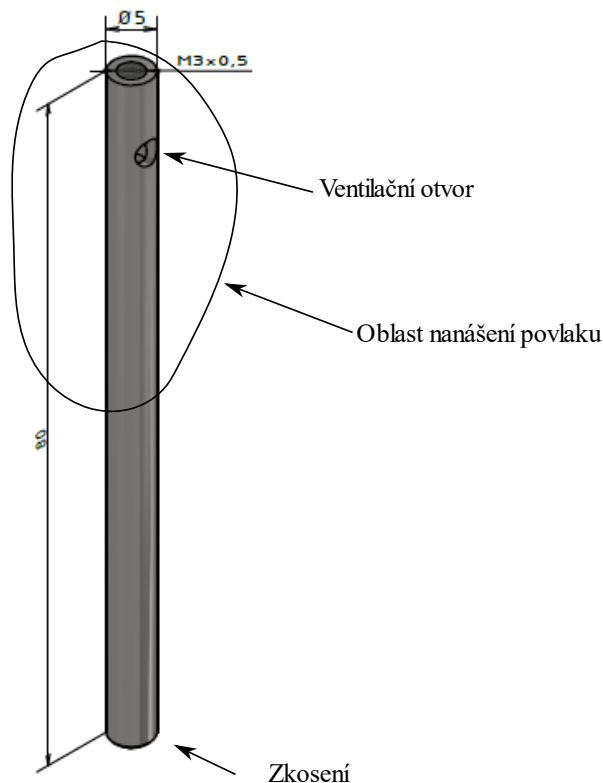


Obr. 4.10: Posuv pohyblivé matice v ose z.

4.9 Vodící tyče

Vodící tyče jsou dvě válcová tělesa o délce 80 mm a průměru 5 mm. Na dolním konci obou tyčí je v jejich středu vyhotoven závit M3x0,5 do hloubky 8 mm. Ten slouží k upevnění obou tyčí k vnějšímu krytu Wehneltova válce, ve kterém je vyroben aperturní

otvor. Celý mechanismus bude při práci vystaven vakuu, a proto je nutné, aby každý neprůchozí závit umožňoval jeho dobré odčerpání. Za tímto účelem je do obou vodicích tyčí v oblasti závitu vyvrtán ventilační otvor o průměru 3 mm. Ten lze vidět i na obr. 4.11. Jeho poloha je volena u konce závitu, protože právě zde se předpokládá hromadění vzduchu po zašroubování šroubu. Na opačném konci vodicích tyčí je vyhotoveno zkosení $0,5 \times 45^\circ$ jehož funkce je čistě bezpečnostní. Snižuje totiž pravděpodobnost pořezání při práci s vodicími tyčemi.



Obr. 4.11: Vodicí tyč.

Obě tyče jsou vyrobeny ze stejného materiálu jako pohyblivá a fixní matice, tedy z nerezové nemagnetické oceli ČSN 17255.

Pohyblivá matice bude po dolní polovině vodicích tyčí klouzat, a proto by bylo nevhodné, aby materiál pohyblivé matice a vodicích tyčí na této oblasti byl stejný, protože ocel ČSN 17255 nemá příliš dobré kluzné vlastnosti. V případě použití stejného mechanismu na vzduchu by se daný problém dal vyřešit pomocí maziva. To zde nepřichází v úvahu, protože mazivo by znečišťovalo vakuum, ve kterém celý mechanismus pracuje. Při nutnosti zařídit kluzný kontakt ve vakuu, se využívá speciálního dicronite (W_2S) povlaku. Jednou z firem, která umožňuje povlakování libovolného povrchu dle zákaznickovy potřeby, je např. STANDA [11].

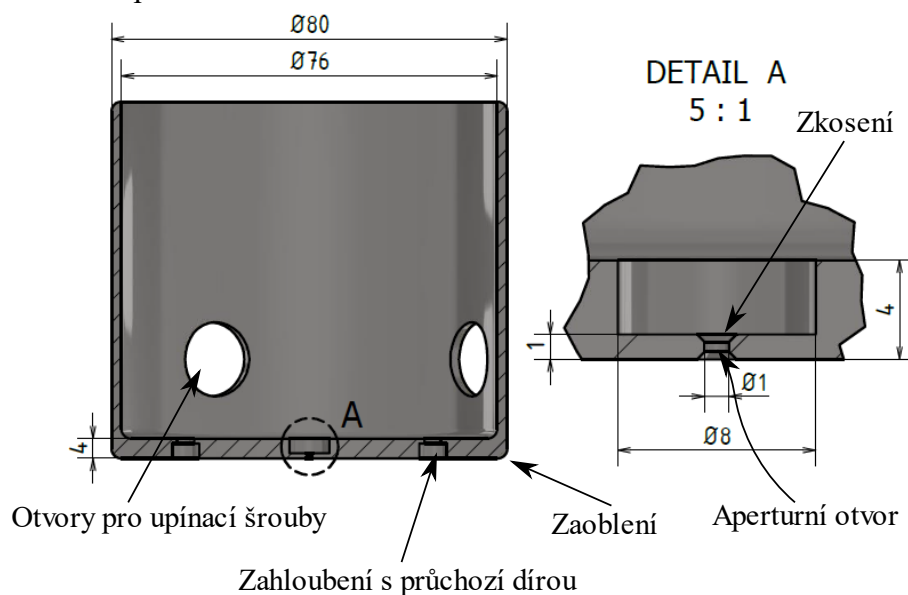
Ve fixní matici musí být vodící tyče uchyceny napevno, aby definovaly polohu pohyblivé matice vůči matici fixní. Z toho důvodu nebude na horní polovinu tyčí nanášen povlak a tyče budou do nepohyblivé matice nalisovány.

4.10 Wehneltův válec s aperturním otvorem

Wehneltův válec obaluje celý mechanismus a má zásadní vliv na fokusaci elektronového svazku. Za tímto účelem je také do něj vyhotoven aperturní otvor o průměru 1 mm s tolerancí $\pm 0,03$ mm, jehož detail je viditelný na obr. 4.12. Aperturní otvor je pak dále na obou hranách opatřen zkosením $0,3 \times 45^\circ$ s tolerancí $\pm 0,05$ mm. Konkrétní tvar aperturního otvoru není předmětem tohoto návrhu.

Ve dně Wehneltova válce jsou vyhotoveny dvě průchozí díry se zahloubením pro šrouby, které spojují vnější kryt a vodící tyče. Ve vodících tyčích je vyhotoven závit M3x0,5. Z toho důvodu musí průchozí díra pro šroub mít dle normy průměr 3,4 mm. S ohledem na zvolené šrouby pro spojení vnějšího krytu a vodících tyčí ISO 4762 M3x6, má zahloubení průměr 5,5 mm a hloubku 3 mm.

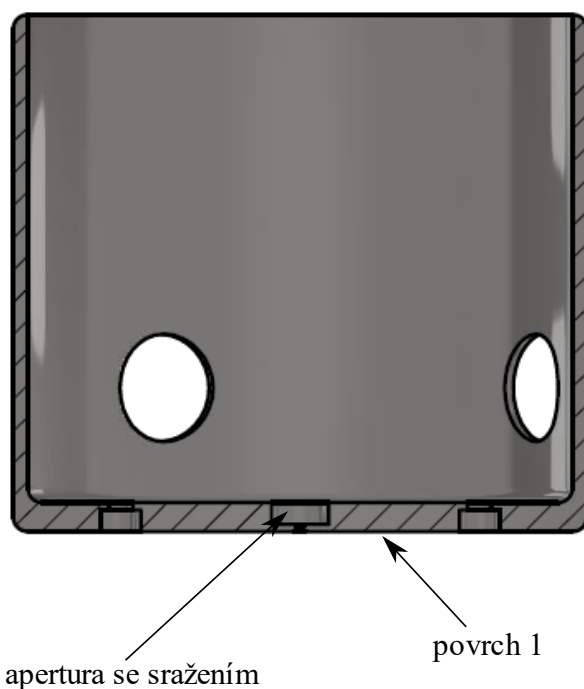
Na boční válcové ploše Wehneltova válce jsou vyhotoveny 4 průchozí díry o průměrech 15 mm. Osy dvou sousedících děr spolu svírají úhel 90° . Díry jsou zde proto, aby byla umožněna manipulace s upínacími šrouby, které jsou zašroubovány do vnější pohyblivé matice a skrze ni k ní upínají držák katody. Přejechod kruhového dna do kolmé válcové stěny je zaoblen s poloměrem zaoblení R2.



Obr. 4.12: Wehneltův válec s aperturním otvorem.

Wehneltův válec s aperturním otvorem bude vyráběn z materiálu ČSN 17255 a to soustružením z plného válcového polotovaru. Tento způsob je volen především s ohledem na ekonomickou stránku výroby. Po soustružení bude třeba obrobit povrchy, které přichází do kontaktu s elektronovým svazkem, tedy vnitřní dno Wehneltova válce a aperturní otvor, na drsnost $Ra\ 0,4$. Zbytek povrchů bude obroben na drsnost $Ra\ 0,8$. Podrobnější informace o obrobení jednotlivých ploch jsou zachyceny ve výkresové dokumentaci, která je součástí této bakalářské práce.

Na Wehneltově válci jsou plochy, které mají velký vliv na elektronový svazek. Těmito plochami jsou povrch 1, viditelný na obrázku 4.13, apertura, a především pak sražení apertury. Výrobní tolerance těchto ploch jsou proto užší než tolerance ostatních částí. Tvar a potřebné tolerance aperturního otvoru by v praxi byly zadány návrhářem elektronově optické soustavy.



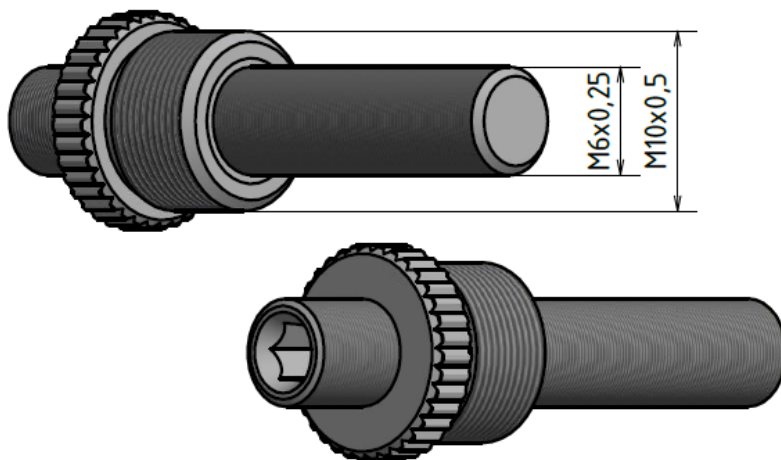
Obr. 4.13: Elektronově opticky významné povrchy Wehneltova válce.

4.11 Upínací šrouby

Součástí justážního mechanismu jsou 4 upínací šrouby. Slouží k upnutí držáku katody k pohyblivé matici a k seřizování polohy katodového hrotu vůči apertuře. Za tímto účelem jsou do držáku katody vyfrézovány 4 drážky o velikosti větší, než je průměr upínacích šroubů na zkoseném konci, které do drážek dosedají. Drážky umožňují, aby každý šroub mohl držákem posouvat bez toho, aby v tomto pohybu další 3 šrouby bránily. Při posuvu držáku jedním šroubem je nutné, aby ostatní tři šrouby byly povolené, především pak šroub protěžší.

Posuv, který tyto šrouby musí dosáhnout, je velice malý, a proto k tomu byly zvoleny šrouby na velmi drobné úpravy (ultra-fine adjustment screws) vyráběné firmou STANDA [11]. Šrouby nesou označení 9SH127BM-25 a jejich hlavní vlastností jsou velice přesné závity s drobným stoupáním M6x0,25. Jejich citlivost, tedy posuv ve směru osy šroubu odpovídající pootočení hlavou šroubu o 1° , je $0,5\text{ }\mu\text{m}$.

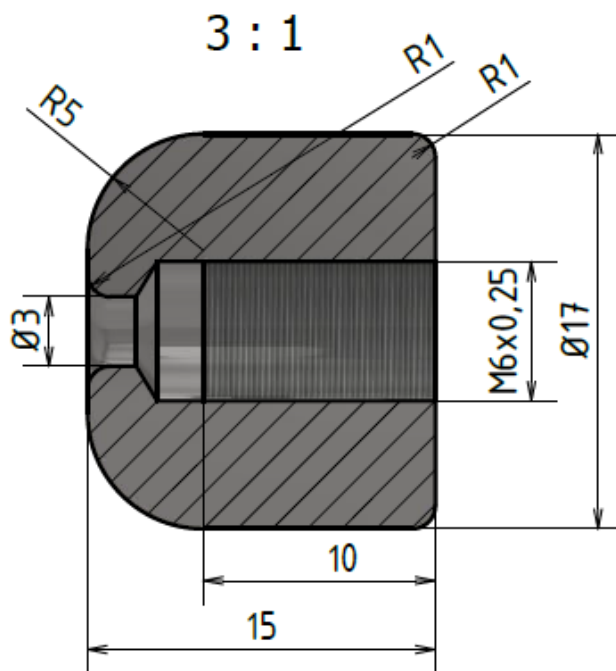
Šrouby jsou vyrobeny z nerezové oceli, která je vhodná pro použití ve vakuu. Ze 3D modelu na obr. 4.14 je viditelné, že šroub má na sobě matici s vnějším závitem M10x0,5, sloužící k upnutí šroubu do předpřipravené závitové díry v pohyblivé matici. Posuv šroubu v této matici je umožněn závitem s drobným stoupáním. Šroub bude utahován a povolován pomocí imbusového klíče velikosti 3, s tím, že axiální síla působící na šroub při utahování nesmí přesáhnout hodnotu 50 N danou výrobcem šroubu. Všechny další detailní informace o upínacím šroubu jsou dostupné na [12].



Obr. 4.14: Upínací šroub od firmy STANDA. Převzato z [12].

4.12 Ochranný klobouček

Všechny kovové díly mechanismu, včetně upínacích šroubů, jsou na určitém potenciálu. Pokud by hrany upínacích šroubů vyčnívaly volně do prostoru, mohlo by docházet k elektrickým výbojům. Proto se požaduje, aby hrany jednotlivých částí, na vnějším obalu mechanismu byly zaoblené a díky tomu došlo k zamezení vzniku výboje. Za tímto účelem budou na koncové hrany čtyř upínacích šroubů přesahujících do prostoru mimo Wehneltův válec umístěny ochranné kloboučky viditelné na obrázku 4.15, jejichž hrany budou pečlivě zaobleny. Ochranné kloboučky jsou opět vyrobeny z nerezové nemagnetické oceli ČSN 17255 a pro upevnění na upínací šrouby mají vyhotoven vnitřní závit M6x0,25. Na konci závitu je vyvrtána průchozí díra, která slouží k snadnějšímu odplynování, aby nedocházelo k hromadění vzduchu na dně závitu v ochranném kloboučku.



Obr. 4.15: Ochranný klobouček.

4.13 Postup výměny a justáže katody

Při nutnosti výměny katody bude nejprve celý mechanismus odpojen ze zařízení odšroubováním tří šroubů spojujících celý mechanismus s přírubou a následně bude mechanismus přemístěn na čisté místo, kde bude položen na stojan, který bude podepírat dolní plochu Wehneltova válce s aperturním otvorem. Veškeré práce je třeba provádět

v rukavicích, aby nedošlo ke kontaminaci povrchů. Nejprve dojde k odšroubování všech čtyř ochranných kloboučků. Poté se za pomoci imbusového klíče velikosti 3 povolí všechny čtyři upínací šrouby tak, aby došlo k jejich vysunutí směrem ven minimálně o 1 mm. Upínací šrouby nechceme vyšroubovat úplně, ale pouze tak, aby bylo možné bezpečné vyjmutí držáku s katodou. Poté bude za vrchní část vyčnívající ze spojovacího šroubu vyjmut držák s katodou. Použitá katoda bude z držáku vytlačena a do držáku se umístí katoda nová. Celý držák s katodou se pak opatrně zasune zpět do dutiny vprostřed mechanismu odkud byl vytáhnut. Při zpětném vkládání držáku je třeba dodržet polohu drážek v držáku tak, aby odpovídaly polohám upínacích šroubů. K tomu poslouží značky, které budou po výrobě přidány na vrchní plochu pohyblivé matice a držáku v místech středů upínacích šroubů a v místech středů drážek. Držák je třeba spouštět pomalu dokud nedosedne keramická část katody na dno pohyblivé matice. Po dosednutí keramické plochy katody na pohyblivou matici dojde pomocí imbusového klíče k jemnému dotažení všech upínacích šroubů tak, aby zajistily držák s katodou.

Pod optickým mikroskopem dojde k orientačnímu centrování katodového hrotu vůči apertuře ve Wehneltově válci. Úprava výšky hrotu je prováděna pomocí otáčení spojovacím šroubem. Wehnelt je nakloněn na 45 stupňů a výška katodového hrotu je upravována do doby, než je hrot skrze aperturu viditelný lidským okem. Po nastavení výšky může obsluha přistoupit k justáži hrotu v radiálním směru. To je prováděno pomocí upínacích šroubů. Při justáži je třeba vždy jeden upínací šroub utahovat a protějščí upínací šroub povolovat, aby nedocházelo pouze ke stlačování držáku. Takovýto způsob justáže hrotu katody v radiálním směru byl zvolen s ohledem na praxi, kde je snaha o to, aby obsluha zařízení měla justáž co nejsnadnější. Při seřízení v radiálním směru je nutné pouze to, aby katodový hrot byl shruba ve středu apertury. Povolená odchylka je cca 20% rozměru apertury. Po dokončení procesu justáže hrotu katody budou zpět našroubovány čtyři ochranné kloboučky a celý mechanismus bude uchycen zpět do systému.

5 Závěr

Rešerše v úvodu této bakalářské práce byla vytvořena za účelem uvedení do problematiky elektronových trysek. K samotnému detailnímu konstrukčnímu řešení elektronové trysky se nepodařilo dohledat vhodnou literaturu. Při konstrukčním návrhu jsem tedy vycházel z konzultací s konstruktéry v oblasti elektronové a iontové optiky.

V praktické části, byl navržen kompletní model mechanismu justáže Wehneltova válce, určeného pro aplikaci v termoemisní elektronové trysce využívající katody s wolframovým vláknem. Dva velice drobné nezávislé posuvy jsou realizovány pomocí diferenciálního šroubů a šroubu s velmi jemným závitem. Při návrhu byl také kladen důraz na možnost snadné výměny katody.

Všechny důležité, průmyslově nevyráběné součásti mechanismu, byly zároveň zpracovány do konstrukčních výrobních výkresů, které obsahují veškeré detailní informace, jak o jednotlivých součástech, tak i o celé sestavě mechanismu. Všechny tyto výkresy lze nalézt v příloze této práce.

Možné zlepšení návrhu je především v oblasti zmenšení celku. To by mělo pozitivní vliv jak na výrobní cenu, tak zároveň na úsporu místa, kterou by celá termoemisní tryska zabírala při použití v jakémkoliv zařízení, vyžadujícím její umístění.

6 Seznam literatury

- [1] SUŠKIN, N.G. Elektronový mikroskop. Praha: SNTL, 1954, 257 s.
- [2] HORÁK, M.: Charakterizace elektronové trysky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Zlámal, Ph.D.
- [3] REIMER, Ludwig. Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis. Second completely revised and updated edition. Berlin: Springer, 1998. Series in optical sciences (Springer). ISBN 978-3-642-08372-3.
- [4] An introduction to electron microscopy [online]. Fourth edition. Hillsboro, Oregon 97124 USA: FEI company, 2010 [cit. 2020-01-30]. ISBN 978-0-578-06276-1. Dostupné z: http://www.nanolab.ucla.edu/pdf/Introduction_to_EM_booklet_July_10.pdf
- [5] NEBESÁŘOVÁ, Jana. Elektronová mikroskopie pro biology. *Triton.paru.cas* [online]. České Budějovice: NebeNet, 2002 [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/book/Podkap/3.1.html>
- [6] WILLIAMS, David Bernard a C. Barry CARTER. *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*. Second edition. New York: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-76500-6.
- [7] DUBRAVCOVÁ, Viera. Vákuová a ultravákuová technika. Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 80-050-1090-7.
- [8] Turbomolecular pump. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Turbomolecular_pump

- [9] SKLADANÝ, R. Adaptace aparatury UHV SEM pro tvorbu a charakterizaci nanostruktur. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Páleníček.
- [10] Nut-screw differential mechanism 1. In: Youtube [online]. Vietnam: Nguyen Duc Thang, 2013 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-ZN6Kj3sXtc&feature=youtu.be>
- [11] Standa [online]. Lithuania: STANDA, 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://www.standa.lt>
- [12] Ultra-fine adjustment screw [online]. Lithuania: STANDA, 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://www.standa.lt/products/catalog/fine_adjustment?item=177
- [13] Cen Shawn Wu, Yoshiyuki Makiuchi and ChiiDong Chen (1. únor 2010). High-energy Electron Beam Lithography for Nanoscale Fabrication, Lithography, Michael Wang, IntechOpen, DOI: 10.5772/8179. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/lithography/high-energy-electron-beam-lithography-for-nanoscale-fabrication>
- [14] GROSZKOWSKI, Janusz. Technika vysokého vakua. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Řada teoretické literatury. ISBN L 11-B3-IV-31f/11791.
- [15] TED PELLA [online]. USA / Canada: Ted Pella, 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.tedpella.com>
-

7 Seznam příloh

Číslo výkresu	Název výkresu	Formát výkresu
BPVF-1	Držák katody	A4
BPVF-2	Spojovací šroub	A4
BPVF-3	Vodicí tyč	A4
BPVF-4	Vnější fixní matice	A4
BPVF-5	Vnější pohyblivá matice	A3
BPVF-6	Wehneltův válec s aperturním otvorem	A4
BPVF-7	Ochranný klobouček	A4
BPVF-SESTAVA-8	Mechanismus justáže Wehneltova válce	A3