



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH FOKUSAČNÍHO A VYCHYLOVACÍHO SYSTÉMU ELEKTRONOVÉ SVÁŘEČKY

DESIGN OF FOCUSING AND DEFLECTION SYSTEM OF ELECTRON WELDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VIKTOR FRANČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAKUB ZLÁMAL, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. Viktor Franc**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Zlámal, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh fokusačního a vychylovacího systému elektronové svářečky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na Ústavu fyzikálního inženýrství chceme vyvinout jednoduchou elektronovou svářečku pro svařování malých dílů s výkonem do 1 kW. Základními prvky elektronové svářečky jsou magnetická čočka a vychylovací systém. Tyto prvky umožňují zaostření a vychylování elektronového svazku při svařování.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši vhodných uspořádání vychylovacího systému.
2. Navrhněte optický systém tvořený magnetickou čočkou, vychylovacími cívkami a stigmátorem. Zvolte vhodně rozsah zaostření svazku a vychylování, aby systém vyhovoval požadovaným aplikacím.
3. Vytvořte technickou dokumentaci základních prvků.

Seznam doporučené literatury:

SCHULTZ, Helmut. Electron beam welding. Cambridge: Abington, 1993. ISBN 9781855730502.

REIMER, Ludwig. Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis. 2nd completely rev. and updated ed. New York: Springer, 1998. ISBN 978-3-540-63976-3.

ZOBAČ, Martin. Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie. Disertační práce. VUT v Brně, 2009.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

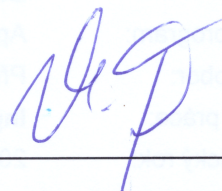
V Brně, dne 22. 10. 2021



prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

L. S.

V Z.



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



Abstrakt

Hlavními částmi elektronové svářečky jsou zdroj elektronů, akcelerátor, magnetická čočka s vychylovacím systémem a stigmátorem, svařovací komora s manipulátorem vzorku a vakuový systém. Tato diplomová práce začíná návrh prototypu elektronové svářečky. Přesněji je věnována jak elektronově optickému, tak konstrukčnímu návrhu magnetické čočky, vychylovacího systému, korekčního systému, svařovací komory a vakuového systému.

Summary

Main parts of the electron beam welder are the source of electrons, accelerator, magnetic lens with deflection coils and stigmator, welding chamber with manipulation stage for welding object and vacuum system. This master thesis starts the design of the electron beam welder prototype. More precisely it is aimed not only on electron optic design, but also on construction of magnetic lens, deflection coils, stigmator, welding chamber and vacuum system.

Klíčová slova

Elektronové svařování, elektronový svazek, elektronově optický systém, magnetická čočka, fokusace, deflektory, stigmátor.

Keywords

Electron beam welding, electron beam, electron-optical system, magnetic lens, focusation, deflection coils, stigmator.

FRANC, V. *Návrh fokusačního a vychylovacího systému elektronové svářečky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 52 s. Vedoucí Ing. Jakub Zlámal, Ph.D.

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci na téma „Návrh fokusačního a vychylovacího systému elektronové svářečky“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a za pomoci odborných konzultantů, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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.

Bc. Viktor Franc

Děkuji všem, kteří v průběhu vzniku této práce jakýmkoliv způsobem přispěli cennými radami a informacemi týkajícími se problematiky. Vážím si času a trpělivosti, které jste museli investovat. Jmenovitě pak především mému vedoucímu práce panu Ing. Jakubu Zlámalovi, Ph.D., který také zprostředkoval mnoho cenných konzultací a setkání s lidmi z praxe, kteří se v oboru elektronové mikroskopie či svařování pohybují. Jeho opora a především ochota konzultovat a opakovaně dovysvětlit potřebné věci kdykoliv bylo potřeba byla nejen motivující, ale také inspirující. Dále bych chtěl jmenovitě poděkovat panu Ing. Liboru Dupákovi, Ph.D. z Ústavu přístrojové techniky v Brně, za jeho ochotu probrat se mnou poznatky za roky vývoje jejich elektronové svářečky. Dále chci poděkovat panu Ing. Jindřichu Machovi, Ph.D., který byl cenným konzultantem konstrukčního návrhu. V neposlední řadě chci poděkovat také mým rodičům za jejich podporu.

Bc. Viktor Franc

Obsah

1 Úvod	2
2 Požadavky kladené na elektronovou svářečku	3
3 Princip elektronového svařování	4
4 Elektronově optický systém	6
4.1 Termoemisioní zdroj	7
4.2 Regulace proudu svazku	9
4.3 Energie svazku	10
4.4 Magnetická čočka	11
4.5 Velikost stopy	16
4.6 Deflektory	18
4.7 Stigmátor	24
4.8 Parametry cívek elektronově optických prvků	27
4.8.1 Vinutí magnetické čočky	28
4.8.2 Vinutí cívek deflektorů	29
4.8.3 Vinutí cívek stigmátoru	30
4.9 Teplota dílů při maximálním ohřevu	31
5 Konstrukční návrh	35
5.1 Konstrukce magnetické čočky	36
5.2 Liner	38
5.3 Držák cívek deflektorů a stigmátoru	39
5.3.1 Postup navíjení cívek a sestavení dílů držáku do jednoho celku	40
5.4 Svařovací komora	43
5.5 Vakuový systém	45
5.6 Těsnění systému	46
6 Závěr	49

1. Úvod

Uplatnění elektronového svařování pro řešení širokého spektra technických aplikací vede pracovníky Ústavu fyzikálního inženýrství Vysokého učení technického v Brně ke snaze operovat na akademické půdě s vlastním zařízením schopným elektronového svařování a také vrtání tenkých materiálů. Díky této technologii se chtějí stát nezávislejšími na jiných institucích, které jim možnost elektronového svařování a vrtání pro aplikaci ve výzkumu a vývoji umožňují. Cílem této diplomové práce, je tedy započít návrh prototypu elektronové svářečky s termoemisním zdrojem elektronů a maximálním výkonem zařízení 1 kW.

Přibližně před 125 lety došlo k objevení elektronu J. J. Thompsonem. Později se začaly provádět experimenty s urychlenými elektrony. Vliv těchto elektronů na materiál byl zpočátku přehlížen. U většiny tehdy prováděných experimentů s urychlenými elektrony docházelo k zahřívání anody vlivem dopadajících elektronů. Německý fyzik Marcello von Pirani byl první, kdo tohoto faktu využil k tavení kovů. Fyzika elektronového svazku se začala rychle rozšiřovat a vedla ke vzniku mnoha důležitých zařízení, které s elektronovým svazkem pracují. Roku 1938 Von Ardenne využil elektronový svazek pro řezání kovových materiálů. Velké úsilí vkládané v tehdejší době do rozvoje výkonných zdrojů pro elektronové mikroskopy vedlo paralelně k rapidnímu rozvoji v oblasti zpracování materiálu pomocí elektronového svazku. Výhody, jako například možnost svařování kovů citlivých na výskyt plynů v atmosféře, schopnost svařovat tlusté materiály z důvodu možnosti dosažení vysokých proudů elektronového svazku a velká rychlost svařování, vedly k využití elektronového svařování v leteckém, námořním, atomovém průmyslu, atd. [11].

Hlavními částmi elektronové svářečky jsou magnetická čočka, která slouží k soustředění elektronového svazku do malé stopy, vychylovací systém (deflektory), který slouží k pohybu se stopou svazku a korekční systém (stigmátor), který slouží ke korekci astigmatismu systému. První část této práce se věnuje elektronově optickému návrhu těchto tří prvků, k němuž je využito programu EOD [14]. Na základě elektronově optického návrhu je pak vytvořen konstrukční návrh elektronově optických prvků a k němu je přidán také návrh svařovací komory s připojením na vakuový systém. Tato práce je prvním krokem k návrhu prototypu elektronové svářečky. I když se přímo nezabývá ostatními částmi elektronové svářečky, tak jsou tyto části v návrhu brány v potaz a jejich princip funkce, či jimi daná omezení, ovlivnila návrh, jak elektronově optický, tak také konstrukční.

Kapitola 2 se věnuje počátečním omezením a požadavkům, které jsou na celý systém kladeny. Kapitola 3 vysvětluje zjednodušeně princip fungování elektronové svářečky. V kapitole 4 jsou popsány jednotlivé části elektronově optického systému, kterým se následně podrobněji věnuje 9 podkapitol. Po elektronově optickém návrhu se v kapitole 5 přechází na konstrukční návrh v němž se v šesti podkapitolách popisuje konstrukce jednotlivých dílů návrhu, zvolené materiály, výrobní procesy, sestavovací instrukce, vakuový systém a těsnění systému.

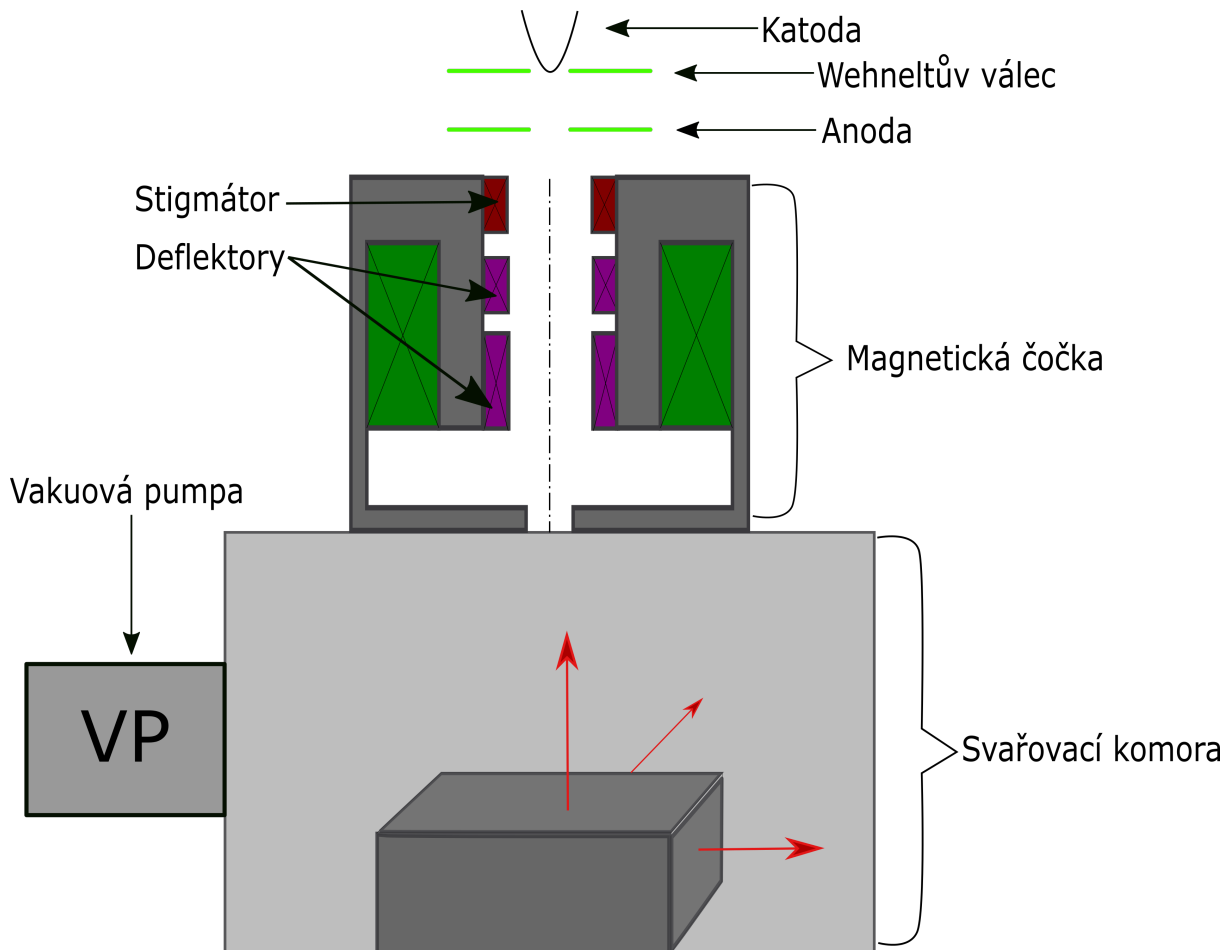
2. Požadavky kladené na elektronovou svářečku

Zařízení schopná využívat elektronový svazek ke svařování a vrtání mohou být navržena různými způsoby. Odlišnosti jednotlivých návrhů vychází z požadavků na celý systém. Tento konkrétní prototyp elektronové svářečky je navrhován pro maximální energii svazku 60 keV, proud svazku 15,67 A a výkon 1 kW. Maximální energie svazku 60 keV byla zvolena z důvodu minimalizace vlivu Rentgenova záření, které je při vyšších energiích výrazně patrné a při konstrukci zařízení se pak musí obtížně zajišťovat jeho odstínění. Plánovaná energie svazku bude prozatím pouze 30 keV. V návrhu se uvažuje termoemisní zdroj v podobě wolframového vlákna. Protože se jedná o prvotní návrh, tak se klade důraz především na jednoduchost celého systému a snadnou výměnu jednotlivých částí. Jednoduchost celého systému je zajištěna díky mnoha parametrům. Systém je navrhován jako jednoočkový a bez clony. Proud svazku bude místo clonou ovládán pomocí změny předpětí na elektrodě zvané Wehneltův válec v elektronovém zdroji. Aby vychylovací systém nebyl masivní a cívky nebyly buzeny velkým proudem a díky tomu se nemuselo řešit jejich chlazení, budou deflektory sloužit pouze k drobnému vychylování a zbytek bude zařizovat posuvný stolek. Seřízení optických os zdroje a elektronové optického systému bude zařízeno mechanicky. Magnetická čočka bude držena na vzduchu, vakuově čerpaná bude pouze malá oblast průchodu elektronů ohraničená linerem a díky tomu nebude problém s vývodem připojení cívek ke zdrojům. Vakuum, na které bude systém čerpán, je poměrně nízké, protože pro provoz žhavené katody postačuje vakuum v řádu 10^{-3} Pa. Díky tomu bude těsnění celého systému možno zařídit pouze pomocí vitonových těsnících kroužků.

Po elektronové svářečce se požaduje, aby byla schopna svařovat a vrtat tenké materiály. Minimální pracovní vzdálenost systému bude 20 mm a na této vzdálenosti se požaduje, aby bylo možno svařovat předměty o maximálním rozměru alespoň 60 mm. Takto krátká pracovní vzdálenost vyžaduje vhodně navržený vychylovací systém, který nebude umístěn pod čočkou, kde by zabíral místo a svařovaný objekt by tak nebylo možné dostatečně k magnetické čočce přiblížit.

3. Princip elektronového svařování

Zjednodušené schéma elektronové svářečky s popisem jednotlivých částí zachycuje obr. 3.1. Žhavením termoemisního zdroje a působením elektrického pole mezi katodou a anodou dochází k emisi elektronů a tedy ke generování proudu svazku [13]. Přivedením záporného předpětí vůči katodě na Wehneltův válec regulujeme emisní plochu na katodě a tím i proud svazku. Tímto způsobem jsme schopni velmi rychle měnit proud svazku díky malé setrvačnosti systému [15].



Obrázek 3.1: Zjednodušené schéma elektronové svářečky s popisem jednotlivých částí.

Klidová hmotnost elektronu je velmi malá ($9,109 \cdot 10^{-31}$ kg) a z toho důvodu by se mohlo zdát, že docílit markantního převodu energie pomocí elektronového svazku je obtížné. Velkou roli však hraje fakt, že elektron nese elektrický náboj ($-1,602 \cdot 10^{-19}$ C), díky němuž je možno na elektron působit elektrickým a magnetickým polem a elektron urychlit na vysoké rychlosti. Urychlení elektronů je v praxi zařízeno pomocí potenciálového rozdílu mezi katodou a anodou. Katoda je držena na velkém záporném potenciálu a anodu je uzemněna. Elektron prošlý vzniklým polem má tedy vysokou kinetickou energii.

Při elektronovém svařování se využívá principu přeměny kinetické energie vysoce urychlených elektronů na energii termální při dopadu elektronů na objekt. Toto předání energie je zapříčiněno nepružnými srážkami elektronů s částicemi materiálu. Dopadající elektrony do materiálu příliš nepronikají (maximální hloubka penetrace v řádu 10^{-1} mm). Oblast, na které dochází k převodu tepla, je tedy malá a díky tomu je možno docílit vyso-

3. PRINCIP ELEKTRONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

kých objemových hustot výkonu až v řádu $10^8 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-3}$ [15]. V dopadové oblasti dochází k natavení materiálu, jeho tečení a následnému chladnutí, při němž vzniká svarové spojení. Materiál jsme však schopni tavit i do takové míry, že dojde k jeho odpaření a provrtání.

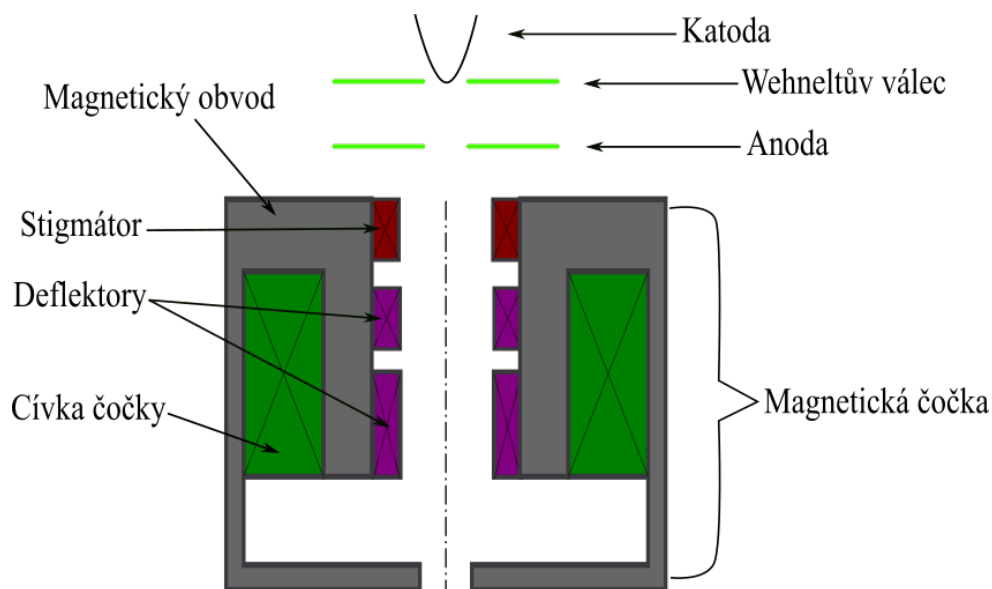
Důležité je, aby elektronový svazek byl soustředěn do malé oblasti a díky tomu byl dosažen vysoký plošný výkon (okolo $10^6 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$). K tomu slouží magnetická čočka. Možnost dosažení těchto vysokých hodnot plošného výkonu je hlavní předností elektronového svařování, které umožňuje rychlé natavení i materiálů s vysokou teplotou tavení. Při takových výkonech je rychlost předávání tepla materiálu dopadajícími elektrony přibližně $10^9 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ [4]. Jediná další metoda svařování, schopná docílit podobných hodnot výkonu a převodu tepla, je svařování pomocí laseru. Výhodou elektronového svařování oproti laserovému je, že celý systém se nachází vždy ve vakuu. Díky sníženému působení zbytkové atmosféry na vzorek je tedy vhodnější pro svařování materiálů reagujících s atmosférou. Laserové svařování lze též provádět ve vakuu, ale na rozdíl od elektronového svařování to není nutné a z důvodu úspory peněz spojených s konstrukcí vakuového systému, se tohoto u laserového svařování běžně nevyužívá.

Pro zajištění přesné svarové linie je třeba s elektronovým svazkem pohybovat. K tomu slouží vychylovací systém, neboli deflektory. Pomocí jimi generovaného magnetického pole je elektronový svazek vychylován a díky nim je tedy tvořena geometrie svaru nebo vrtané díry.

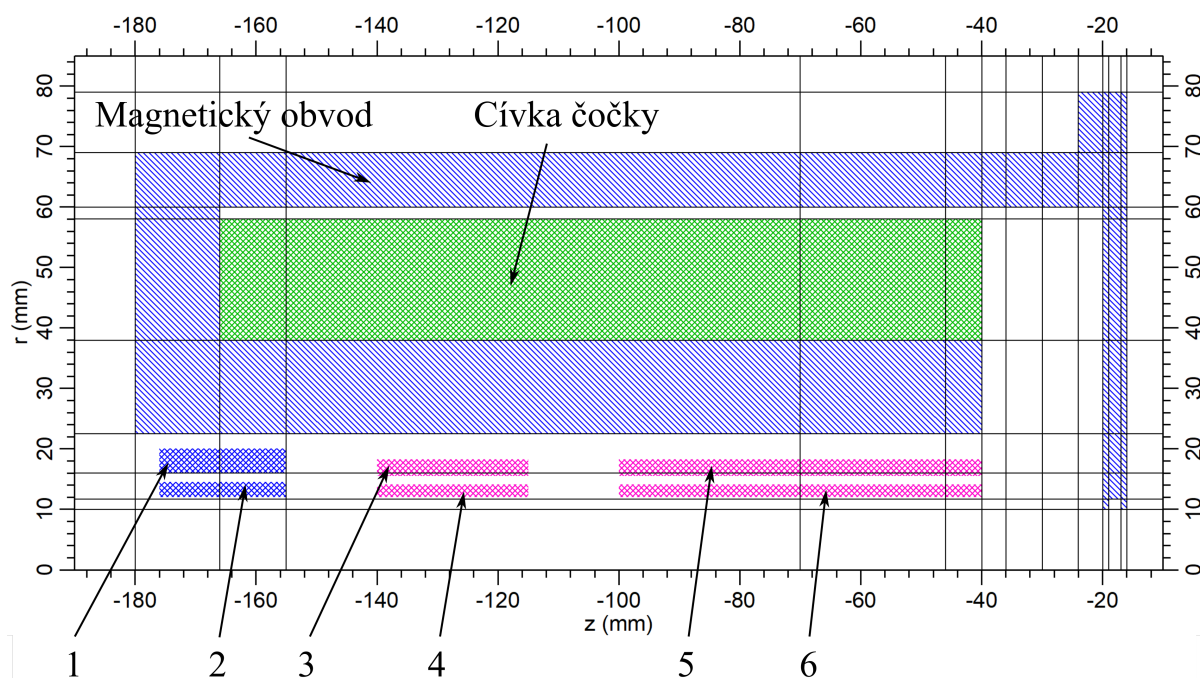
Elektronově optický systém bývá zatížen vadou zvanou astigmatismus, která má negativní vliv na stopu elektronového svazku a tedy na kvalitu svaru. Za účelem minimalizace astigmatismu systému obsahuje elektronově optický systém také korekční prvek zvaný stigmátor, který pomocí vhodného magnetického pole minimalizuje astigmatismus a koriguje tvar stopy svazku.

4. Elektronově optický systém

Aby elektronová svářečka správně fungovala je nejprve nutné navrhnout vhodný elektronově optický systém a zvolit vhodné rozsahy fokuse a vychylování elektronového svazku. Elektronově optickým systémem (obr. 4.1) se u elektronové svářečky rozumí termoemisní zdroj a magnetická čočka s vychylovacím a korekčním systémem. Termoemisní



Obrázek 4.1: Schéma elektronově optického systému s popisem jednotlivých částí.



Obrázek 4.2: Návrh magnetické čočky, deflektorů a stigmátoru v programu EOD. Pozice 1 vyznačuje vnější vinutí stigmátoru, pozice 2 vnitřní vinutí stigmátoru, pozice 3 vnější vinutí horního deflektoru, pozice 4 vnitřní vinutí horního deflektoru, pozice 5 vnější vinutí dolního deflektoru a pozice 6 vnitřní vinutí dolního deflektoru.

zdroj je složen z katody, Wehneltova válce a anody. Magnetická čočka je složena z cívky obklopené magnetickým obvodem, vychylovačí systém obsahuje dva deflektory a korekční systém je tvořen stigmátorem. Obrázek 4.2 zachycuje návrh magnetické čočky, deflektorů a stigmátoru v programu EOD. Je z něj patrné přesné polohové rozložení cívek jednotlivých prvků konečného návrhu. Jak deflektory, tak i stigmátor mají vnější a vnitřní cívky, které generují vždy vzájemně kolmá pole. O jednotlivých částech elektronově optického systému pojednávají následující kapitoly.

4.1. Termoemisní zdroj

Kovy mají ve své krystalové mřížce volné elektrony, které jsou uvnitř kovu drženy díky potenciálové bariéře. Velikost této potenciálové bariéry je v rozmezí jednotek eV, závisí na materiálu a označuje se jako výstupní práce. Jestliže chceme docílit toho, aby některé volné elektrony začaly povrch kovu opouštět, musíme jim dodat dostatečnou energii pro překonání potenciálové bariéry. Toho docílujeme dodáním tepelné energie kovu jeho žhavením proudem. Tento proces nazýváme termoemisí a kovový materiál připojený ke žhavicímu proudu nazýváme katodou. Při elektronovém svařování se snažíme docílit vysokých výkonů svazku, aby docházelo k rychlému předání tepelné energie svařovanému materiálu. Těchto vysokých výkonů se nejspíše dosáhne použitím termoemisního zdroje, proto se v technologických procesech využívají hlavně žhavené hroty. Dva nejčastější materiály využívané k realizaci termoemisních zdrojů jsou wolfram a hexaborid lanthanu. Tyto dva materiály využíváme především kvůli jejich vysoké teplotě tavení a malé hodnotě výstupní práce. K tavení wolframu dochází při teplotě přibližně 3 660 K a jeho výstupní práce je přibližně 4,5 eV. Bod tavení hexaboridu lanthanu odpovídá teplotě okolo 2 480 K a jeho výstupní práce je přibližně 2,4 eV [4, 13, 15].

Proudovou hustotu elektronů uvolněných z kovu vyjadřuje Richardsonův zákon

$$j_s = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right),$$

kde j_s je hustota emisního proudu elektronů, A je konstanta emise (závisí na emitujícím povrchu), T je absolutní teplota katody, Φ je výstupní práce z kovu a k je Boltzmannova konstanta [10].

Důležitým parametrem elektronového zdroje je směrová proudová hustota, též označována jako jas β . Jas zdroje

$$\beta = \frac{I}{S \cdot \Omega} = \frac{4I}{\pi^2 \alpha^2 d^2}$$

udává jaký proud elektronů I je vyzářen plochou zdroje S do prostorového úhlu Ω . Plochou zdroje se rozumí kruhová oblast svazku v rovině křižště jejíž průměr značíme d . Prostorový úhel je určen úhlem α krajních trajektorií elektronů vycházejících z roviny křižště vůči optické ose zdroje. Pro snadnější představu jsou tyto parametry zakótovány v obrázku 4.3 [13].

Pro dosažení dostatečné proudové hustoty a jasu termoemisního zdroje je třeba kovy žhavit na vysoké teploty. Životnost vláken termoemisních katod je nepřímo úměrná teplotě žhavení. Wolframové vlákno má při provozní teplotě 2 700 K životnost přibližně 100 h. Katoda s hrotem z hexaboridu lanthanu má při provozní teplotě 1 700 K životnost cca 1 000 h a oproti katodě z wolframu má asi 10krát vyšší jas. Vyžaduje však vyšší vakuum

4.1. TERMOEMISNÍ ZDROJ



Obrázek 4.3: Znázornění roviny křižště a parametrů pro výpočet jasu zdroje.

Tabulka 4.1: Srovnání parametrů termoemisního zdroje z wolframu a hexaboridu lanthanu.

	Wolfram	Hexaborid lanthanu
Teplota tavení (K)	3 660	2 480
Výstupní práce (eV)	4,5	2,4
Richardsonova konstanta emise (A/m^2K^2)	$6 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$
Proudová hustota při 100 kV (A/m^2)	10	10^2
Jas při 100 kV (A/cm^2sr)	10^6	$5 \cdot 10^7$
Energiový rozptyl (eV)	3	1,5
Potřebné vakuum v okolí hrotu (Pa)	10^{-3}	10^{-4}

pro provoz. Podrobnější porovnání dalších parametrů termoemisního zdroje z wolframu a hexaboridu lanthanu zachycuje tabulka 4.1 [13].

Jak již bylo zmíněno, při svařování potřebujeme dosáhnout vysokých výkonů svazku. Při konstantní energii elektronů jich docílujeme zvyšováním proudu svazku, tedy zvy-

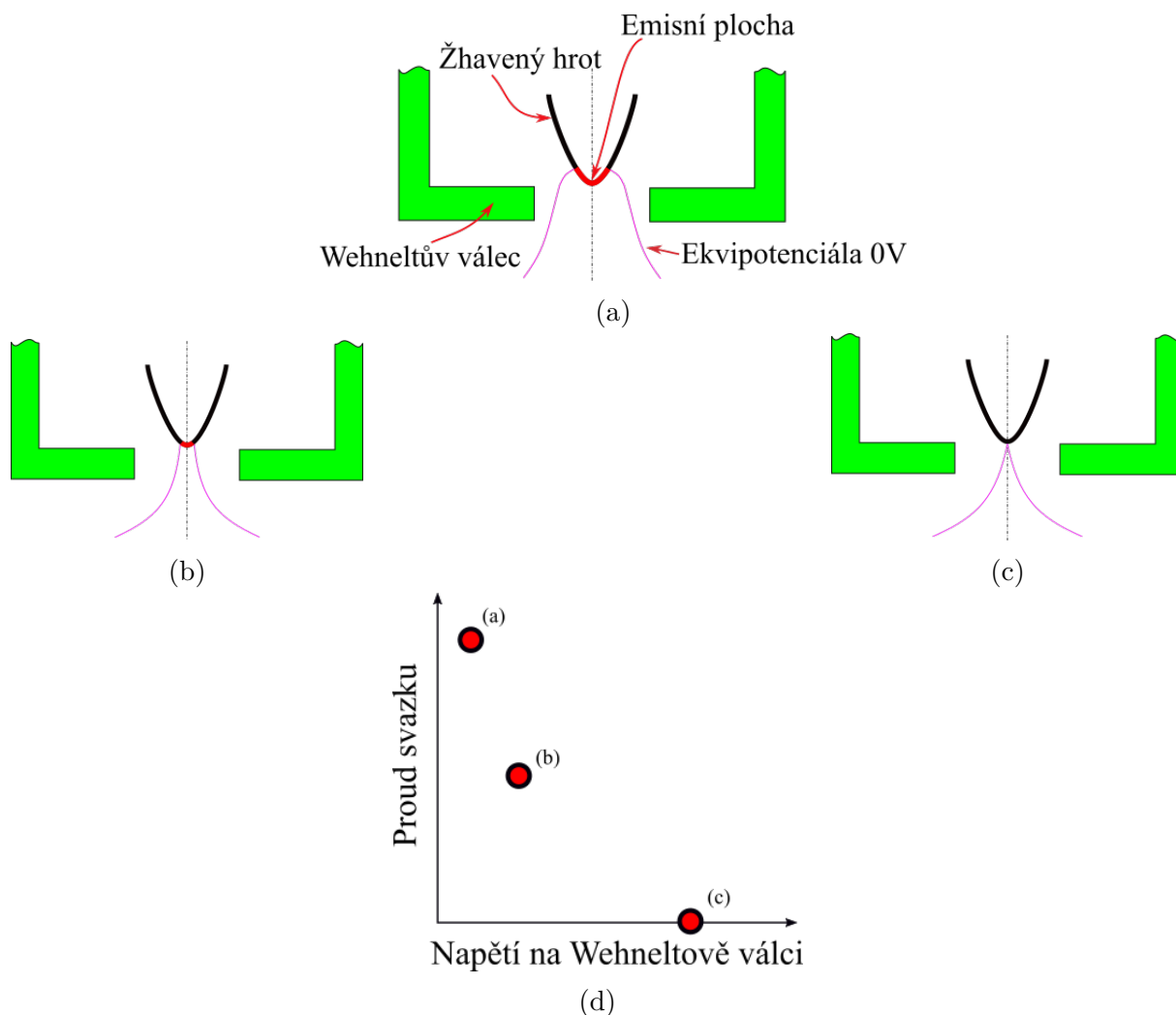


Obrázek 4.4: Závislost emisního proudu elektronů na žhavicím proudu zdroje.

šováním žhavicího proudu katody. Vlivem zvyšování žhavicího proudu kov opouští více elektronů a tedy roste hustota emisního proudu, jas a výkon svazku. Žhavicí proud má však cenu zvyšovat jen do určité hodnoty, kdy dosáhneme maximálního emisního proudu elektronů. Při dalším růstu teploty hrotu emisní proud roste nepatrně a dochází k rychlejšímu opotřebení a tedy ke snížení životnosti zdroje. Závislost emisního proudu elektronů na žhavicím proudu zdroje zachycuje obrázek 4.4 [7].

4.2. Regulace proudu svazku

Při žhavení katody dochází k emisi elektronů, které se hromadí okolo hrotu katody a vytváří mrak prostorového náboje. S rostoucí teplotou roste počet elektronů v mraku. Do doby, než dosáhneme ideálního provozního bodu katody, tak jak jej zachycuje obrázek 4.4, je anoda schopna přitahovat veškeré emitované elektrony, což vyplývá i ze stále rostoucího emisního proudu. Po dosažení ideálního provozního bodu je kolem hrotu vytvořen trvalý prostorový náboj, což vlastně znamená, že počet elektronů mraku je vyšší, než počet elektronů, které je anoda schopna přitahovat. Další zvyšování žhavicího proudu tedy nemá vliv na růst emisního proudu a vede pouze ke zkrácení životnosti, tak jak již



Obrázek 4.5: Vliv předpětí Wehneltova válce na proud svazku a emisní plochu hrotu.

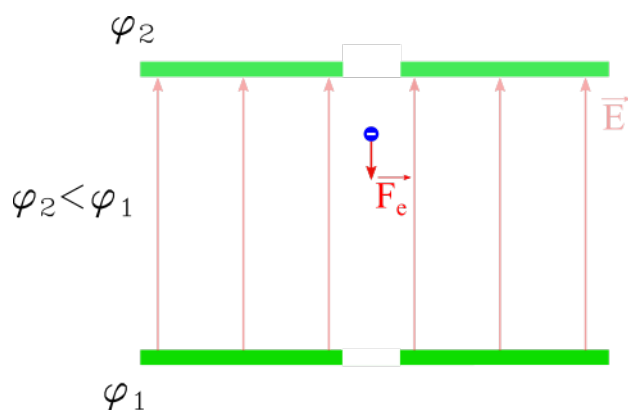
4.3. ENERGIE SVAZKU

bylo zmíněno v předešlé části. Z této závislosti emisního proudu na teplotě hrotu vyplývá možnost regulovat emisní proud, a tím výkon, pomocí žhavicího proudu. Tato možnost je však nevhodná a to zejména kvůli relativně pomalé odezvě emisního proudu na změnu žhavicího proudu a díky celkové nízké stabilitě emisního proudu mimo provozní bod [8].

Nejčastější metoda regulace proudu u termoemisních zdrojů, kterou využijeme i v naší elektronové svářečce, je regulace pomocí změny předpětí na fokusační elektrodě (Wehneltovu válci). Katoda je držena na záporném potenciálu s limitem 60 kV a hrot je obklopen válcovou fokusační elektrodou, na kterou je přivedeno malé záporné předpětí v rozsahu 0 až 500 V vůči katodě. Vlivem rozdílu potenciálů katody a Wehneltova válce dochází ke vzniku elektrostatického pole, které je schopno odpuzovat elektrony směrem ke katodě a odstínit tak elektrostatické pole anody a tedy zabránit některým (nebo všem) elektronům podílet se na proudu svazku. Změnou předpětí na Wehneltově válci jsme schopni vymezovat oblast hrotu katody, ze které dochází k emisi elektronů, tak jak je zachyceno na obrázku 4.5 [9].

4.3. Energie svazku

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, elektrony jsou velmi lehké částice. Pro dosažení převodu dostatečné tepelné energie na svařovaný objekt musíme elektrony urychlit na vysoké rychlosti. Elektrony mají elektrický náboj, díky kterému je na ně možno působit elektrickým a magnetickým polem. Představme si dvě elektrody o potenciálech φ_1 a φ_2 , tak jak zachycuje obrázek 4.6. Potenciálový rozdíl mezi elektrodami generuje elektrické pole, které na elektron v tomto poli působí elektrickou silou \vec{F}_e . Vlivem této síly dochází k růstu velikosti rychlosti elektronu ve směru síly a tedy růstu kinetické energie. Výsledná rychlost a kinetická energie elektronu po průchodu elektrodou o potenciálu φ_1 závisí na potenciálovém rozdílu mezi elektrodami. V praxi je pak elektrodou o potenciálu φ_2 katoda, na kterou je přiváděno záporné napětí v desítkách kV a elektrodou o potenciálu φ_1 je anoda, která je uzemněna. Elektrony opouštějící katodu jsou anodou přitahovány a potenciálovým rozdílem urychleny. Potenciálový rozdíl mezi katodou a anodou nám tedy udává energii svazku.



Obrázek 4.6: Působení elektrického pole, vzniklého vlivem potenciálového rozdílu mezi elektrodami, na elektron.

Elektrony urychlené vlivem potenciálového rozdílu mezi katodou a anodou vykazují relativistické chování. Vlivem rostoucí rychlosti roste jejich kinetická energie. S rostoucí

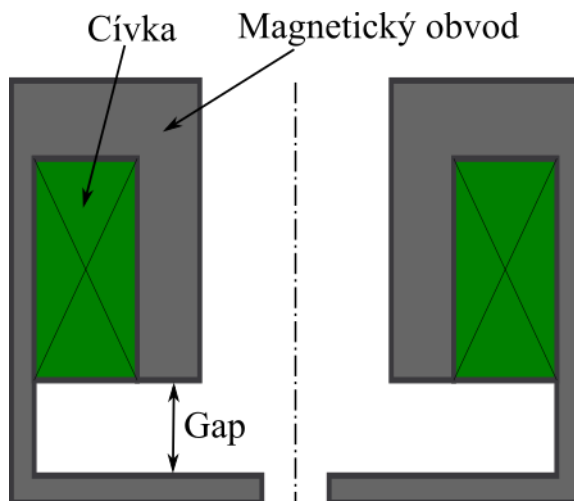
rychlostí roste také hmotnost elektronu a zkracuje se jeho vlnová délka. Přehledově změnu těchto parametrů v závislosti na potenciálovém rozdílu mezi katodou a anodou zachycuje tabulka 4.2. V naší aplikaci se budeme pohybovat v rozmezí potenciálového rozdílu mezi katodou a anodou přibližně 10 až 60 keV. Z tabulky vyplývá, že relativistická korekce pro tyto energie svazku je přibližně 2–12 %, a tedy změny optických parametrů vlivem relativistických jevů jsou významné.

Tabulka 4.2: Vlnová délka, hmotnost a rychlost elektronu v závislosti na energii $e_{\Delta\varphi}$.

$e_{\Delta\varphi}$ (eV)	λ (m)	m/m_0 (-)	v/c (-)
10 000	$1,22 \cdot 10^{-11}$	1,0196	0,1950
60 000	$4,87 \cdot 10^{-12}$	1,1174	0,4462

4.4. Magnetická čočka

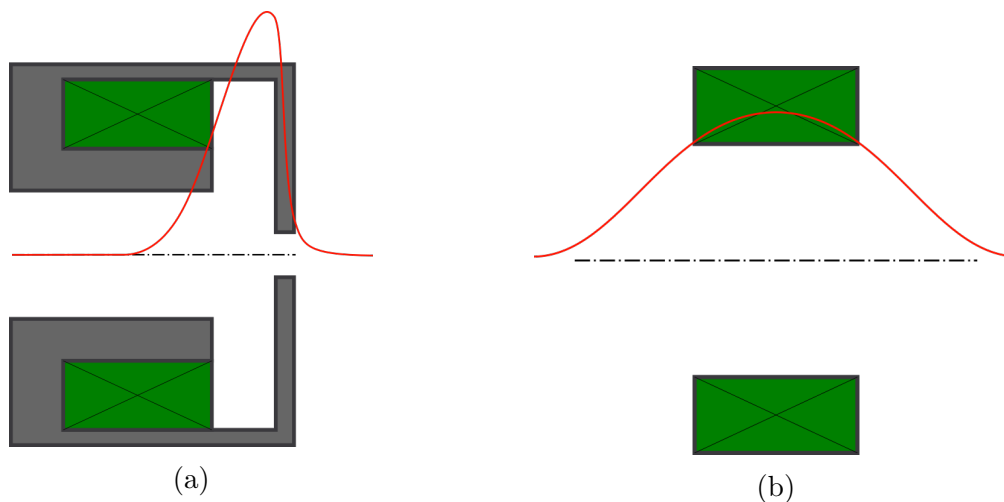
Magnetická čočka je zařízení, které slouží k fokusaci elektronů do malé stopy. Toto soustředění elektronového svazku do malého místa je důležité především proto, aby bylo možno dosáhnout dostatečně malých svarových spojení a zároveň vysokých svařovacích výkonů. Stejně tak, jako skleněné čočky jsou schopny díky rozdílnému indexu lomu od okolí měnit trajektorie světla, tak jsou magnetické čočky schopny vlivem působení magnetického pole měnit trajektorie elektronů. Magnetické pole je v čočce generováno pomocí proudu procházejícího cívkou čočky. Cívkou čočky se rozumí navinutý měděný drát připojený na napětí. Cívka je obklopena magnetickým materiálem tvořícím magnetický obvod. Schéma magnetické čočky s popisem jejích částí zachycuje obrázek 4.7.



Obrázek 4.7: Schéma magnetické čočky s popisem jednotlivých částí.

Magnetický obvod zajišťuje, že magnetická indukce bude na ose koncentrována pouze v místech gapu a jeho blízkém okolí. Vhodnou lokalizací magnetického pole lze minimalizovat koeficient sférické vady magnetické čočky, což je vhodné především z toho důvodu, že sférická vada negativně ovlivňuje průměr stopy svazku. Zároveň díky platnosti Ampérova zákona bude magnetická indukce na ose cívky obklopené magnetickým materiálem v místě gapu větší, jako magnetická indukce na ose samostatné cívky v tomto místě. Ná-

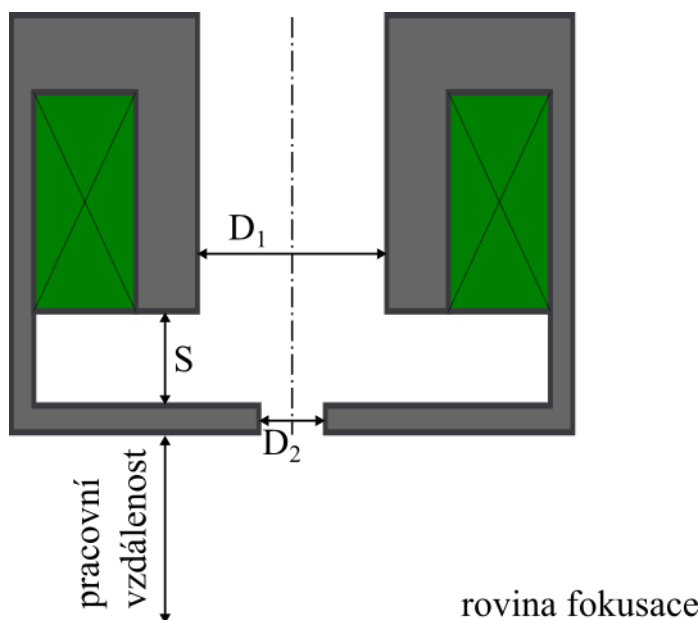
4.4. MAGNETICKÁ ČOČKA



Obrázek 4.8: Průběh magnetické indukce na ose (červená křivka) s lokalizací pole magnetickým materiálem (a) a bez lokalizace pole magnetickým materiálem (b). Velikost magnetické indukce poměrově neodpovídá.

zorné porovnání magnetické indukce na ose cívky s magnetickým obvodem (4.8a) a bez magnetického obvodu (4.8b) zachycuje obrázek 4.8.

Pro minimalizaci vad čočky, je třeba vhodně navrhnout geometrii magnetického obvodu. Je však také nutné vyhovět konstrukčním požadavkům, které často omezují nejlepší optický návrh. Při optickém návrhu předpokládáme polohu virtuálního zdroje v souřadnici $z = -200$ mm. Skutečný virtuální zdroj bude pravděpodobně mnohem dále před čočkou. Tato zvolená poloha je blízko stigmátoru, což snižuje jeho účinnost. Se změnou polohy předmětu se příliš nemění sférická a chromatická vada čočky, takže volba polohy zdroje není příliš významná.



Obrázek 4.9: Rozměrové parametry magnetického obvodu čočky, které nejvíce ovlivňují koeficient sférické vady.

4. ELEKTRONOVĚ OPTICKÝ SYSTÉM

Důležitými parametry ovlivňujícími nejvíce koeficienty vad, jsou šířka gapu S a poloměry vrtání D_1 a D_2 zakótované v obrázku 4.9 [2]. Největší vliv na velikost vad má z těchto tří rozměrových parametrů průměr vrtání D_2 . Vliv změny tohoto průměru na koeficienty osových vad zachycuje tabulka 4.3. Mimo koeficienty sférické a chromatické vady změna průměru vrtání také ovlivňuje potřebné buzení cívky I_b pro fokusaci do dané pracovní roviny, což je též patrné z tabulky 4.3. Vliv změny průměru vrtání D_1 na koeficienty sférické a chromatické vady a na buzení cívky při pracovní vzdálenosti 20 mm pak zachycuje tabulka 4.4. Tabulka 4.5 zase zachycuje vliv šířky gapu na tyto parametry opět při pracovní vzdálenosti 20 mm.

Tabulka 4.3: Vliv změny průměru vrtání D_2 na koeficienty sférické a chromatické vady a buzení cívky při pracovní vzdálenosti 20 mm.

D_1 (mm)	D_2 (mm)	S (mm)	C_s (mm)	C_c (mm)	I_b (Az)
45	10	20	138	38,2	1 714
45	20	20	120	38,4	1 823
45	30	20	106	37,6	1 954
45	40	20	93	36,7	2 103

Tabulka 4.4: Vliv změny průměru vrtání D_1 na koeficienty sférické a chromatické vady a buzení cívky při pracovní vzdálenosti 20 mm.

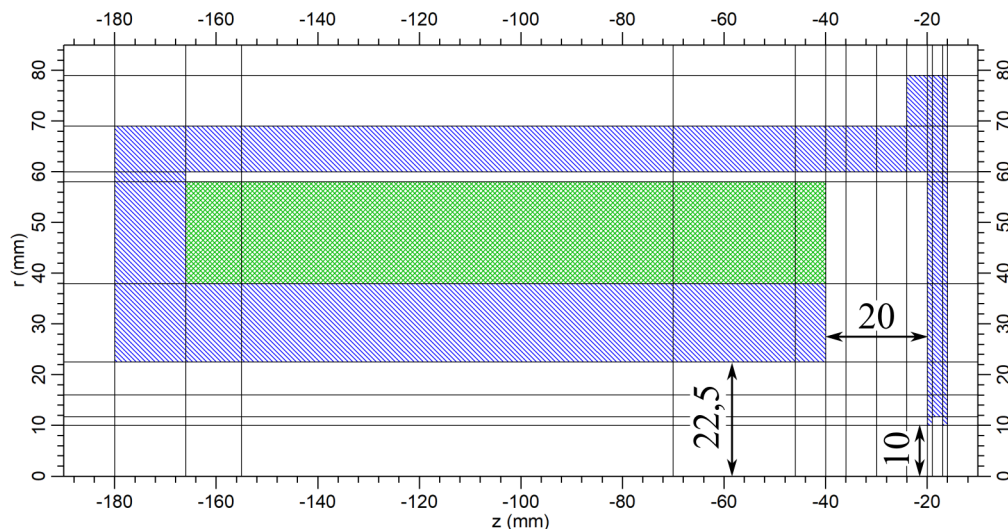
D_1 (mm)	D_2 (mm)	S (mm)	C_s (mm)	C_c (mm)	I_b (Az)
25	20	20	157	37,0	1 628
35	20	20	134	37,6	1 728
45	20	20	120	38,4	1 823
55	20	20	110	39,7	1 921

Tabulka 4.5: Vliv změny šířky gapu S na koeficienty sférické a chromatické vady a buzení cívky při pracovní vzdálenosti 20 mm.

D_1 (mm)	D_2 (mm)	S (mm)	C_s (mm)	C_c (mm)	I_b (Az)
45	20	15	123	36,5	1 800
45	20	20	120	38,4	1 823
45	20	25	118	40,7	1 854

Návrh magnetického obvodu čočky se skutečnými rozměrovými parametry je vidět na obrázku 4.10. Je zřejmé, že rozměry D_1 , D_2 a S nejsou zvoleny nejvhodněji tak, aby koeficient sférické vady byl co možná nejnižší, protože například z tabulky 4.3 vyplývá, že čím větší bude průměr vrtání D_2 , tím nižší bude sférická vada. Problém však je, že plocha vrtání je využita v konstrukčním návrhu k vakuovému těsnění prostoru blízko optické osy a je žádoucí, aby průměr vrtání nabýval hodnoty $D_2 = 20$ mm. Toto je přípustné především proto, že změna koeficientu sférické vady v řádu desítek milimetrů, vyplývající ze všech tří tabulek (4.3, 4.4 a 4.5), nemá nějak zásadní vliv na velikost průměru stopy. Průměr stopy je při použití žhavené katody v podobě wolframového vlákna mnohem

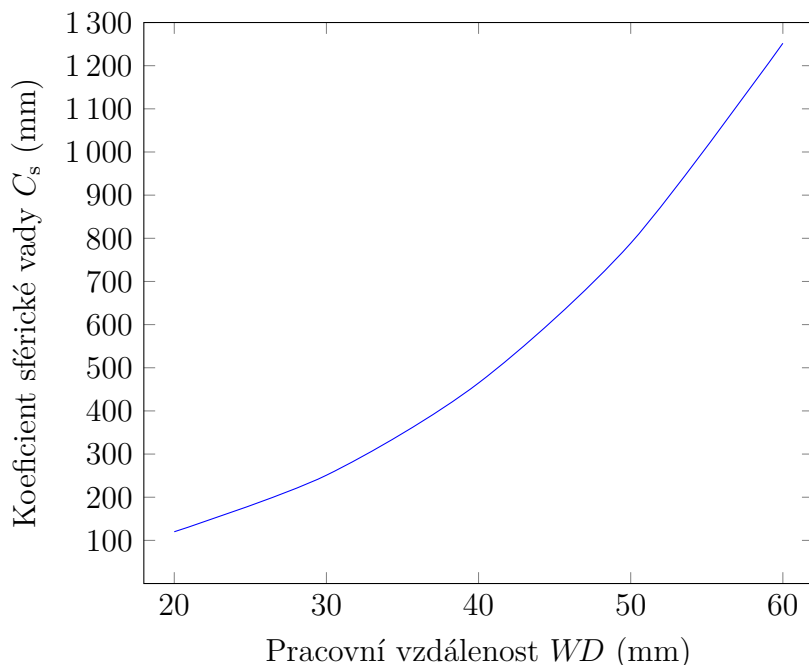
4.4. MAGNETICKÁ ČOČKA



Obrázek 4.10: Skutečné rozměry magnetického obvodu čočky.

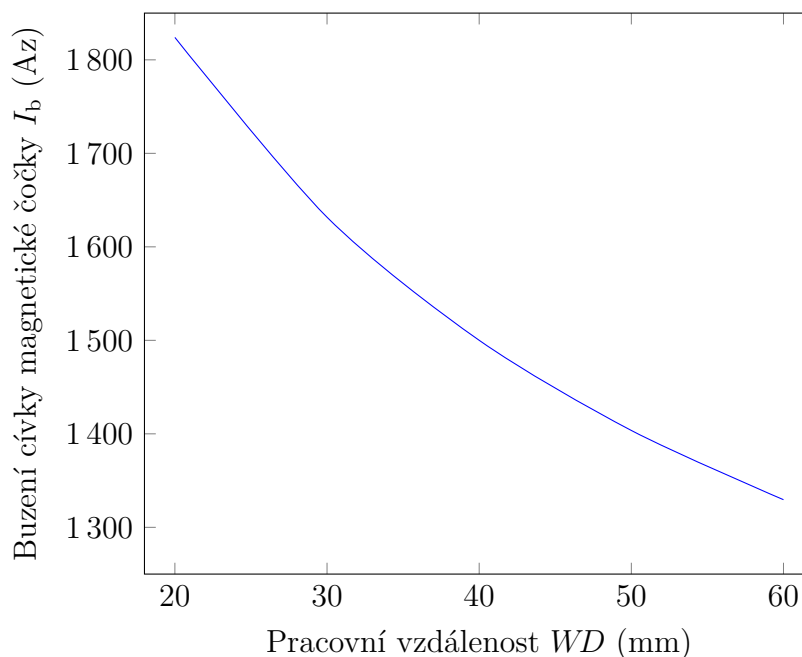
více ovlivněn jasnem zdroje viz kapitola 4.5. V případě, že by však do budoucna došlo k nahrazení žhaveného wolframového vlákna za zdroj s vyšším jasnem, se snahou docílit menších průměrů stop, mohla by vada sférická začít mít dominantní vliv na velikost stopy a musela by se upravit geometrie magnetického obvodu.

Vliv na velikost koeficientů sférické a chromatické vady má také pracovní vzdálenost značená WD (working distance), zakótovaná též v obrázku 4.9. V praxi pracovní vzdálenost reprezentuje vzdálenost svařovaného místa na svařovaném objektu od nejbližší plochy magnetického obvodu čočky. V našem návrhu elektronové svařičky uvažujeme, že při běžném použití se bude nejčastěji svařovat v rozsahu pracovních vzdáleností 20 mm až 60 mm.



Obrázek 4.11: Závislost koeficientu sférické vady C_s magnetické čočky na pracovní vzdálenosti WD pro rozsah pracovních vzdáleností 20 mm až 60 mm a při parametrech $D_1 = 45$ mm, $D_2 = 20$ mm a $S = 20$ mm.

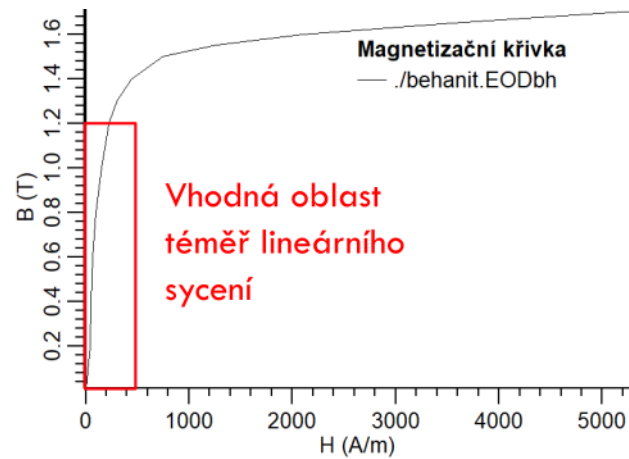
Velikost koeficientů vad ovlivňuje nejmenší dosažitelný průměr stopy při dané pracovní vzdálenosti. V naší aplikaci má sférická vada mnohem vyšší vliv na velikost stopy než vada chromatická. Obrázek 4.11 popisuje závislost koeficientu sférické vady na pracovní vzdálenosti. Z něho je jasně patrné, že s rostoucí pracovní vzdáleností roste koeficient sférické vady a tedy roste také nejmenší dosažitelný průměr stopy svazku v dané rovině zaostření. Obrázek 4.12 pak popisuje závislost potřebného buzení cívky magnetické čočky pro fokusaci do dané roviny fokusu na pracovní vzdálenosti. S rostoucí pracovní vzdáleností klesá potřebné buzení cívky.



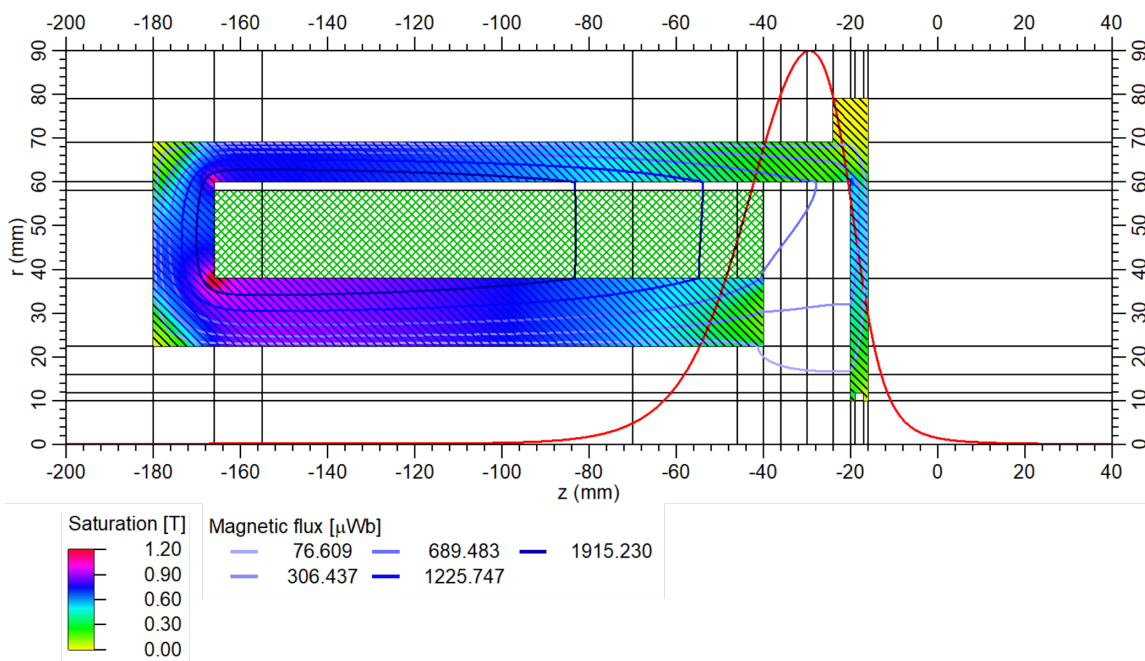
Obrázek 4.12: Závislost buzení cívky I_b magnetické čočky na pracovní vzdálenosti WD pro rozsah pracovních vzdáleností 20 mm až 60 mm a při parametrech $D_1 = 45$ mm, $D_2 = 20$ mm a $S = 20$ mm.

Čím vyšší je buzení cívky magnetické čočky, tím silnější magnetické pole je proudem procházejícím cívkou generováno. Magnetický obvod je navržen z behanitu. Každý magnetický materiál charakterizuje magnetizační křivka. Magnetizační křivku behanitu zachycuje obrázek 4.13. Ta udává závislost magnetické indukce v materiálu na vnějším poli. V lineární části křivky má materiál nejvyšší permeabilitu a je schopen absorbovat vnější pole, protože v něm stále ještě existují magnetické domény, které se mohou orientovat ve směru vnějšího pole. Při dalším zvyšování vnějšího pole už dochází k sycení materiálu, kdy vnější pole již částečně skrz materiál uniká. Ve vyznačené oblasti se dá permeabilita behanitu považovat téměř za konstantní a je tedy žádoucí z hlediska lineárního chování magnetické čočky, aby nedocházelo k překročení magnetické indukce v behanitu nad hodnotu přibližně 1,2 T. Jak plyne z obrázku 4.12, největší buzení (budicí proud cívky I_b) a tedy nejsilnější magnetické pole je při nejkratší pracovní vzdálenosti $WD = 20$ mm. Z toho tedy vyplývá úvaha, že pokud magnetická indukce v magnetickém obvodu čočky při této pracovní vzdálenosti nepřekročí v žádném místě materiálu hodnotu 1,2 T, tak k jejímu překročení nedojde ani při jakýchkoliv jiných provozních podmínkách a magnetická čočka se bude chovat lineárně. Míru sycení magnetického obvodu čočky navrženého z behanitu při fokusaci elektronového svazku do nejkratší pracovní vzdálenosti

4.5. VELIKOST STOPY



Obrázek 4.13: Magnetizační křivka behanitu.



Obrázek 4.14: Sycení magnetického obvodu čočky navrženého z behanitu při fokusaci do pracovní vzdálenosti 20 mm. Vykreslena je i magnetické indukce na ose, jejíž maximální velikost je 0,073 T při buzení čočky 1 823 Az, a magnetické siločáry.

$WD = 20$ mm zachycuje obrázek 4.14. Je z něj patrné, že mimo artefakty v ostrých rozích magnetická indukce v materiálu nikde nepřesahuje hodnotu 1,2 T a lze tedy konstatovat, že magnetický obvod je vhodně navržen tak, aby se čočka při provozu chovala lineárně.

4.5. Velikost stopy

Parametry ovlivňující velikost stopy jsou jas zdroje, difrakce, sférická vada a chromatická vada. To je patrné ze vztahu pro kvadrát průměru stopy svazku

$$d^2 = \frac{4I}{\beta\pi^2\alpha^2} + \left(\frac{0,61\lambda}{\alpha}\right)^2 + (0,5 C_s \alpha^3)^2 + \left(C_c \alpha \frac{\Delta E}{E}\right)^2,$$

kde β je jas zdroje, I proud svazku, α aperturní úhel, C_s koeficient sférické vady čočky, C_c koeficient chromatické vady čočky, E energie svazku a ΔE energiový rozptyl [1, 10].

Zdroj elektronů svařečky je charakterizován parametry dle tabulky 4.6. Koeficienty vad magnetické čočky se mění s pracovní vzdáleností dle tabulky 4.7.

Tabulka 4.6: Parametry zdroje elektronů důležité k výpočtu průměru stopy.

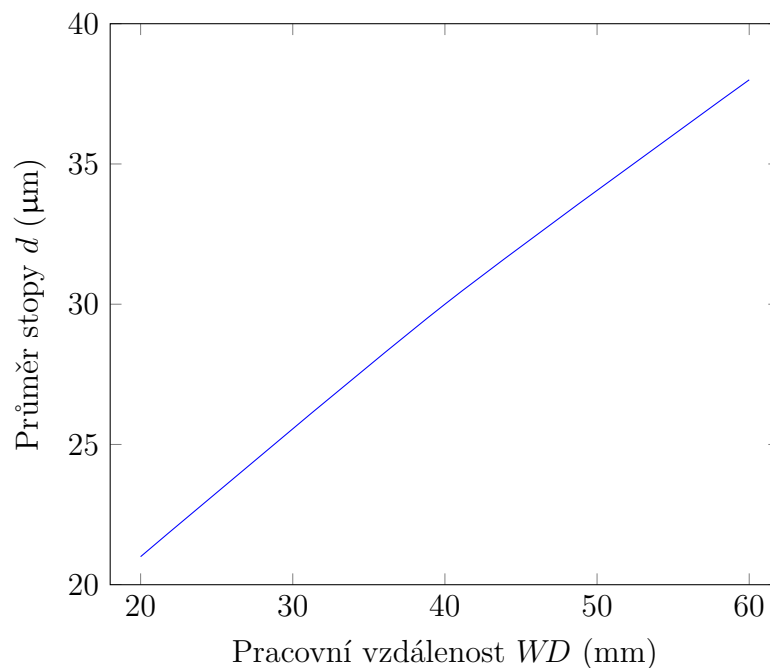
β (A/m ² /sr)	P (kW)	ΔE (eV)	E (keV)	I (mA)
$6 \cdot 10^9$	0,94	2	60	15,67

Tabulka 4.7: Změna koeficientů vad magnetické čočky a optimální aperturní úhel v závislosti na změně pracovní vzdálenosti.

WD (mm)	C_s (mm)	C_c (mm)	α (mrad)
20	120	38,4	56
40	465	67,4	40
60	1 252	101,5	31

Úhlové zvětšení čočky při poloze virtuálního zdroje v souřadnici $z = -200$ mm a pracovní vzdálenosti $WD = 20$ mm nabývá hodnoty $M_a = -4,47$ a přímé zvětšení čočky pak tedy hodnoty $M = -0,22$. Předměťový aperturní úhel při pracovní vzdálenosti 20 mm potom je 12,5 mrad.

Závislost velikosti průměru stopy na pracovní vzdálenosti zachycuje obrázek 4.15. Z obrázku je patrné, že nejmenší možný průměr stopy, kterého bude možno při svařování docílit je $d = 21 \mu\text{m}$. Příspěvek od jasu zdroje k velikosti průměru stopy je $d_G = 18,3 \mu\text{m}$, příspěvek od sférické vady $d_S = 10,6 \mu\text{m}$, od vady chromatické $d_C = 0,07 \mu\text{m}$ a difrakce



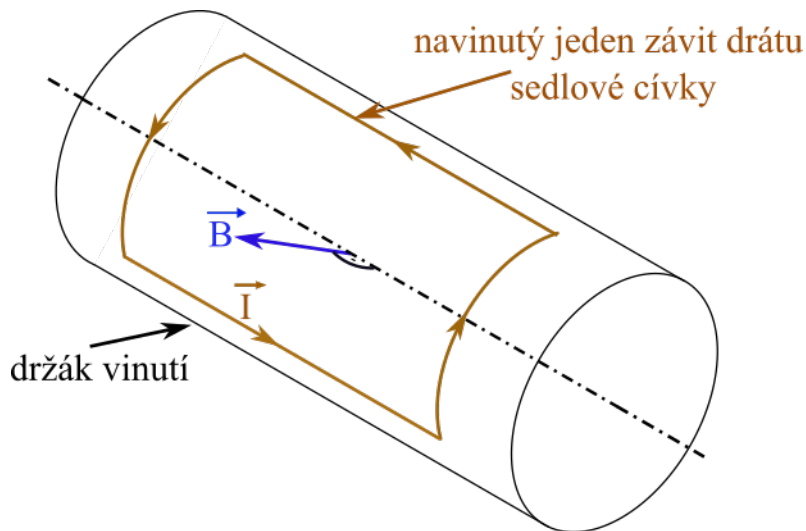
Obrázek 4.15: Závislost velikosti stopy elektronového svazku na pracovní vzdálenosti při energii svazku 60 keV a proudu svazku 15,67 mA.

4.6. DEFLEKTORY

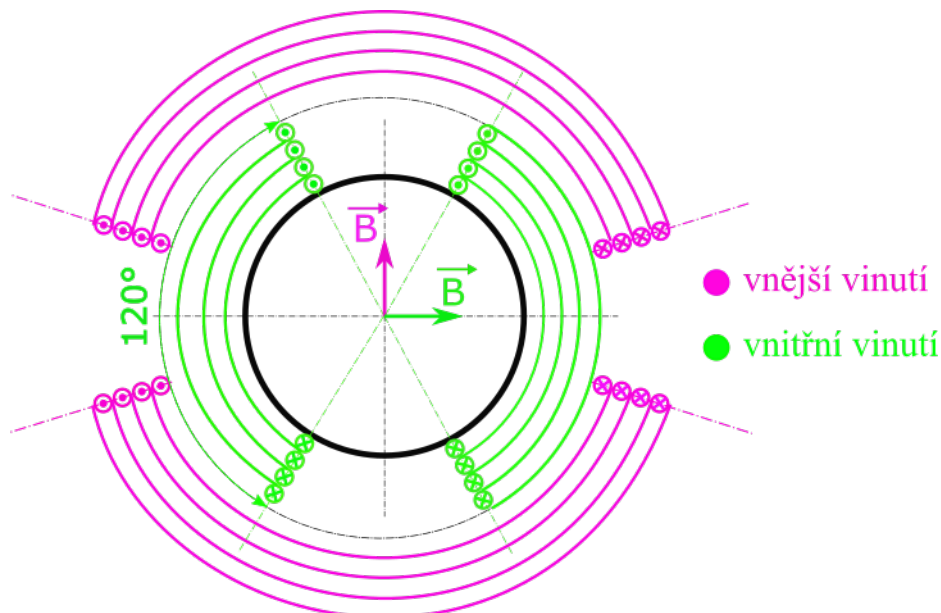
k průměru stopy nepřispívá. Z toho je patrné, že vliv chromatické vady a difrakce je zanedbatelný. Při určování velikosti stopy není uvažován vliv prostorového náboje svazku ani vliv náhodných interakcí elektronů.

4.6. Deflektory

Pod pojmem deflektor se v našem případě rozumí soubor čtyř vychylovacích sedlových cívek. Schéma zachycující podobu sedlové cívky je na obrázku 4.16. Řez deflektorem (v rovině kolmé na optickou osu) je na obrázku 4.17. Cívky jsou vinuty pod úhlem 120° a to



Obrázek 4.16: Schéma zachycující navinutí jednoho závitu sedlové cívky, kterým prochází proud generující magnetické pole \vec{B} .

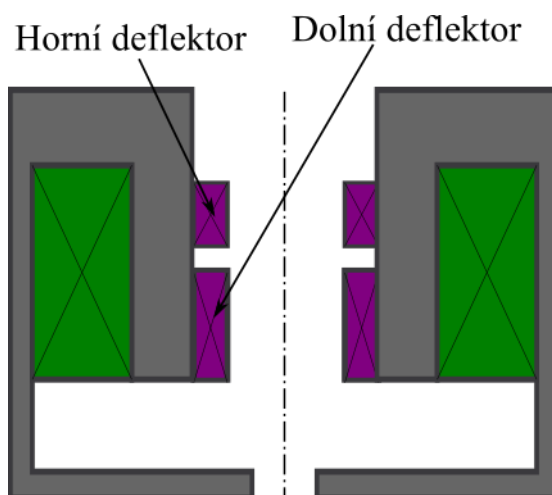


Obrázek 4.17: Řez deflektorem (v rovině kolmé na optickou osu) se čtyřmi sedlovými cívkami s úhlem vinutí 120° , se znázorněnými směry proudů v cívkách a magnetickými poli jimi generovanými.

z důvodu, aby nedocházelo ke vzniku hexapólové složky pole, která by měla negativní vliv na stopu elektronového svazku a tedy i na kvalitu svaru.

Důvod proč deflektor obsahuje vnitřní a vnější dvojice cívek, které jsou vzájemně pootočené je ten, že jen takto lze docílit vychylování ve všech směrech kolmých na osu pomocí vhodné kombinace kolmých magnetických polí vychylovacích cívek. K vychylování dochází tak, že cívky jsou připojeny na napětí a vlivem procházejícího proudu vzniká magnetické pole ovlivňující trajektorie elektronů svazku. Změnou proudu v cívkách jsme schopni měnit vychýlení svazku v rovině zaostření svazku.

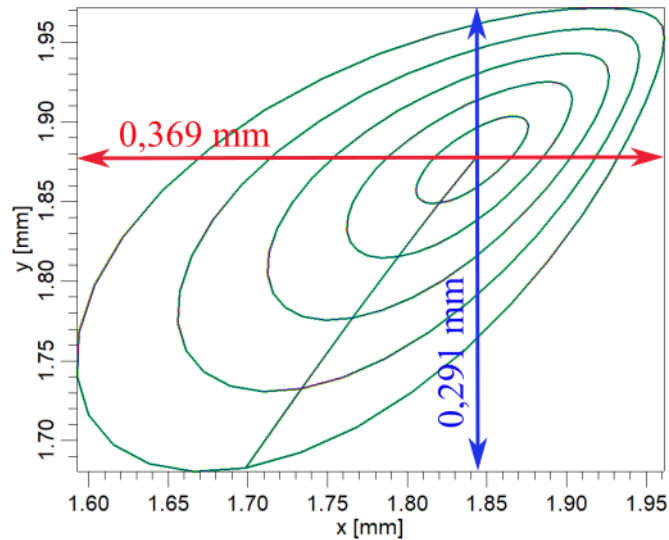
Z obrázku 4.18 je patrné, že elektronově optický systém obsahuje dva deflektory (horní deflektor a dolní deflektor). Nejvhodnější umístění deflektorů pro naši aplikaci je uvnitř čočky. V případě, že by vychylovací systém byl umístěn za magnetickou čočku, ubíral by prostor na to, aby svařovaný objekt mohl být co nejvíce přiblížen k magnetické čočce a z toho důvodu by rostla nejmenší možná dosažitelná pracovní vzdálenost a tím pádem by rostl i nejmenší dosažitelný průměr stopy elektronového svazku. Zároveň by bylo problematické svařovat magnetické materiály, protože pole deflektorů by jimi bylo ovlivněno.



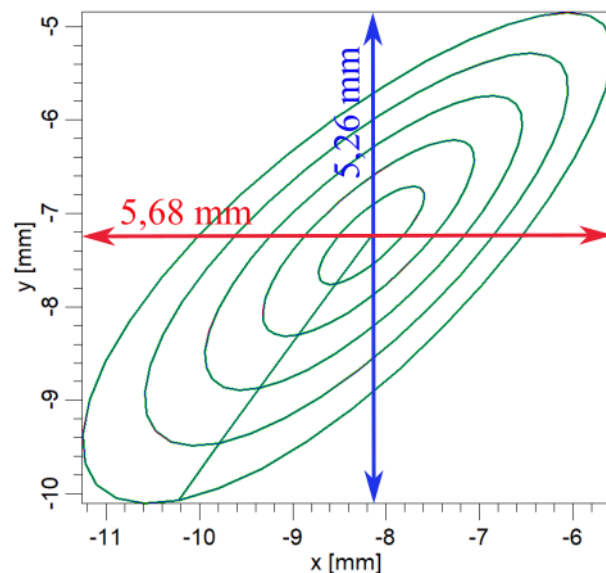
Obrázek 4.18: Schematický obrázek umístění vychylovacího systému složeného z horního a dolního deflektoru.

S rostoucí výchylkou svazku od optické osy rostou projevy vad vychýlení. V případě, že by návrh obsahoval pouze jeden deflektor, tak pro dosažení stejného vychýlení, jako pomocí dvou deflektorů, by elektronový svazek musel procházet oblastí mnohem dále od optické osy, a proto by vychylovací systém pouze s jedním deflektorem byl mnohem více zatížen vadami vychýlení. Obrázek 4.19 zachycuje stopu elektronového svazku vychýleného do $x = 2$ mm a $y = 2$ mm pouze pomocí dolního deflektoru. Vlivem zkreslení se však stopa nachází mimo požadované místo vychýlení a také mnohonásobně vzrostla velikost stopy vlivem vad vychýlení vzhledem k stopě nevychýleného svazku. Vliv vad vychýlení by byl ještě mnohem větší v případě, že by se použil k vychylování pouze horní deflektor, protože ten se nachází dále od hlavní roviny magnetické čočky než deflektor dolní a elektronový svazek se při vychýlení dostává ještě do větší vzdálenosti od optické osy. Obrázek 4.20 zachycuje stopu elektronového svazku vychýleného opět do $x = 2$ mm a $y = 2$ mm tentokrát pomocí pouze horního deflektoru. Vlivem velkého zkreslení je stopa posunuta do velkých záporných hodnot.

4.6. DEFLEKTORY



Obrázek 4.19: Stopa elektronového svazku vychýleného do $x = 2$ mm a $y = 2$ mm pomocí pouze dolního deflektoru pro pracovní vzdálenost $WD = 20$ mm, předmětový aperturní úhel $\alpha = 9,12$ mrad a energii svazku 60 keV.

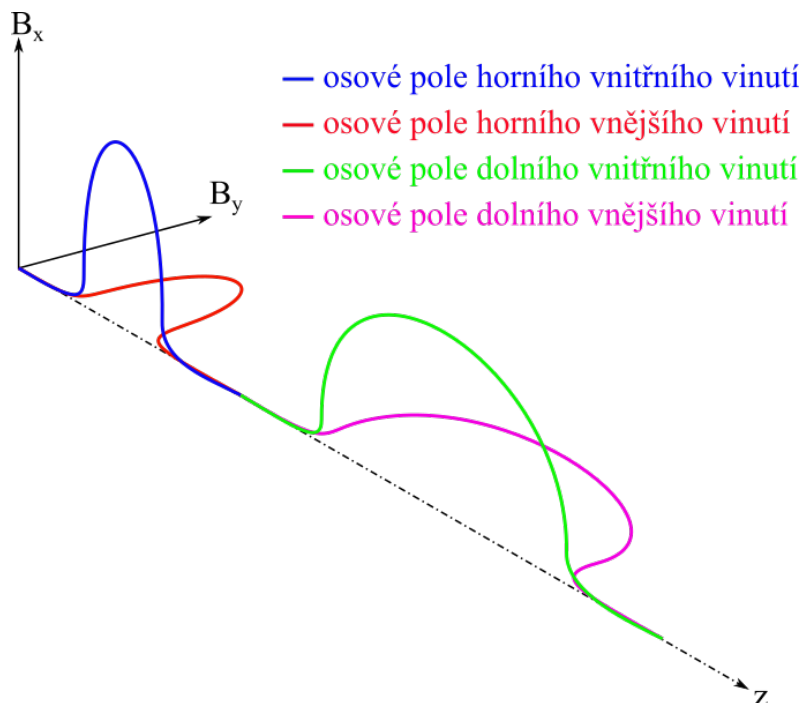


Obrázek 4.20: Stopa elektronového svazku vychýleného do $x = 2$ mm a $y = 2$ mm pomocí pouze horního deflektoru pro pracovní vzdálenost $WD = 20$ mm, předmětový aperturní úhel $\alpha = 9,12$ mrad a energii svazku 60 keV.

K snížení vlivu vad vychýlení je tedy třeba, aby návrh obsahoval deflektory dva, tedy deflektor horní a dolní. Vady vychylovacího systému jako je astigmatismus a zklenutí můžeme korigovat pomocí dynamického stigmátoru a pomocí dynamické fokusace. Zkreslení systému se dá řešit tak, že se elektronový svazek vychýlí do předem propočítaného místa tak, aby vlivem zkreslení byl elektronový svazek v takovém místě, kam je doopravdy záměr vychylovat.

Největší problém je koma vychylovacího systému, jejíž odstranění je druhým důvodem toho, proč je vhodné mít vychylovací systém složený ze dvou deflektorů. Komu vychýlení totiž nelze eliminovat jinak, než pomocí vhodného vzájemného natočení polí dvou deflek-

torů. Vzájemné natočení polí deflektorů se provádí pomocí rozdílného buzení deflektorů vychylujících v kolmých směrech. Je tedy třeba určit potřebná buzení jednotlivých vnějších a vnitřních vinutí horního a dolního deflektoru, tak aby koma vychýlení byla co nejmenší. Obrázek 4.21 zachycuje osová dipólová pole vnějších a vnitřních cívek horního a dolního deflektoru. V prvním kroku eliminace komy je z dolního deflektoru aktivní pouze vnitřní



Obrázek 4.21: Schematické znázornění orientace osových dipólových polí vnějších a vnitřních cívek horního a dolního deflektoru.

vinutí. Vnější vinutím neprochází proud a negeneruje tedy magnetické pole. Buzení vnitřního vinutí dolního deflektoru je nastaveno na hodnotu 1 Az . Vnitřní a vnější vinutí horního deflektoru je nastaveno jako závislé na vnitřním vinutí dolního deflektoru a hledá se taková kombinace buzení vnějšího a vnitřního vinutí horního deflektoru, aby koma vychýlení byla co nejmenší. Nejmenší koeficient komy vychýlení je při buzení vnitřního vinutí horního deflektoru $h_{1,\text{in}} = -0,89785 \text{ Az}$ a buzení vnějšího vinutí horního deflektoru $h_{1,\text{out}} = 0,31453 \text{ Az}$. Při takto nastaveném dolním vnitřním vinutí, horním vnitřním vinutí a horním vnějším vinutí je elektronový svazek vychylován při energii svazku $E = 60 \text{ keV}$ ve směru x do $\Gamma_{1,x} = 0,1070 \text{ mm}$ a ve směru y do $\Gamma_{1,y} = -0,03095 \text{ mm}$.

V druhém kroku se proces opakuje, tentokrát však s aktivním vnějším vinutím dolního deflektoru s buzením 1 Az a neaktivním vnitřním vinutím dolního deflektoru. Opět se hledá vhodné buzení vnitřního a vnějšího vinutí horního deflektoru pro minimalizaci komy vychýlení. Nejmenší koeficient komy vychýlení je v tomto případě při buzení vnitřního vinutí horního deflektoru $h_{2,\text{in}} = -0,24836 \text{ Az}$ a buzení vnějšího vinutí horního deflektoru $h_{2,\text{out}} = -0,89892 \text{ Az}$. Při takto nastaveném dolním vnějším vinutí, horním vnitřním vinutí a horním vnějším vinutí je elektronový svazek vychylován při energii svazku $E = 60 \text{ keV}$ ve směru x do $\Gamma_{2,x} = 0,02907 \text{ mm}$ a ve směru y do $\Gamma_{2,y} = 0,09553 \text{ mm}$.

Díky znalosti hodnot určených v prvním a druhém kroku je možno následně určit potřebná buzení všech vinutí pro vychylování s minimalizovanou komou vychýlení do

4.6. DEFLEKTORY

zvoleného místa. Řekněme, že chceme vychylovat svazek do bodu $x_v = 2\text{ mm}$ a $y_v = 2\text{ mm}$. Platí tedy rovnice

$$I_{d,\text{in}} \cdot \Gamma_{1,x} + I_{d,\text{out}} \cdot \Gamma_{2,x} = x_v,$$

$$I_{d,\text{in}} \cdot \Gamma_{1,y} + I_{d,\text{out}} \cdot \Gamma_{2,y} = y_v,$$

kde $I_{d,\text{in}}$ je buzení vnitřního vinutí dolního deflektoru a $I_{d,\text{out}}$ je buzení vnějšího vinutí dolního deflektoru. Tyto rovnice dávají soustavu dvou lineárních rovnic se dvěma neznámými $I_{d,\text{in}}$ a $I_{d,\text{out}}$. Řešením této soustavy určíme potřebná buzení vnitřního a vnějšího vinutí dolního deflektoru pro vychylování do 2 mm ve směrech x a y . Potřebné buzení vychází $I_{d,\text{in}} = 11,951\text{ Az}$ a $I_{d,\text{out}} = 24,806\text{ Az}$.

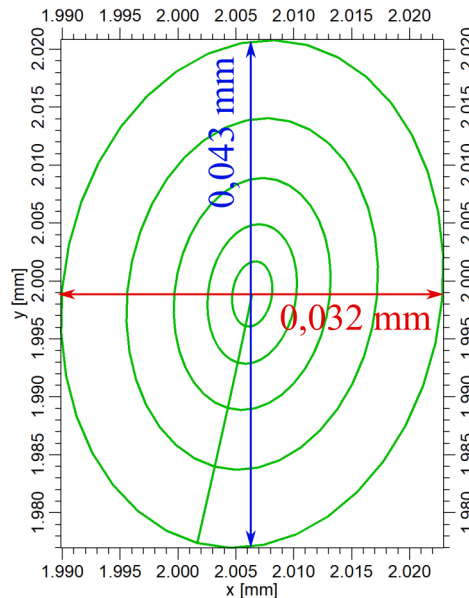
Potřebná buzení vnitřního a vnějšího vinutí horního deflektoru lze určit z rovnic

$$I_{h,\text{in}} = h_{1,\text{in}} \cdot I_{d,\text{in}} + h_{2,\text{in}} \cdot I_{d,\text{out}},$$

$$I_{h,\text{out}} = h_{1,\text{out}} \cdot I_{d,\text{in}} + h_{2,\text{out}} \cdot I_{d,\text{out}},$$

kde $I_{h,\text{in}}$ je buzení vnitřního vinutí horního deflektoru a $I_{h,\text{out}}$ je buzení vnějšího vinutí horního deflektoru. Potřebné buzení vnitřního a vnějšího vinutí horního deflektoru pro vychylování do 2 mm ve směrech x a y vychází $I_{h,\text{in}} = -16,890\text{ Az}$ a $I_{h,\text{out}} = -18,538\text{ Az}$. Součástí příloh této práce je také skript v Matlabu, který automatizuje tento výpočet potřebného buzení cívek vychylovacího systému při zadání potřebného vychylování.

Jestliže jsou vychylovací cívky buzeny proudy dle předešlých výpočtů, bude vychylovací systém vychylovat 2 mm ve směru x i y . Stopu vychýleného svazku zachycuje obrázek 4.22. Průměr stopy při předmětovém aperturním úhlu 9,12 mrad ve směru x je $d_x = 0,032\text{ mm}$ a ve směru y pak $d_y = 0,043\text{ mm}$. Koma vychýlení je eliminována, ale vychýlený elektronový svazek je zatížen astigmatismem, zklenutím a zkreslením. Koeficienty vad vychýlení deflektorů zachycuje tabulka 4.8. Eliminace astigmatismu vychýlení



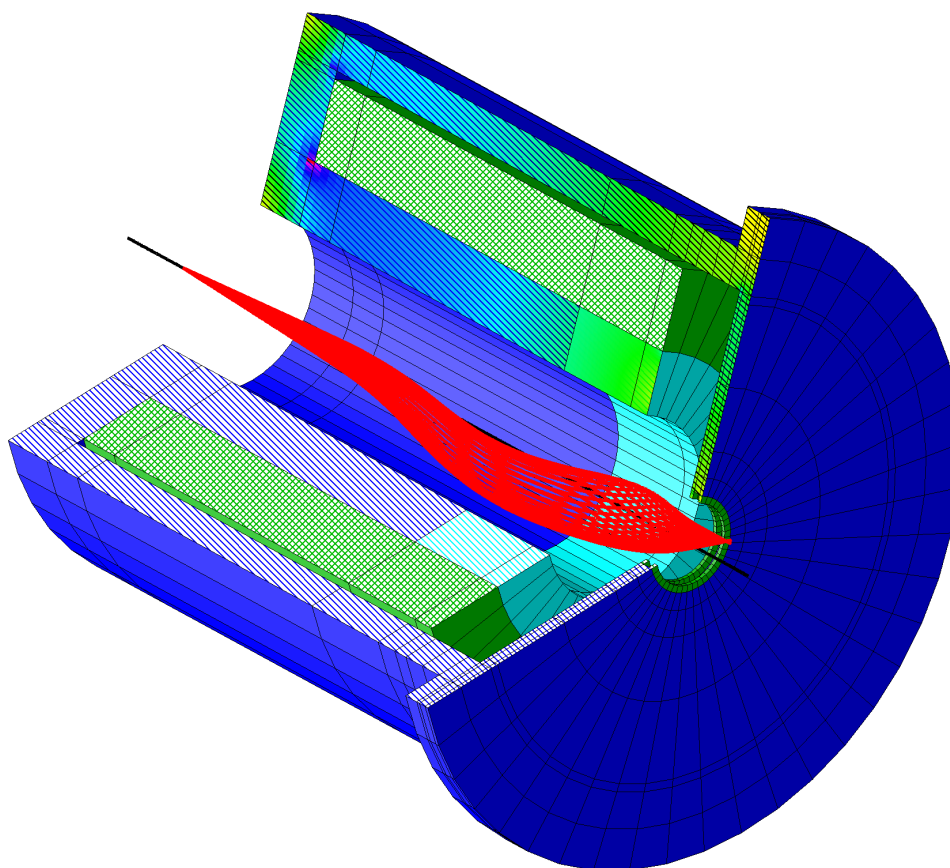
Obrázek 4.22: Stopa vychýleného elektronové svazku o 2 mm ve směru x i y při pracovní vzdálenosti $WD = 20\text{ mm}$, předmětovém aperturním úhlu $\alpha = 9,12\text{ mrad}$, energii svazku 60 keV a nejhodnějším nastavení buzení všech cívek deflektorů tak, aby byla minimalizovaná koma vychýlení.

Tabulka 4.8: Velikosti koeficientů vad vychýlení deflektorů při buzení jejich vinutí tak, aby byla minimalizovaná koma vychýlení.

Koma vychýlení (–)	$7,7 \cdot 10^{-4}$
Astigmatismus (mm^{-1})	$8,7 \cdot 10^{-3}$
Zklenutí (mm^{-1})	$3,4 \cdot 10^{-2}$
Zkreslení (mm^{-2})	$2,8 \cdot 10^{-4}$

by byla příliš komplikovaná a jeho projev je pro aplikaci elektronového svařování zanedbatelný. Zkreslení je při výchylce 2 mm ve směrech x a y pouze 0,2%. Vliv chromatické vady vychýlení je zanedbatelný

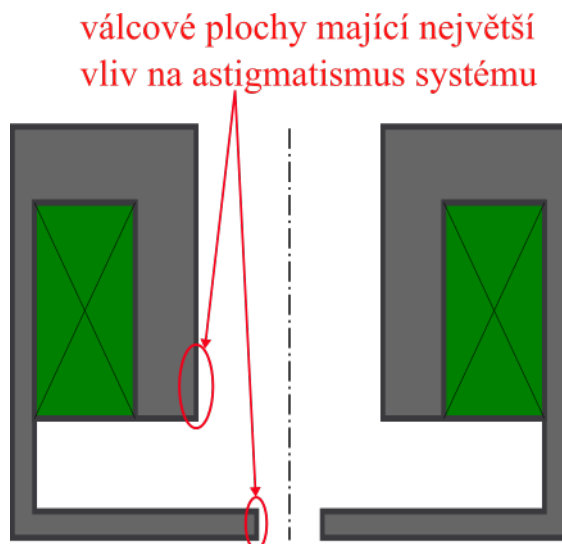
Chod elektronového svazku čočkou při výchylce 2 mm ve směrech x a y je znázorněn na obrázku 4.23 při předmětovém aperturním úhlu 12,5 mrad odpovídajícím maximálnímu výkonu svazku. Vzdálenost od osy je vynásobena 4 pro zvýraznění vychýlení. Je zobrazena pouze čočka. Deflektory a stigmátor jsou skryty. Elektronky se nacházejí nejdále 3 mm od osy, což je 40% vnitřního poloměru lineru, který je 8 mm. Je tedy možné vychylovat i do dvojnásobné vzdálenosti.



Obrázek 4.23: Trajektorie vychýleného elektronové svazku při výchylce o 2 mm ve směru x i y a při pracovní vzdálenosti $WD = 20$ mm, předmětovém aperturním úhlu $\alpha = 12,5$ mrad, energii svazku 60 keV a nejvhodnějším nastavení buzení všech cívek deflektorů tak, aby byla minimalizovaná koma vychýlení. Radiální vzdálenost je 4krát zvětšena. Ve skutečnosti se okraj svazku nachází ve vzdálenosti od osy maximálně 3 mm.

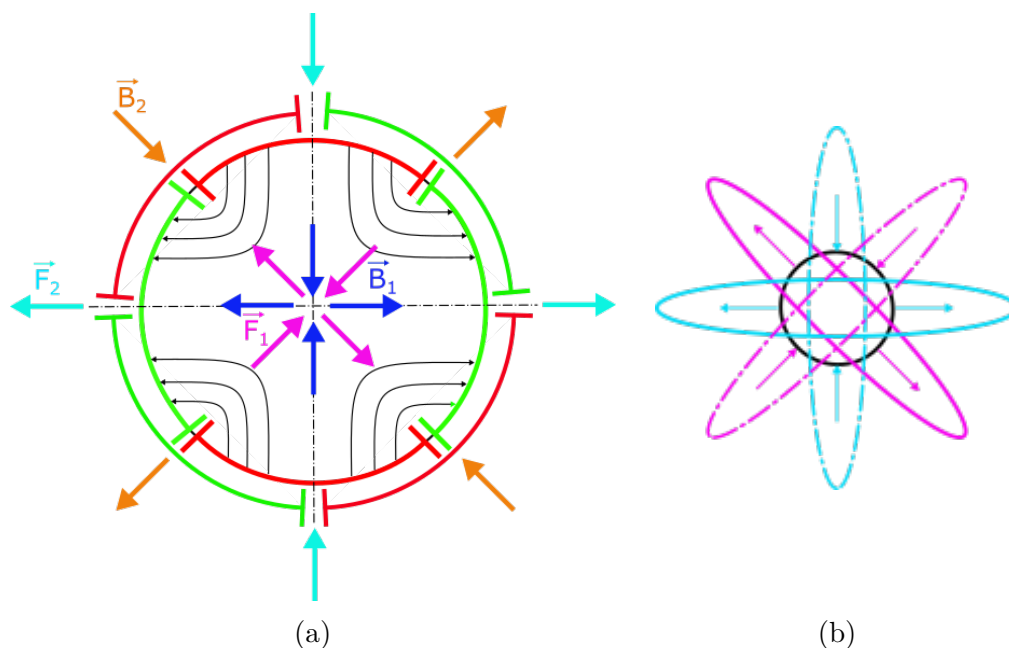
4.7. Stigmátor

Vlivem nepřesností výroby vnitřních částí válcových ploch magnetického obvodu čočky znázorněných na obrázku 4.24 dochází k tomu, že elektrony dopadající na svařovaný objekt ve dvou kolmých rovinách k optické ose mají jinou vzdálenost od optické osy. To znamená, že místo ideální kruhové stopy je stopa elektronového svazku eliptická. Této vadě, kterou je elektronově optický systém zatížen, se říká astigmatismus a ten je třeba korigovat. Ke korekci astigmatismu čočky se využívá elektronově optický prvek zvaný stigmátor.

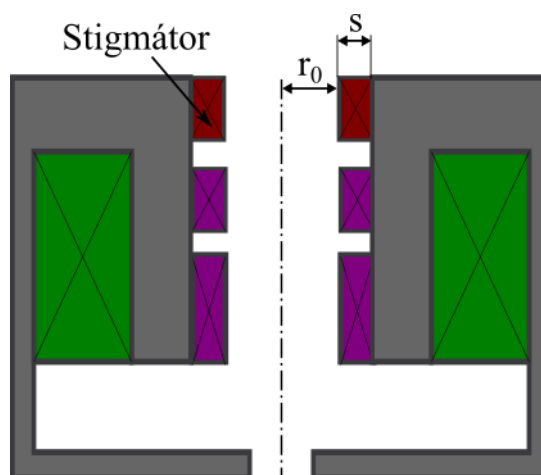


Obrázek 4.24: Válcové plochy magnetického obvodu čočky jejichž nepřesnost výroby zatěžuje elektronově optický systém astigmatismem.

Stigmátorem se rozumí čtyři vnitřní a čtyři vnější sedlové cívky obvykle s úhlem vinutí přibližně 90° . V tomto návrhu je však, z důvodu vzájemného překryvu vinutí, vnitřní vinutí stigmátoru navrženo s úhlem vinutí 72° a vnější vinutí stigmátoru s úhlem vinutí 76° . Při zmenšení úhlu vinutí stigmátoru se snižuje osové pole, takže stigmátor bude mít mírně menší účinnost než očekáváme. Obrázek 4.25a zachycuje schematický řez stigmátorem (v rovině kolmé na optickou osu) s úhlem vinutí přibližně 90° . Sedlovými cívkami prochází proud generující magnetické pole. Magnetické pole vnitřních cívek stigmátoru je znázorněné na obrázku 4.25a modrou barvou a magnetické pole vnějších cívek stigmátoru je znázorněno barvou oranžovou. Tato pole na elektronový svazek působí silami znázorněnými barvou růžovou a tyrkysovou. Pro přehlednost jsou síly vnějších cívek a směr indukce nakresleny vně. Z obrázku 4.25b je patrné, že pole stigmátoru jsou schopna měnit stopu elektronového svazku z kruhové na eliptickou a z eliptické na kruhovou (obr. 4.25b), díky tomu je stigmátor schopen korigovat astigmatismus systému. Stigmátor umísťujeme nad deflektory (viz obrázek 4.26), tak aby pole generováno stigmátorem bylo co nejméně ovlivněno poli deflektorů. V prvotním návrhu byla zvolena hodnota maximálního budicího proudu cívek 250 mA, se snahou, aby nedocházelo k přílišnému zahřívání a nebylo nutné složité řešit chlazení cívek. Z tepelné analýzy v kapitole 4.9 však vyplynulo, že stigmátor se příliš nezahřívá, a proto bude možno cívky stigmátoru případně budit větším proudem. Vnitřní poloměr vinutí r_0 zakótovaný v obrázku 4.26 nabývá ve skutečném návrhu hodnoty 12 mm a šířky vinutí $s = 2,5$ mm u vnitřních cívek a $r_0 = 16$ mm a šířky vinutí $s = 3,5$ mm u vnějších cívek. Mezi vnitřním a vnějším vinutím je radiální vzdálenost



Obrázek 4.25: (a) Řez stigmátorem (v rovině kolmé na optickou osu) se schematickým zachycením silového působení magnetického pole. (b) Vliv stigmátoru na tvar stopy elektronového svazku.



Obrázek 4.26: Schematický obrázek umístění stigmátoru se zakótovaným vnitřním poloměrem vinutí r_0 a šířkou vinutí s .

1,5 mm z důvodu obav o pevnost podpěr z ABS vymezujících oblast pro vinutí závitů. Bylo by vhodnější mít vnější vinutí blíže ose. Pokud bychom nechali jen 0,5 mm mezeru, vzrostlo by osové pole vnějšího stigmátoru o cca 8 %.

Takto navržené cívky stigmátoru jsou při proudu vinutím 250 mA schopny při buzení 27,3 Az (vnitřní cívky) a 38,8 Az (vnější cívky) každá korigovat osový astigmatismus $k_A = 0,4$ mm. Díky této znalosti maximální možné míry korekce astigmatismu stigmátorem, je možno určit potřebnou toleranci obvodového házení vnitřních válcových ploch magnetického obvodu čočky tak, aby elipticita ploch vzniklá při výrobě nezpůsobovala astigmatismus větší, než jaký je stigmátor schopen zkorigovat. Z praxe vyplývá [12], že elipticita ploch je s obvodovým házením spjatá přímo v poměru 1:1. To znamená, že po-

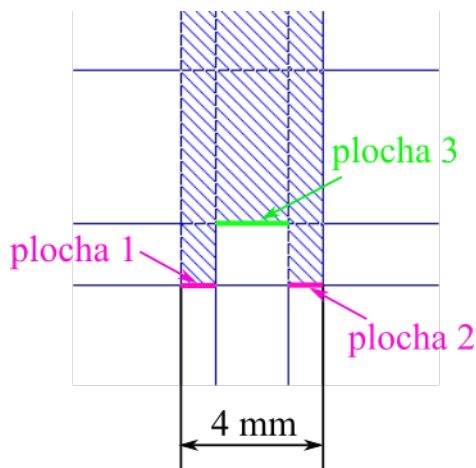
4.7. STIGMÁTOR

kud elipticita ploch velikosti například 0,1 mm způsobí astigmatismus na hranici toho, co stigmátor zvládne zkorigovat, tak pak je nutné tolerovat plochy obvodovým házením 0,1 mm. V případě, že by elipticita ploch velikosti 0,1 mm způsobila astigmatismus větší, než je maximální dosažitelná míra korekce stigmátorem, tak to znamená, že vnitřní válcové plochy magnetického obvodu čočky nepostačí tolerovat na obvodové házení 0,1 mm, ale bude se muset zvolit tolerance přísnější (například 0,05 mm).

Na obrázku 4.27 je zachycen detail ploch dolního pólového nástavce. Z toleranční analýzy dolního pólového nástavce také vyplynulo, že plocha drážky pro těsnicí kroužek označená na obrázku 4.27 číslem 3 (zelená barva) nemá téměř vliv na velikost astigmatismu a tedy není třeba ji přísněji tolerovat. Největší vliv na velikost astigmatismu má u dolního pólového nástavce elipticita ploch 1 a 2.

Detail horního pólového nástavce je zachycen na obrázku 4.28. Z toleranční analýzy horního pólového nástavce vyplynulo, že přísněji tolerovat na obvodové házení má cenu pouze vnitřní válcovou plochu 4 do vzdálenosti 30 mm od gapu magnetické čočky. Elipticita válcové plochy vzdálenější více jak 30 mm od gapu totiž téměř nepřispívá k velikosti astigmatismu.

Z výsledků toleranční analýzy popsané v tabulkách 4.9 a 4.10 je patrné, že astigmatismus generovaný elipticitou obou válcových je přibližně stejný.

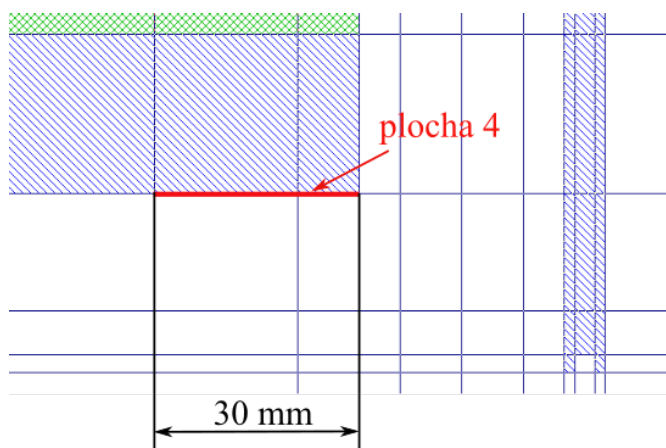


Obrázek 4.27: Detail dolního pólového nástavce magnetické čočky s vyznačenými vnitřními válcovými plochami. Plochy 1 a 2 jsou tolerovány. Plocha 3 není tolerována.

Tabulka 4.9: Vliv elipticity vnitřní válcové plochy dolního pólového nástavce magnetické čočky na koeficient astigmatismu.

Elipticita dolního pólového nástavce (mm)	Koeficient astigmatismu k_A (mm)
1	4,06
0,1	0,41
0,05	0,20

Z tabulek 4.9 a 4.10 pak vyplývá, že aby stigmátor byl schopen zcela jistě korigovat astigmatismus způsobený elipticitou vnitřních válcových ploch 1 a 2 dolního pólového nástavce a elipticitu plochy horního pólového nástavce, tak tyto plochy budou muset být



Obrázek 4.28: Detail horního pólového nástavce magnetické čočky s vyznačenou tolerovanou vnitřní válcovou plochou.

Tabulka 4.10: Vliv elipticity vnitřní válcové plochy horního pólového nástavce magnetické čočky na koeficient astigmatismu.

Elipticita horního pólového nástavce (mm)	Koeficient astigmatismu k_A (mm)
1	4,34
0,1	0,43
0,05	0,22

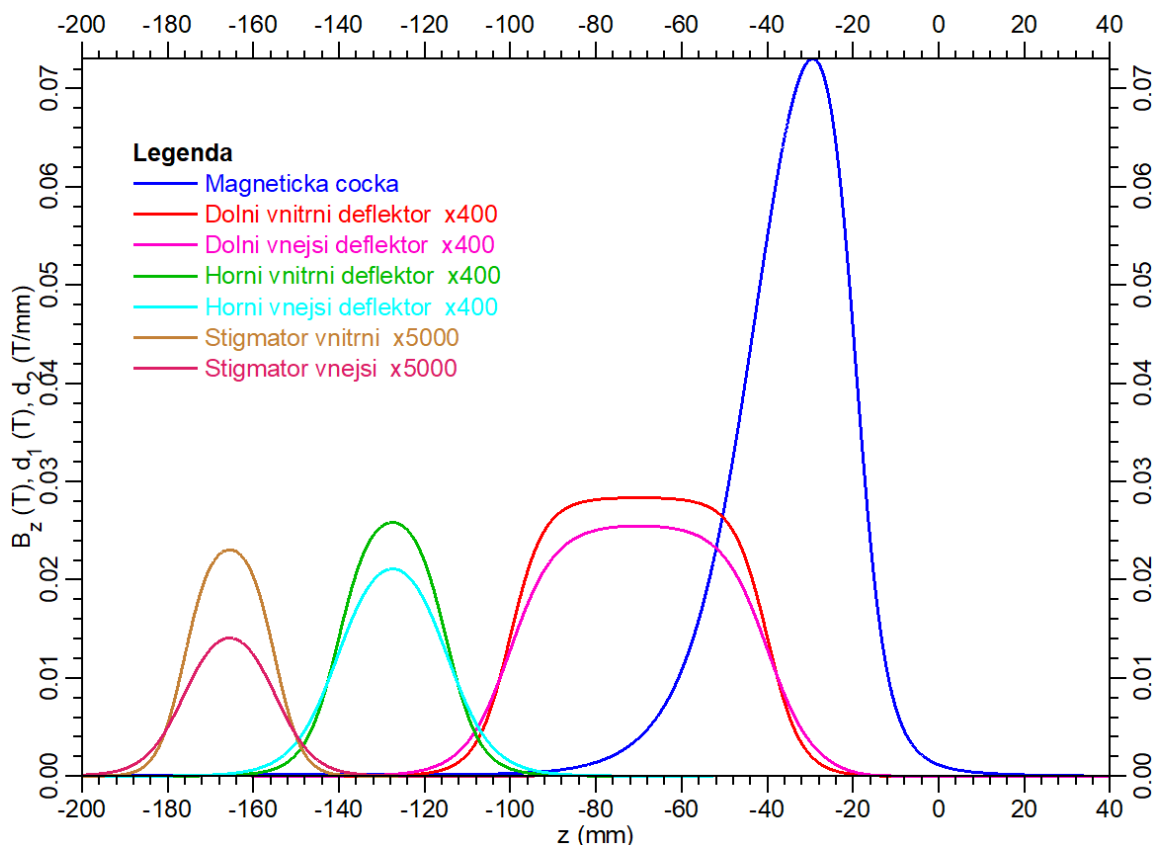
vyrobeny s tolerancí obvodového házení 0,05 mm. Maximální možná hodnota koeficientu astigmatismu by potom byla $k_A = 0,42$ mm a jak vnitřní nebo vnější cívky stigmátoru by byly schopny astigmatismus odstranit.

4.8. Parametry cívek elektronově optických prvků

Cívky vinutí jsou jedním ze základních prvků elektronově optického systému. Jak již bylo mnohokrát v kapitolách výše zmíněno, díky připojení cívek na napětí jimi prochází proud generující magnetické pole. Magnetická čočka, vychylovací systém a také stigmátor obsahují navinuté cívky. U všech těchto vinutí je třeba vhodně zvolit jeho parametry tak, aby vinutí splňovalo požadavky, které jsou dány funkcí celého zařízení. Konkrétně je třeba se zabývat vhodnou volbou rozměrů vinutí, průměru drátu a délkou drátu, které pak přímo ovlivňují veškeré elektrické veličiny jako je proud v cívkách, odpor drátu, napětí a ztrátový výkon.

Obrázek 4.29 zachycuje osová pole generovaná proudem procházejícím jednotlivými vinutími prvků elektronově optického návrhu. Osová pole vnějších a vnitřních vinutí deflektorů jsou v obrázku 500krát zvětšena, osová pole stigmátoru jsou zvětšena 5000krát. Velikost osového pole magnetické čočky odpovídá skutečnosti. Pole magnetické čočky je vykresleno při buzení čočky 1 823 Az, při kterém je elektronový svazek čočkou fokusován do pracovní vzdálenosti $WD = 20$ mm.

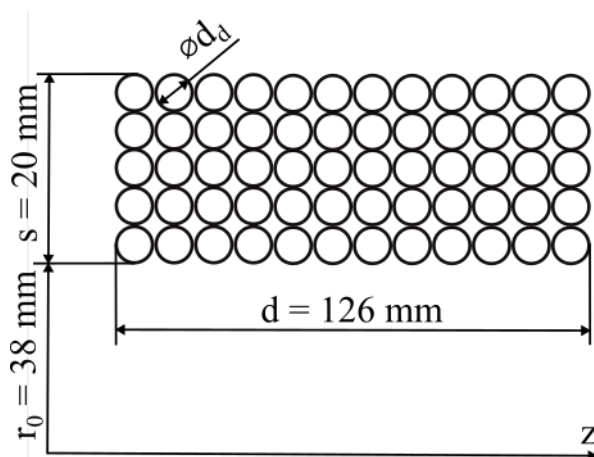
4.8. PARAMETRY CÍVEK ELEKTRONOVĚ OPTICKÝCH PRVKŮ



Obrázek 4.29: Osová pole cívek deflektorů, stigmátoru a magnetické čočky generovaná proudem procházejícím cívkami. Osová pole deflektorů a stigmátoru odpovídají buzení cívek 1 Az a jsou zvětšena. Osová pole magnetické čočky je vykresleno při buzení čočky 1 823 Az.

4.8.1. Vinutí magnetické čočky

Obrázek 4.30 zachycuje schematický řez (v rovině r - z) vinutím magnetické čočky s rozměrovými parametry vinutí. Vinutí čočky je navrženo tak, že jeho délka je $d = 126$ mm, šířka vinutí je $s = 20$ mm, vnitřní poloměr vinutí je $r_0 = 38$ mm a průměr drátu vinutí je



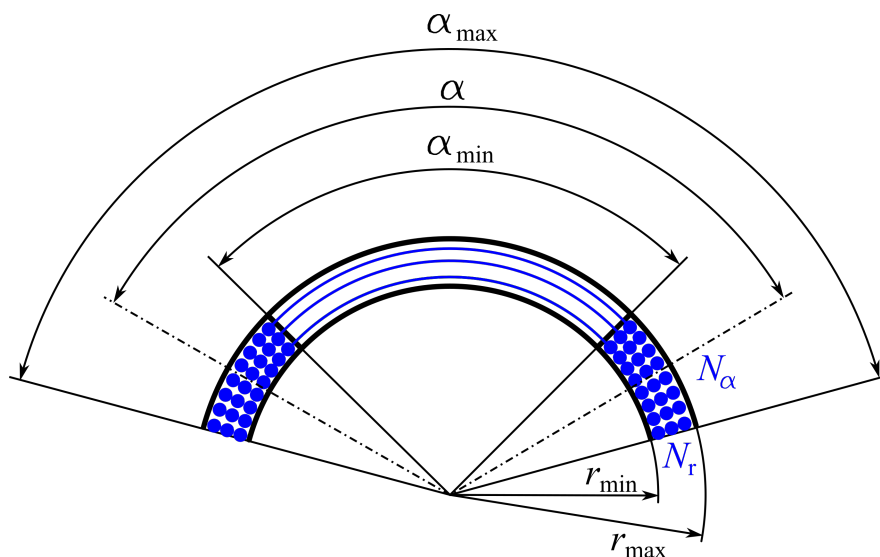
Obrázek 4.30: Schematický obrázek řezu (v rovině r - z) vinutím magnetické čočky se zakótovanými rozměrovými parametry vinutí.

$d_d = 1$ mm. Průměr drátu byl volen s ohledem na nejnižší ztrátový výkon. Z těchto parametrů se dá jednoduše odvodit maximální možný počet závitů vinutí, který je $N = 2520$ a také celková délka drátu vinutí $l = 760$ m. Cívka bude pravděpodobně vinuta na zakázku, takže uspořádání závitů bude těsnější a bude moci být navinuto více závitů.

Z grafu 4.12 v kapitole 4.4 plyne, že potřebné buzení cívky magnetické čočky bude nejvyšší při nejkratší pracovní vzdálenosti $WD = 20$ mm a bude nabývat hodnoty $I_b = 1823$ A. Při tomto buzení bude proud v drátu vinutí $I = 0,72$ A, odpor drátu $R = 16,9$ Ω , potřebné napětí na cívce $U = 12,2$ V a ztrátový výkon $P = 8,7$ W. Z teplotní analýzy vinutí plyne, že zvýšení teploty vinutí je zanedbatelné a nemusíme řešit jeho chlazení.

4.8.2. Vinutí cívek deflektorů

Pro zvýšení účinnosti deflektorů a stigmátoru je žádoucí, aby jejich vinutí obsahovala co nejvyšší počet závitů, avšak s ohledem na to, aby ztrátový výkon nebyl vlivem rostoucí délky drátu příliš velký. Proto vinutí deflektorů a stigmátoru nebude obsahovat pouze jednu vrstvu vinutí, ale budou obsahovat N_r vrstev v radiálním a N_α vrstev v azimutálním směru. Co přesně se pod pojmem vrstvy vinutí myslí zachycuje obrázek 4.31.



Obrázek 4.31: Parametry vinutí, řez v rovině kolmé na osu. r_{\min} minimální poloměr vinutí, r_{\max} maximální poloměr vinutí, N_r počet závitů v radiálním směru, N_α počet závitů v azimutálním směru, α střední úhel vinutí, α_{\min} minimální úhel vinutí, α_{\max} maximální úhel vinutí.

Důležité parametry vinutí deflektorů jsou shrnuty v tabulce 4.11. Průměr drátu vinutí $d_d = 0,3$ mm a proud vinutím $I = 250$ mA byly voleny tak, aby ztrátový výkon ve vinutí byl co nejmenší a nedocházelo k jeho zahřívání.

Teplotní analýza vinutí ukázala, že při proudu 250 mA a vychýlení o 2 mm v obou směrech vzroste teplota vinutí o 5 °C. Při dvojnásobném proudu, a tedy dvojnásobném vychýlení, vzroste teplota o 16 °C. To je stále přijatelné.

Celé vinutí cívky deflektoru není v úhlu 120°. Aby mohlo být především vnější vinutí co nejbližší optické osy, musí být vinutí co nejmenší v radiálním směru mezi poloměry r_{\min} a r_{\max} . Abychom mohli navinout dostatečný počet závitů, musíme vinutí vinout

4.8. PARAMETRY CÍVEK ELEKTRONOVĚ OPTICKÝCH PRVKŮ

Tabulka 4.11: Parametry vinutí deflektorů. r_{\min} minimální poloměr vinutí, r_{\max} maximální poloměr vinutí, NI počet Ampérvávitů při výchylce $x = 2$ mm a $y = 2$ mm, N celkový počet závitů, N_r počet závitů v radiálním směru, N_α počet závitů v azimutálním směru, α střední úhel vinutí, α_{\min} minimální úhel vinutí, α_{\max} maximální úhel vinutí. Průměr drátu vinutí je $d_d = 0,3$ mm a proud vinutím $I = 250$ mA.

deflektor	r_{\min} (mm)	r_{\max} (mm)	NI (Az)	N (z)	N_r (z)	N_α (z)	α (°)	α_{\min} (°)	α_{\max} (°)
dolní vnitřní	12	14,1	25,3	105	7	15	120	98,5	141,5
dolní vnější	15,5	18,2	28,4	117	9	13	120	105,6	134,4
horní vnitřní	12	14,1	23,7	105	7	15	120	98,5	141,5
horní vnější	15,5	18,2	26,8	108	9	12	120	106,7	133,3

i v azimutálním směru kolem optimálního úhlu $\alpha = 120^\circ$. Rozsah vinutí pak je α_{\min} až α_{\max} jak je ukázáno na obr. 4.31.

Elektrické vlastnosti cívek deflektorů jsou shrnuty v tabulce 4.12. Obě vnitřní i vnější cívky každého deflektoru budou zapojeny do série, takže celkové napětí nutné pro napájení bude $2U$.

Tabulka 4.12: Elektrické parametry vinutí deflektorů. NI počet Ampérvávitů při výchylce $x = 2$ mm a $y = 2$ mm, l_d délka drátu vinutí jedné cívky, R odpor drátu vinutí, U napětí na cívce, P ztrátový výkon. Průměr drátu vinutí je $d_d = 0,3$ mm a proud vinutím $I = 250$ mA.

deflektor	NI (Az)	l_d (m)	R (Ω)	U (V)	P (W)
dolní vnitřní	25,3	15,7	4,0	1,00	0,25
dolní vnější	28,4	18,5	4,7	1,17	0,29
horní vnitřní	23,7	8,4	2,1	0,53	0,13
horní vnější	26,8	9,5	2,4	0,61	0,15

4.8.3. Vinutí cívek stigmátoru

Důležité parametry vinutí stigmátorů jsou shrnuty v tabulce 4.13. Průměr drátu vinutí $d_d = 0,25$ mm byl zvolen menší než u deflektorů, protože u stigmátorů jsme více prostorově omezeni a potřebujeme navinout dostatečný počet závitů N . Proud vinutím $I = 250$ mA byl volen tak, aby ztrátový výkon ve vinutí byl co nejmenší a nedocházelo k jeho zahřívání.

Z teplotní analýzy vinutí stigmátoru vyplynulo, že stigmátor se příliš nezahřívá (při proudu 250 mA se vinutí ohřeje o 5°C). Pokud by byl vliv astigmatismu větší než jsme předpokládali, je možné stigmátor budít i dvojnásobným proudem. Potom by teplota vinutí vzrostla o 20°C .

Celé vinutí cívky stigmátoru není v úhlu 90° . Vinutí opět vineme i v azimutálním směru kolem středního úhlu, který je $\alpha = 72^\circ$ pro vnitřní vinutí a $\alpha = 76^\circ$. Úhlový rozsah vinutí je menší než u deflektoru, protože jednotlivá vinutí čtyř cívek stigmátoru se téměř dotýkají, takže nemohou přesáhnout maximální úhel 90° .

Elektrické vlastnosti cívek stigmátoru jsou shrnuty v tabulce 4.14. Všechny čtyři vnitřní i vnější cívky každého deflektoru budou zapojeny do série, takže celkové napětí nutné pro napájení bude $4U$.

Tabulka 4.13: Parametry vinutí stigmátoru. r_{\min} minimální poloměr vinutí, r_{\max} maximální poloměr vinutí, NI počet Ampérvávitů, N celkový počet závitů, N_r počet závitů v radiálním směru, N_α počet závitů v azimutálním směru, α střední úhel vinutí, α_{\min} minimální úhel vinutí, α_{\max} maximální úhel vinutí. Průměr drátu vinutí je $d_d = 0,25$ mm a proud vinutím $I = 250$ mA.

vinutí	r_{\min} (mm)	r_{\max} (mm)	NI (Az)	N (z)	N_r (z)	N_α (z)	α (°)	α_{\min} (°)	α_{\max} (°)
vnitřní	12	14,5	27,3	110	10	11	72	58,9	85,1
vnější	16	19,5	38,8	168	14	12	76	65,3	86,7

Tabulka 4.14: Elektrické parametry vinutí stigmátoru. NI počet Ampérvávitů, l_d délka drátu vinutí jedné cívky, R odpor drátu vinutí, U napětí na cívce, P ztrátový výkon. Průměr drátu vinutí je $d_d = 0,25$ mm a proud vinutím $I = 250$ mA.

vinutí	NI (Az)	l_d (m)	R (Ω)	U (V)	P (W)
vnitřní	27,3	6,6	2,4	0,61	0,15
vnější	38,8	11,4	4,2	1,04	0,26

4.9. Teplota dílů při maximálním ohřevu

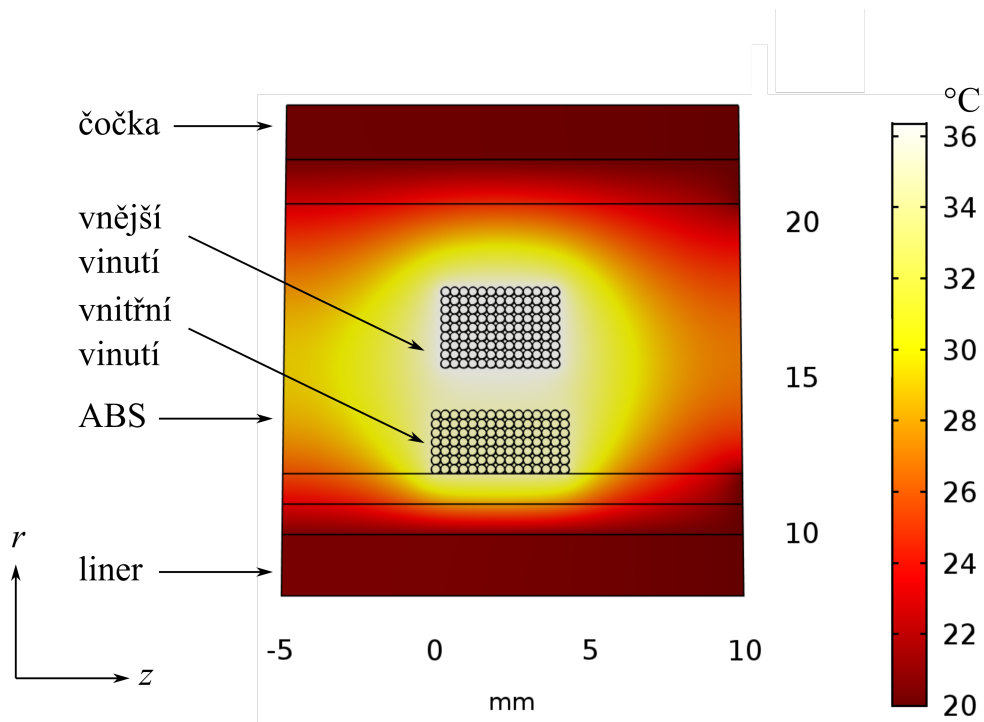
Výpočty vinutí provedené v předešlých částech jsou důležité pro teplotní analýzu a byly také na jejím základě upravovány. Nejdůležitější vypočtenou hodnotou z hlediska analýzy vinutí je ztrátový výkon, díky kterému je možno zjistit, jakým způsobem se bude elektronově optický systém zahřívat a zda zvolené buzení cívek je přijatelné, či zda bude muset být sníženo, popřípadě zda je prostor buzení zvýšit a zvýšit tak účinnost například vychylovacího systému.

Obrázek 4.32 zachycuje teplotu v okolí vinutí dolního deflektoru spočtenou v programu COMSOL Multiphysics při dvojnásobném proudu 500 mA. Plastový držák vinutí z ABS vyplňuje prostor mezi linerem a čočkou a odvádí teplo od cívek. Teplota cívek vzroste o 16°C.

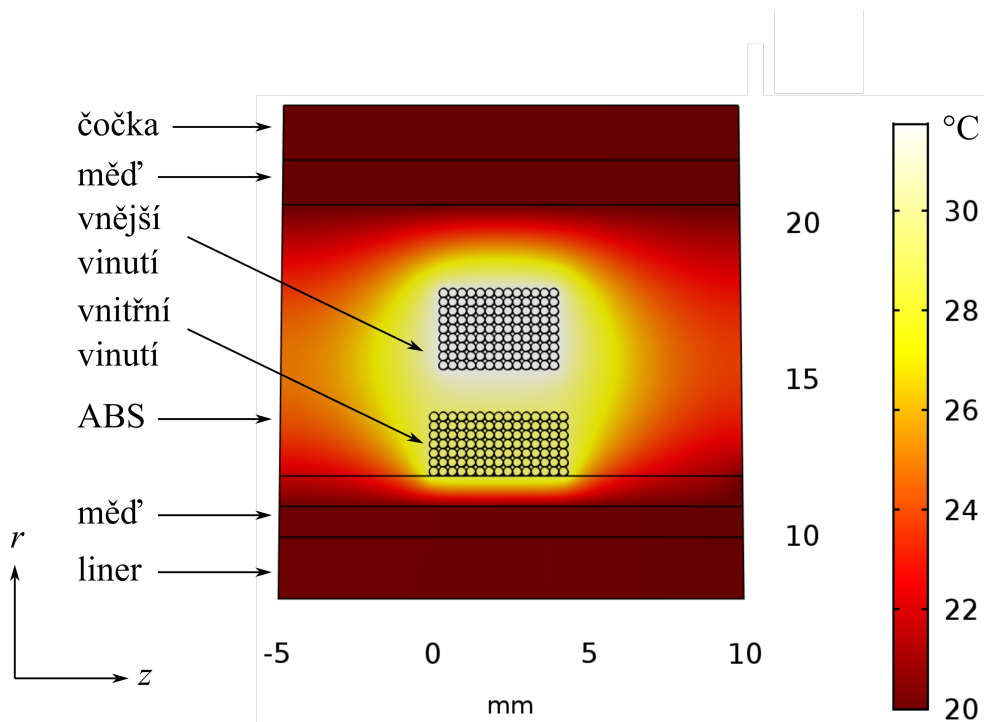
Obrázek 4.33 zachycuje teplotu v okolí vinutí dolního deflektoru při dvojnásobném proudu 500 mA. Na lineru je ovšem nasunuta měděná trubka o tloušťce stěny 1 mm a mezi čočku a deflektory je vsunuta měděná trubka o tloušťce stěny 1,5 mm. Teplota cívek vzroste o 11°C. Vsunutí měděných trubek by bylo možné použít pro zvýšení odvodu tepla, pokud by bylo nutné více vychylovat svazek, případně pokud by docházelo k ohřívání lineru samotným svazkem elektronů. Z toho důvodu je mezi linerem a vnitřním vinutím ponechána radiální vzdálenost 2 mm, aby bylo možné tuto úpravu provést.

Obrázky 4.34a a 4.34b zachycují jakým způsobem budou cívky se ztrátovými výkony, vypočtenými v předešlých částech, ohřívát své okolí. Pro výpočet v programu COMSOL Multiphysics bylo použito okrajové podmínky, že v místě dotyku magnetické čočky se svařovací komorou a s komorou zdroje se předpokládá teplota 20°C. Vinutí byla pro zjednodušení nahrazena tenkými pásky, na kterých se uvolňuje ztrátový výkon. Z obrázků je patrné, že nejvíce se zahřívají cívky stigmátoru a to na teploty okolo 28°C. Teplota tedy výrazně nepřekročí hodnotu teploty okolí a z toho lze konstatovat, že nadimenzování vinutí z předešlých kapitol je dostatečné. Ve skutečnosti bude možno stigmátor i deflektory v případě potřeby budít vyššími proudy, než se předpokládalo. To tedy povede k tomu, že stigmátor bude v případě potřeby schopen korigovat větší míru astigmatismu systému

4.9. TEPLOTA DÍLŮ PŘI MAXIMÁLNÍM OHŘEVU

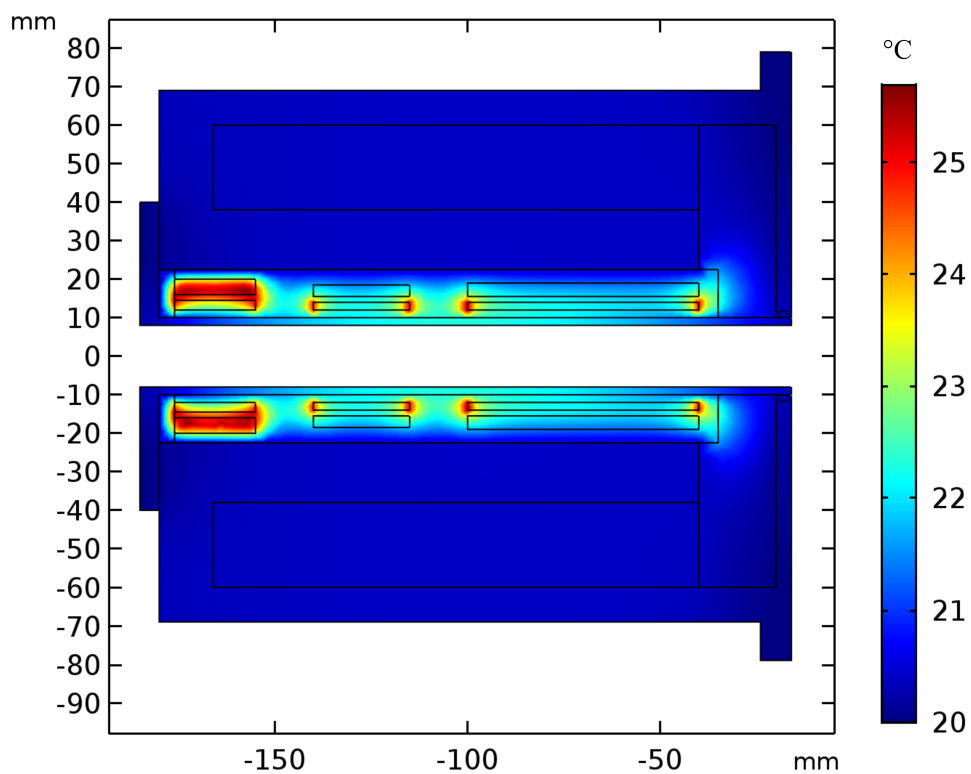


Obrázek 4.32: Teplota vinutí dolních deflektorů při dvojnásobném proudu vinutím 500 mA. Na pravé straně je předepsána teplota 20°C na hranici lineru a čočky. Závity jsou obklopeny plastem ABS tvořícím kostru vinutí. Mezi závity je vzduch.

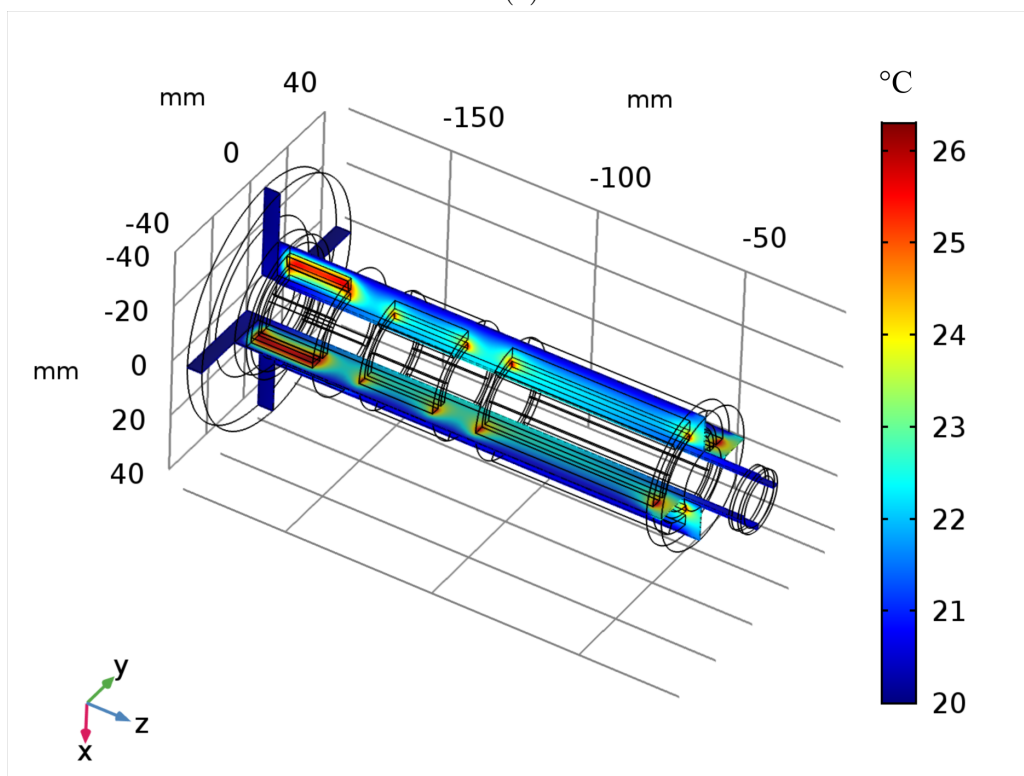


Obrázek 4.33: Teplota vinutí dolních deflektorů při dvojnásobném proudu vinutím 500 mA. Na pravé straně je předepsána teplota 20°C na hranici lineru, čočky a měděných trubek. Závity jsou obklopeny plastem ABS tvořícím kostru vinutí. Mezi závity je vzduch.

4. ELEKTRONOVĚ OPTICKÝ SYSTÉM



(a)



(b)

Obrázek 4.34: Vliv ohřevu cívek ztrátovým výkonem optického systému na teplotu při ztrátových výkonech určených v předešlých částech. a) Řez v rovině r - z . b) Řez ve dvou kolmých rovinách pro zviditelnění teplot vnějších a vnitřních vinutí.

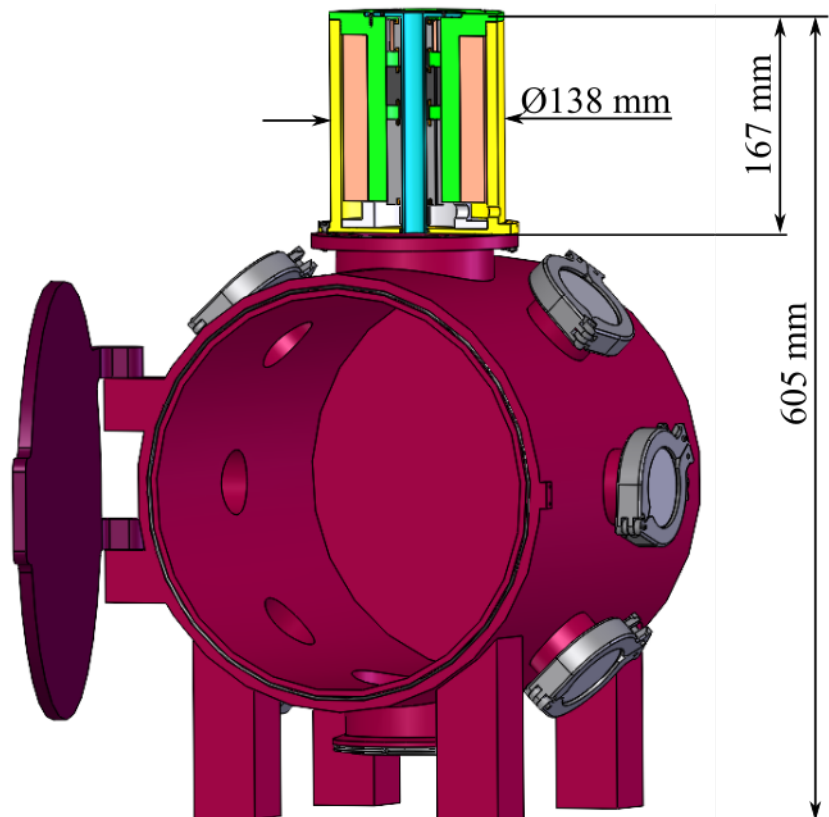
4.9. TEPLOTA DÍLŮ PŘI MAXIMÁLNÍM OHŘEVU

a deflektory zase budou schopny více vychylovat. Je také patrné, že samotné vinutí čočky prakticky nepřispívá k ohřevu. Při simulaci bylo přihlíženo k tomu, že vinutí deflektorů a stigmátoru je navinuto na plastovém držáku tištěném 3D tiskem z ABS, který vyplňuje celý prostor mezi linerem a čočkou.

5. Konstrukční návrh

V předešlých částech byla věnována pozornost návrhu a propočtu elektronově optického systému, přesněji pak návrhu magnetické čočky, vychylovacího systému a stigmátoru. V následujících částech se tato práce bude věnovat převedení těchto teoretických poznatků a výpočtů do reálného konstrukčního návrhu. Kapitola 5.1 je zaměřená na konstrukční návrh magnetického obvodu čočky. Kapitola 5.2 se věnuje popisu a návrhu tzv. lineru, který zajišťuje vakuum v blízkosti optické osy uvnitř magnetické čočky. V kapitole 5.3 je popsán konstrukční návrh držáku vinutí, deflektorů a stigmátoru a také je zde popsán postup, jakým budou cívky deflektorů a stigmátoru vinuty. Zbývající kapitoly 5.4, 5.5 a 5.6 se zabývají konstrukčním návrhem svařovací komory, popisem vakuového systému připojeného ke svařovací komoře a těsněním celého systému, které zaručí udržení požadovaného vakua v důležitých místech celého návrhu. Na obrázku 5.1 je pro představu zachycen celý konstrukční návrh magnetické čočky, vychylovacího systému, korekčního systému a svařovací komory. Jednotlivé díly jsou pro přehlednost vykresleny různými barvami a jejich detaily jsou pak zachyceny na obrázcích v dalších částech této práce.

V celém návrhu je použita velká škála materiálů a to od pryže přes plast až po měď či magnetické a nemagnetické oceli. Obecně je při volbě materiálů jednotlivých dílů důležité si uvědomit, zda tyto díly jsou umístěny v blízkosti magnetických polí či nikoliv. Pokud je díl umístěn v blízkosti magnetického pole generovaného cívkou a nejedná se zrovna o magnetický obvod čočky, tak je žádoucí, aby byl vyroben z nemagnetického materiálu,



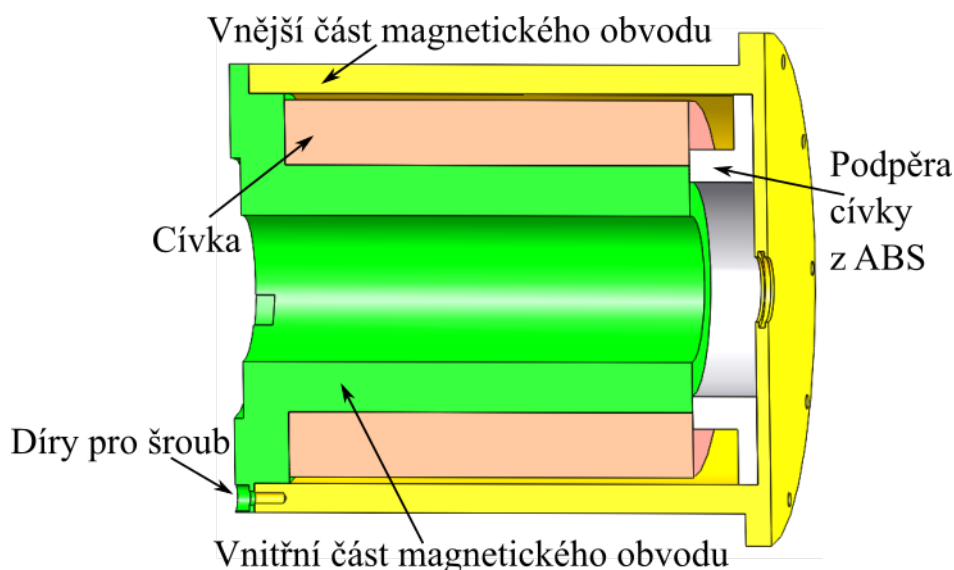
Obrázek 5.1: Konstrukční návrh se zabarvenými jednotlivými díly celé sestavy. Magnetická čočka, vychylovací systém a stigmátor jsou zachyceny v řezu, aby byly viditelné i díly uvnitř čočky.

5.1. KONSTRUKCE MAGNETICKÉ ČOČKY

a to proto, aby neovlivňoval magnetické pole. To se týká především lineru a držáků vinutí deflektorů a stigmátoru, které se nachází uvnitř magnetické čočky. V tomto ohledu je také nutné uvědomit si, že jakékoliv šrouby, které zajišťují spojení dílů a nachází se v oblasti, kde by potenciálně mohly ovlivňovat magnetické pole, musí být vyrobeny z nemagnetického materiálu. Se šrouby je spojen další důležitý fakt, který je třeba při konstrukčním návrhu brát v potaz. Tímto faktem je, že pokud by šrouby vytvářely sudé symetrie v oblastech, které mají vliv na magnetické pole, tak tato sudá symetrie by mohla generovat nežádoucí multipólové pole. V praxi při použití systému pro elektronové svařování nedosahujeme ani zdaleka takových přesností, jako například u elektronových mikroskopů a vliv sudé symetrie by dost pravděpodobně neměl velký vliv na funkci, ale i přesto je raději v celém návrhu dodržen lichý počet šroubů a děr po obvodu.

5.1. Konstrukce magnetické čočky

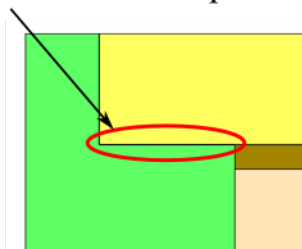
Jak již bylo zmíněno v předešlých částech, magnetická čočka je složena z magnetického obvodu a cívky. Řez díly magnetické čočky v rovině r - z je zachycen na obrázku 5.2. Z něj je patrné, že magnetický obvod čočky je složen ze dvou dílů a to z vnější a vnitřní části. Geometrie magnetického obvodu čočky by v případě nerozdělení na dvě části byla nevyrobitelná. Dalším důvodem rozdělení magnetického obvodu na dvě části je možnost jednoduchého vsazení cívky. Cívka z měděného drátu je při výrobě vinuta na trn. Měděný drát je pokryt izolací, která se při vinutí cívky zapeče. Cívka je pak z trnu sundána a sama o sobě drží tvar. Následně je cívka nasazena na vnější válcovou plochu vnitřní části magnetického obvodu čočky. Aby cívka byla pevně uchycena a nemohla sjíždět, tak je mezi vnitřní a vnější část magnetického obvodu vložena podpěra z ABS vytisknutá na 3D tiskárně. Po nasazení cívky je magnetický obvod sešroubován pěti šrouby, pro které je ve vnitřní části obvodu předvrtané válcové zahloubení a díra s vůlí a ve vnější části obvodu závitová díra tak jak je také zachyceno na obrázku 5.2. Důvod, proč je možno do magnetického obvodu vyvrtat díry a neohlížet se při tom na to, jakým způsobem tato změna geometrie změní chování magnetického obvodu, je ten, že díry jsou vrtány



Obrázek 5.2: Řez konstrukčním návrhem magnetické čočky s popisem jednotlivých dílů.

v oblastech, kde se magnetický obvod téměř nesytlí (místa, kde je indukce v materiálu nízká). To vyplývá z předešlých částí této práce, přesněji pak z obrázku 4.14.

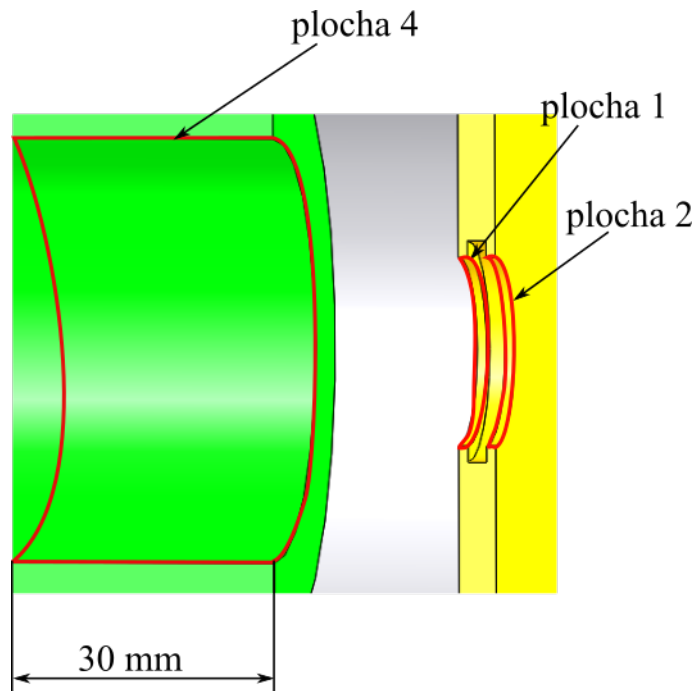
Spojovací válcová plocha



Obrázek 5.3: Znázornění spojovacích válcových ploch obou částí magnetického obvodu čočky, které je důležité přesně tolerovat.

Spojovací válcové plochy obou částí magnetického obvodu zachycené na obrázku 5.3 je třeba přesně tolerovat tak, aby byla dobře zajištěna vzájemná poloha obou dílů a magnetická čočka tak měla sjednocenou optickou osu. Proto se volí přesné uložení ploch h6 na H7. Obě části magnetického obvodu jsou navrženy z behanitu, neboli téměř čistého železa a jsou žíhané. Žíhání magnetického obvodu se předepisuje jako demagnetizační. Behanit je známý tím, že je poměrně obtížně obrobitelný a výroba magnetického obvodu tedy nebude jednoduchou záležitostí. Vnitřní i vnější část magnetického obvodu budou povrchově upraveny niklováním a to zejména z důvodu korozivzdornosti. Povrchová vrstva niklu má obvykle tloušťku okolo 10 μm .

Z kapitoly 4.7 vyplynuly potřebné tolerance na obvodové házení válcových ploch magnetického obvodu čočky, které jsou zachyceny na obrázku 5.4. Válcová plocha 4 vnitřní



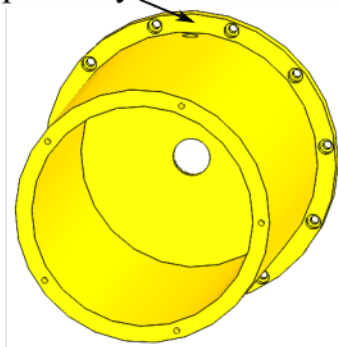
Obrázek 5.4: Plochy magnetického obvodu čočky, které je třeba tolerovat na obvodové házení tak, aby jejich elipticita negenerovala příliš veliký astigmatismus. Číslování ploch bylo zachováno z předešlých obrázků popisující tolerované plochy v elektronově optickém návrhu.

5.2. LINER

části magnetického obvodu čočky do vzdálenosti 30 mm od gapu je tolerována na obvodové házení velikosti 0,05 mm. Plocha 1 a 2 vnější části magnetického obvodu čočky je tolerována na obvodové házení velikosti také 0,05 mm. Drážka mezi plochami 1 a 2 je zde vyrobena pro uložení těsnění lineru a její vnitřní plochy není třeba speciálně tolerovat, protože z toleranční analýzy vyplynulo, že její elipticita má minimální vliv na velikost astigmatismu čočky.

Vnější část magnetického obvodu je taktéž použita pro upevnění magnetické čočky ke svařovací komoře. Za tím účelem má vnější část obvodu osazení viditelné na obrázku 5.5, do kterého je vyvrtáno 11 válcových zahloubení s dírami s vřítí pro šrouby. Toto osazení dosedne na přírubu na svařovací komoře a pomocí šroubů a matic bude celá magnetická čočka uchycena na komoru.

Osazení pro uchycení ke svařovací komoře



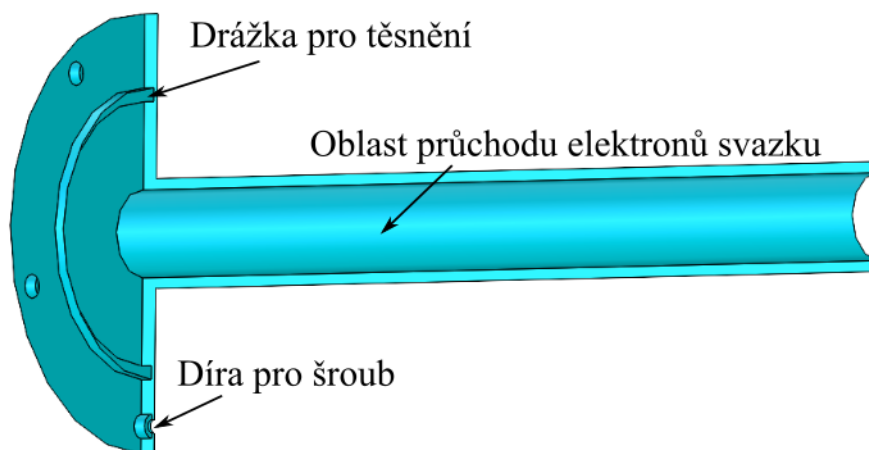
Obrázek 5.5: Osazení vnější části magnetického obvodu sloužící pro uchycení ke svařovací komoře a to za pomoci 11 šroubů a matic.

5.2. Liner

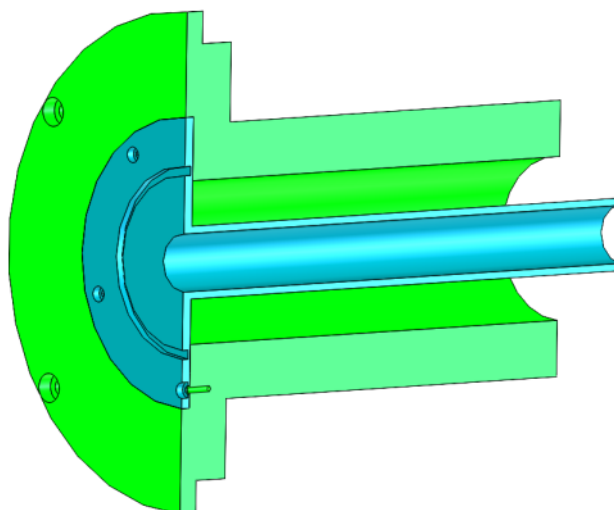
Z důvodu minimalizace šancí srážek elektronů svazku s molekulami prostředí je nutné mít uvnitř magnetické čočky v blízkosti optické osy, kudy se elektrony svazku pohybují, vakuum. Prostor okolo optické osy, ve kterém bude docíleno potřebného vakuu, je třeba nějak ohraničit. K tomu slouží tzv. liner. Liner je trubička (viz obrázek 5.6) vyrobená z nemagnetické oceli, která je na obou svých koncích těsněna, tak aby uvnitř této trubičky bylo možno udržet požadované vakuum. Elektrony se při průchodu magnetickou čočkou nedostávají do větší vzdálenosti od optické osy jak 8 mm, a proto vnitřní průměr lineru není třeba vyrábět větší jak 16 mm.

Liner je uchycen pomocí šroubů k vnitřní části magnetického obvodu čočky, ve které je pro něj vyfrézovaná drážka, tak jak je zachyceno na obrázku 5.7. V lineru jsou pro šrouby vyvrtána válcová zahloubení s průchozími dírami s vřítí a ve vnitřní části magnetického obvodu jsou vyrobeny závitové díry. Dále je v lineru vyfrézována drážka pro umístění těsnění, které je zde nachystáno pro upevnění magnetické čočky ke zdroji elektronů.

Co se výroby týká, tak je třeba brát ohled především na vnitřní válcovou plochu trubičky, ve které bude drženo vakuum. Tento povrch musí být důkladně leštěn, a to proto, aby na nerovnostech povrchu nedocházelo k zachycení zbytkové atmosféry a nebylo tak vakuum znehodnoceno. Dále je také třeba předepsat přísnější drsnost povrchu vnější válcové plochy lineru, která bude v kontaktu s těsnicím kroužkem.



Obrázek 5.6: Řez linerem, zajišťujícím vakuum uvnitř magnetické čočky, kudy se šíří elektronový svazek.



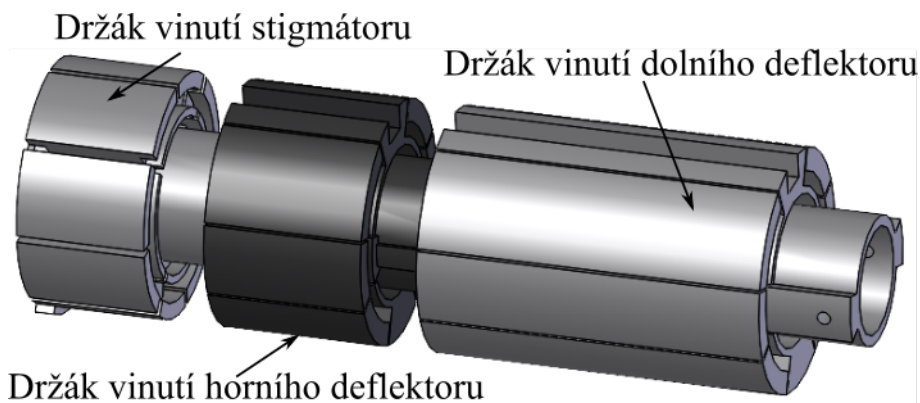
Obrázek 5.7: Řez linerem a vnitřní částí magnetického obvodu čočky, ve které je vyfrézována drážka pro dosednutí plochy lineru a jeho přišroubování.

5.3. Držák cívek deflektorů a stigmátoru

Vychylovací a korekční systém je tvořen sedlovými cívkami s odlišnými úhly vinutí. Vinutí deflektorů a stigmátoru je poměrně komplikované a to především z toho důvodu, že jak deflektory, tak i stigmátor obsahují vinutí vnější a vnitřní, která jsou vzájemně pootočena a musí se tak řešit konstrukční problém jejich překrytí. Zároveň je nutné brát v potaz i princip výroby. Tyto cívky budou vinuty ručně a tak je třeba podpěrné konstrukce, která usnadní navíjení cívek a díky které se docílí správných parametrů vinutí. Všechny tyto faktory vedou k tomu, že celý držák je složen ze 3 dílů, jak zachycuje obrázek 5.8.

Všechny 3 jednotlivé díly budou vyrobeny z tvrdého plastu ABS pomocí tisku na 3D tiskárně, která umožní výrobu komplikované geometrie dílů. Všechny díly budou mít 100% výplň pro zajištění co největší tepelné vodivosti. Celý držák je rozdělen na 3 díly především proto, aby se snadněji mohly samostatně navinout cívky stigmátoru, horního deflektoru a dolního deflektoru a až po navinutí, bude držák sestaven do jednoho celku.

5.3. DRŽÁK CÍVEK DEFLEKTORŮ A STIGMÁTORU



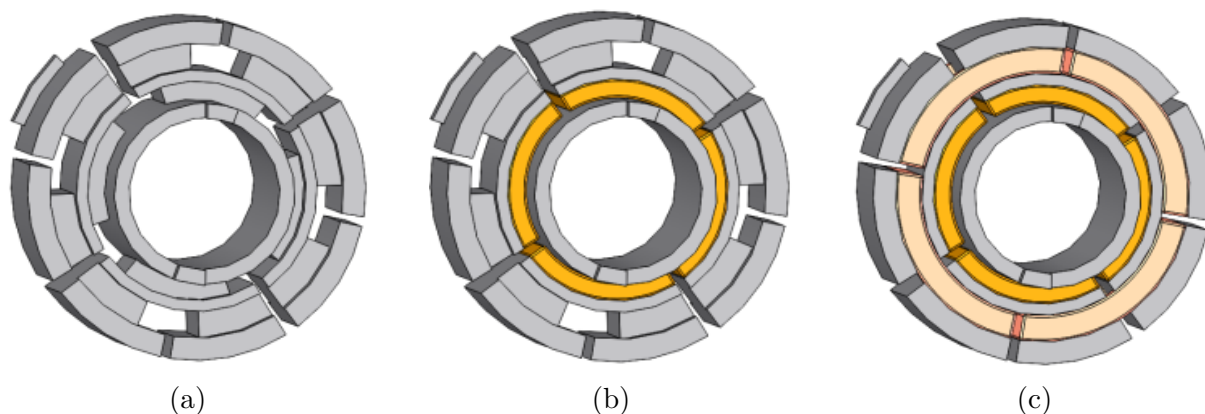
Obrázek 5.8: Držák vinutí stigmátoru a deflektorů s popisem jednotlivých dílů.

Celý držák s vinutím bude nasazen na liner. Vnější průměr lineru je 20 mm. Kvůli tomu, že díly držáku budou vyráběny tiskem na 3D tiskárně, tak nelze předepsat vhodné uložení s vůlí pro výrobu a musí se každý díl navrhovat rovnou s větším vnitřním průměrem, který je zvolen na hodnotu 20,05 mm, což by mělo být dostačující pro snadné nasunutí dílů.

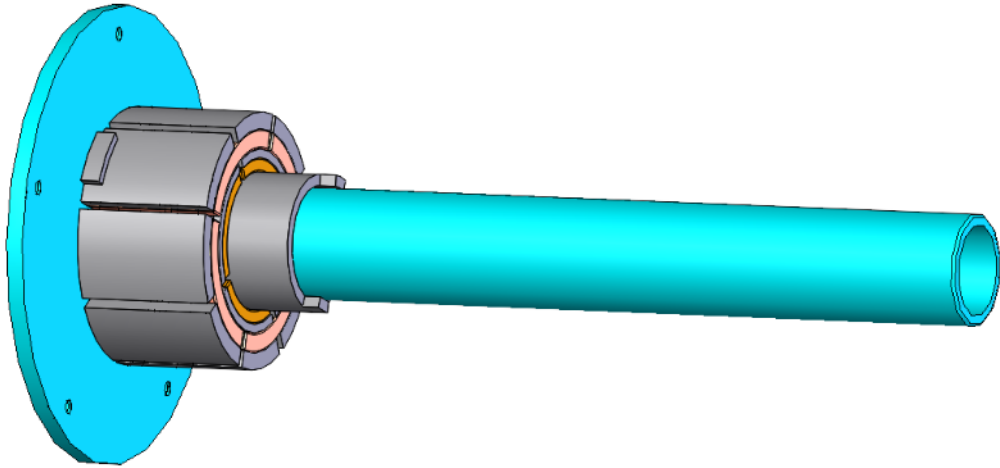
5.3.1. Postup navíjení cívek a sestavení dílů držáku do jednoho celku

V této části je popsán postup vinutí cívek stigmátoru a deflektorů a jejich sestavení do jednoho celku. Nejprve se vezme držák vinutí stigmátoru (obr. 5.9a) a navinou se všechna 4 vnitřní vinutí stigmátoru, tak jak je zachyceno na obrázku 5.9b. K usnadnění navíjení se ještě vytisknou přípravky, pomocí kterých, se bude při navíjení drát do drážek urovnávat, aby cívky byly navinuty co nejhustěji. Vzduchové mezery kolem vnitřních cívek budou vyplněny tepelně vodivým tmelem pro zajištění co nejlepšího přenosu tepla z cívek. Poté se navinou 4 vnější vinutí, která jsou zachycena na obrázku 5.9c. Mezery kolem vinutí se opět vyplní tmelem a tento postup se bude opakovat i u vinutí deflektorů. Takto připravený stigmátor se nasune na liner tak, jak zachycuje obrázek 5.10.

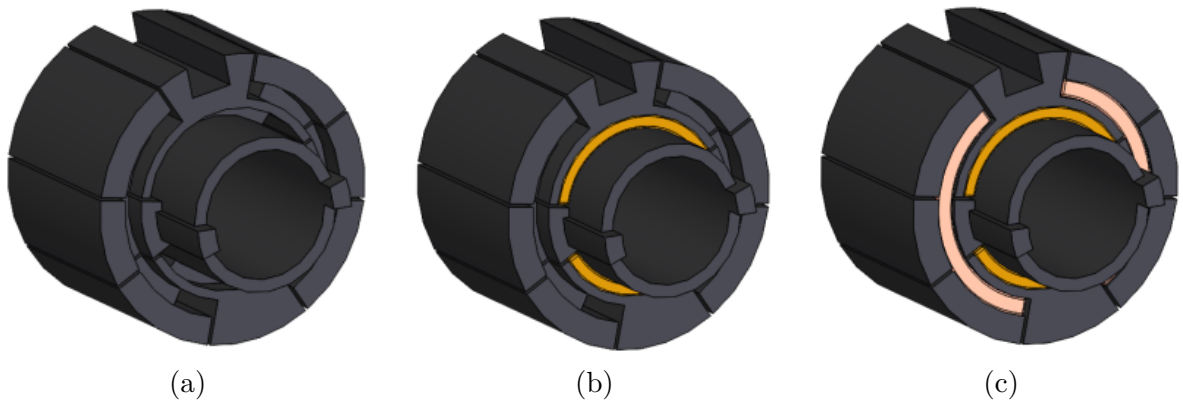
Poté se vezme držák horního deflektoru (obr. 5.11a) a navinou se na něj 2 vnitřní cívky tak, jak zachycuje obrázek 5.11b. Po navínutí vnitřních cívek se navinou 2 vnější



Obrázek 5.9: (a) Držák stigmátoru bez vinutí, (b) držák stigmátoru s navinutým vnitřním vinutím a (c) držák stigmátoru s navinutým vnitřním i vnějším vinutím.



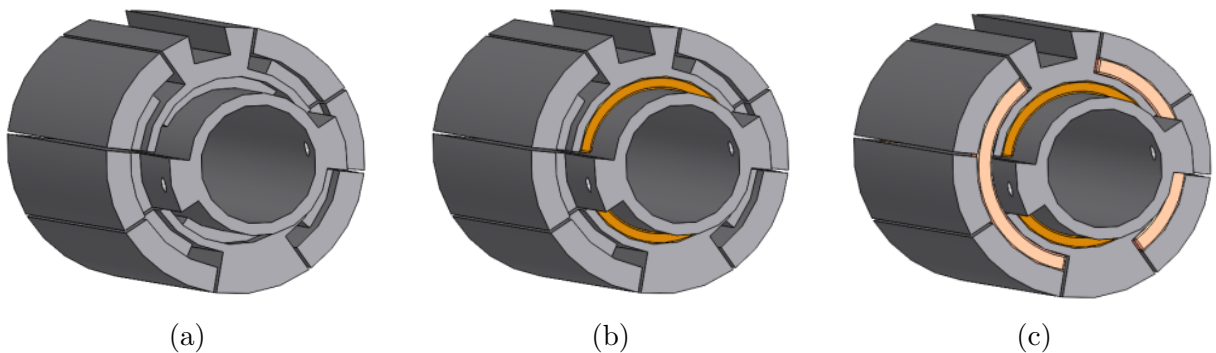
Obrázek 5.10: Držák stigmátoru s navinutými cívkami nasunutý na liner.



Obrázek 5.11: (a) Držák horního deflektoru bez vinutí, (b) držák horního deflektoru s navinutým vnitřním vinutím a (d) držák horního deflektoru s navinutým vnitřním a vnějším vinutím.

cívky, tak jak zachycuje obrázek 5.11c. Držák horního deflektoru se pak nasune na liner tak, aby výstupky držáku stigmátoru zapadly do drážek v držáku horního deflektoru.

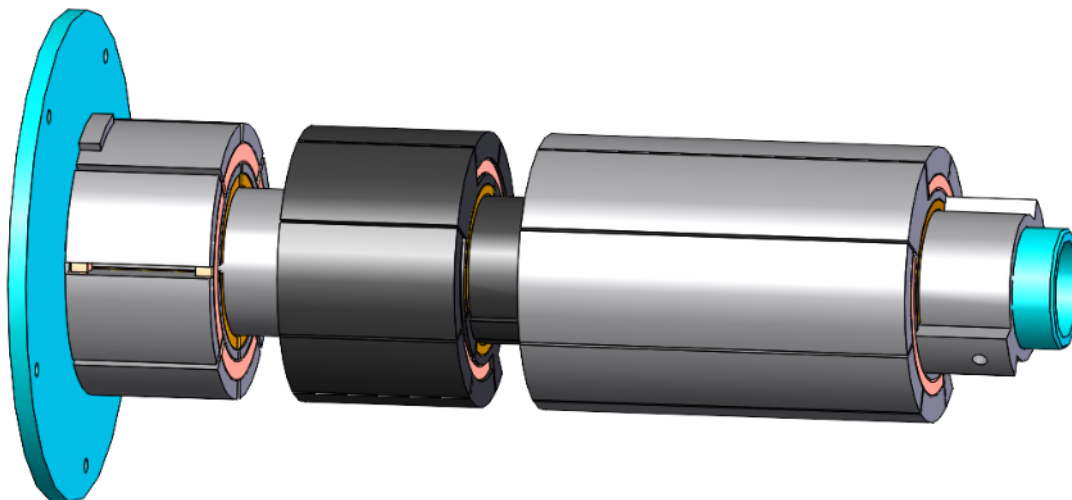
Na závěr se vezme držák dolního deflektoru (obr. 5.12a) a navinou se na něj dvě vnitřní cívky tak, jak zachycuje obrázek 5.12b. V dalším kroku jsou navinuty dvě vnější cívky



Obrázek 5.12: (a) Držák dolního deflektoru bez vinutí, (b) držák dolního deflektoru s navinutým vnitřním vinutím a (d) držák dolního deflektoru s navinutým vnitřním a vnějším vinutím.

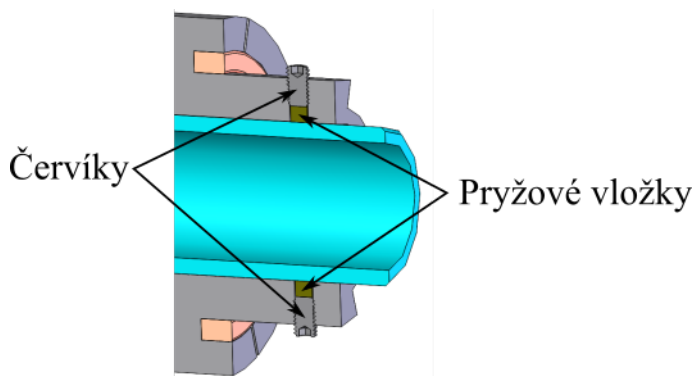
5.3. DRŽÁK CÍVEK DEFLEKTORŮ A STIGMÁTORU

dolního deflektoru, tak jak je zachyceno na obrázku 5.12c. Držák dolního deflektoru se pak nasune na liner, tak aby výstupky držáku horního deflektoru zapadly do drážek v držáku dolního deflektoru (obr. 5.13).



Obrázek 5.13: Kompletní držák vinutí nasazený na liner.

Za účelem zafixování celého držáku jsou v koncovém dílu (tedy v držáku vinutí dolního deflektoru) vyvrtány dvě závitové díry pro dva červíky z nemagnetického materiálu (obr. 5.14). Aby však nebyl kontakt kov na kov červíků s linerem, tak se do drážek před zašroubováním červíků vloží pryžová válcová vložka o průměru menším než je minimální průměr závitu a přes ní jsou červíky dotaženy na těsně, tak aby držák byl stabilně uchycen. Prostor mezi držáky jednotlivých cívek bude následně vyplněn teplovodivým tmelem.

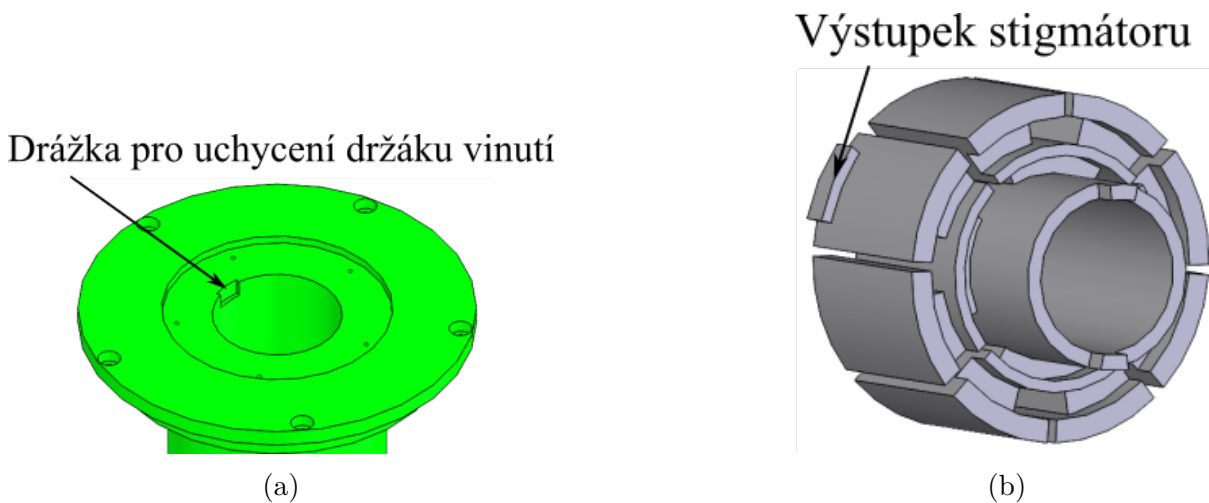


Obrázek 5.14: Řez držákem dolního deflektoru se zachycenými závitovými dírami pro červíky sloužící k uchycení celého držáku k lineru.

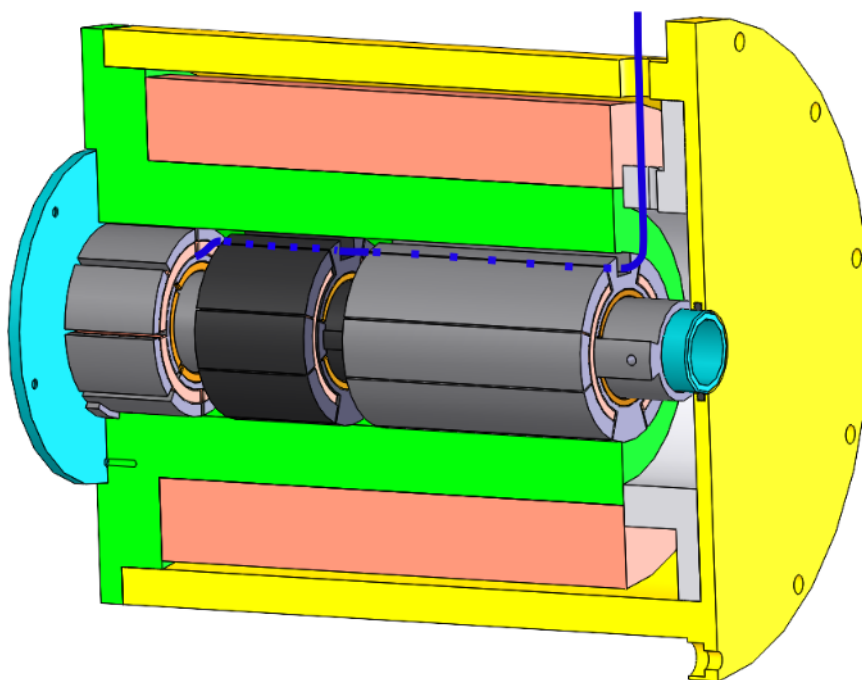
Liner s upevněným držákem pak bude zasunut do vnitřní části magnetického obvodu čočky, ve které je vyfrézovaná drážka (obr. 5.15a), do které zapadne výstupek stigmátoru (obr. 5.15b). Tato drážka a výstupek jsou zde proto, aby byla jasně definovaná poloha natočení celého držáku a lineru vůči magnetické čočce a nedocházelo k tomu, že při případném rozebrání a opakovaném složení sestavy, bude pozice volena libovolně.

Cívky je třeba připojit na napětí a tedy je třeba někudy vést přívodní dráty. Na obrázku 5.16 je dráha vedení přívodů, znázorněna modrou čarou. Pro vývod drátů je ve

vnější části magnetického obvodu vyvrtána díra o průměru 8 mm. Stejně tak je připravena drážka v podpěře cívky čočky a v držácích dolního a horního deflektoru jsou vyhotoveny žlaby.



Obrázek 5.15: (a) Drážka pro výstupek stigmátoru vyfrézovaná ve vnitřní části magnetického obvodu čočky pro zamezení natáčení držáku vinutí a (b) výstupek stigmátoru, který zapadne do vyfrézované drážky ve vnitřní části magnetického obvodu.



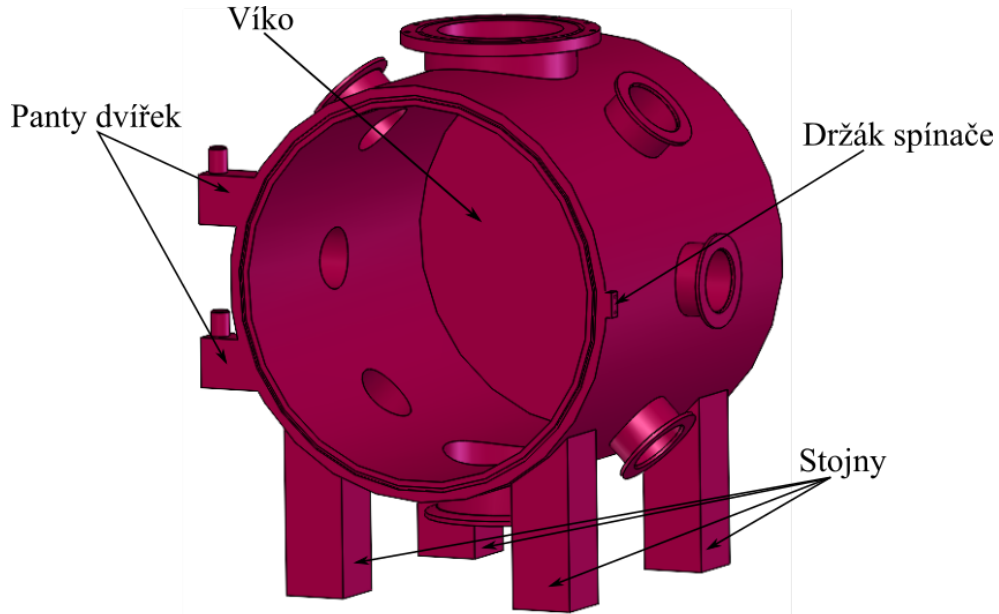
Obrázek 5.16: Obrázek magnetické čočky s kompletním držákem vychylovacího a korekčního systému, kde modrá čára znázorňuje vedení přívodů pro připojení cívek ke zdrojům.

5.4. Svařovací komora

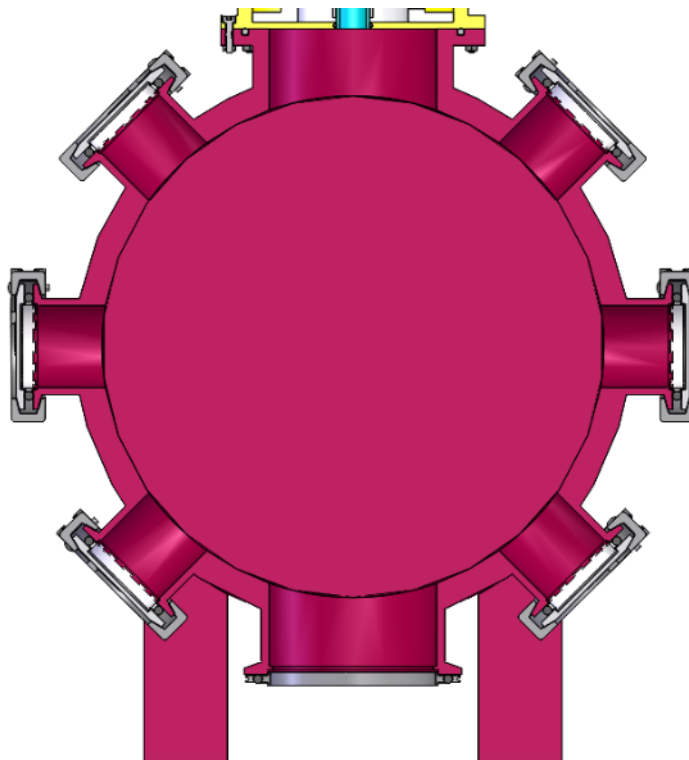
Magnetická čočka je připojena na svařovací komoru a přes ni je čerpána. Svařovací komora je zachycena na obrázku 5.17. Pro připojení magnetické čočky je na horní části komory

5.4. SVAŘOVACÍ KOMORA

přivařena příruba a na spodní části komory je zase přivařena příruba sloužící k upevnění vakuové pumpy. Svařovací komora je zároveň oblast, ve které bude docházet ke svařování. Ke svařovací komoře bude nutno připojit velké množství dalších doplňků důležitých například pro kontrolu tlaku v komoře, detekci sekundárních elektronů (pro schopnost tvořit obraz svařence), nebo také součástí zajišťujících uchycení posuvného stolku. Návrh



Obrázek 5.17: Svařovací komora elektronové svářečky bez dvířek a víka.



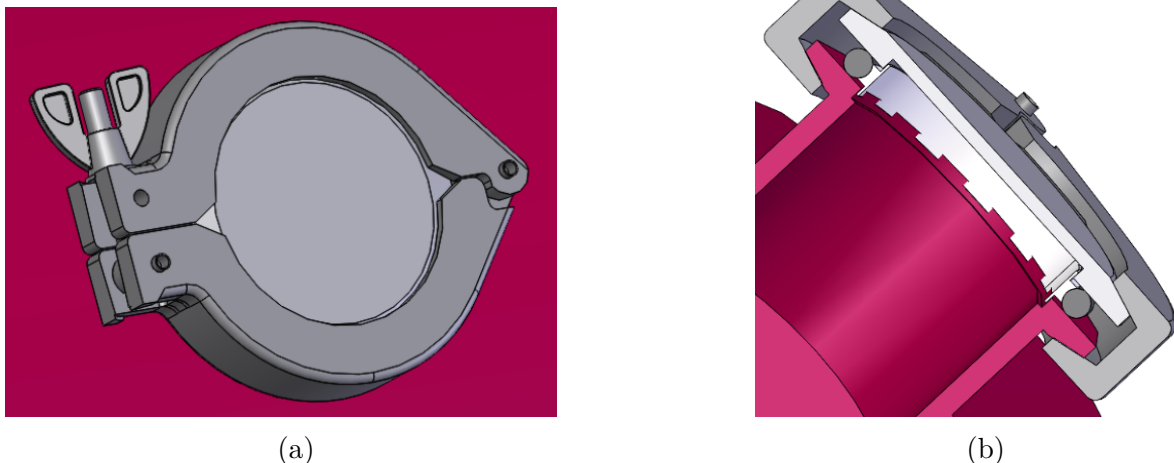
Obrázek 5.18: Řez středem svařovací komory, ve kterém lze vidět všech 6 přírub, které jsou dočasně zaslepeny.

a realizace konstrukce všech těchto doplňků není cílem této práce, ale v konstrukčním návrhu svařovací komory je s nimi do budoucna počítáno a komora je navržena tak, aby byla co možná nejlépe připravena pro jejich realizaci.

Ke komoře je z jedné strany navařeno víko. Na druhé straně komory jsou po obvodu navařeny dva panty sloužící pro uchycení dvířek komory. Na straně dvířek a na protější straně komory vůči pantům je zase přivařený kvádr, do kterého jsou vyhotoveny dvě závitové díry, které slouží k upevnění spínače D2HW-C203MR OMRON OCB od firmy Transfer Multisort Elektronik. Tento spínač bude propojen s vakuovým systémem a v případě zapnutí systému a uzavření dvířek dojde k sepnutí a vyslání pokynu pro započítí čerpání na požadované vakuuum.

Celá elektronová svářečka bude muset být nějak upevněna k pracovnímu stolu. Detailně se toto upevnění bude řešit až bude lépe známo prostředí a komponenty, ke kterým bude zařízení připojeno. Prozatím jsou v konstrukčním návrhu ilustračně vyhotoveny 4 stojny, které by mohly sloužit například k přišroubování k nosnému stolku. Tyto stojny budou na svařovací komoru navařeny stejně jako víko, panty dvířek, držák spínače a veškeré příruby.

Za účelem možnosti připojení libovolných komponent je na komoře předpřipraveno 6 přírub tak, jak je zachyceno na obrázku 5.18, které jsou v tomto návrhu prozatím zaslepeny pomocí rozebíratelného mechanismu od firmy Lewvac. Detail tohoto mechanismu je zachycen na obrázku 5.19.



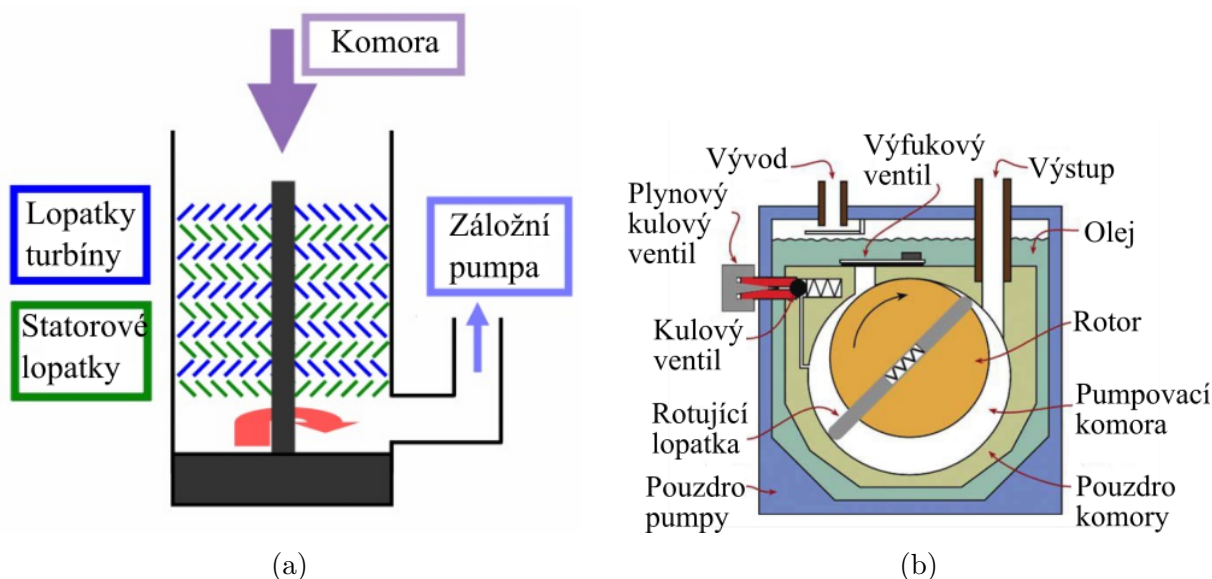
Obrázek 5.19: (a) Schéma mechanismu zaslepení přírub od firmy Lewvac a (b) řez mechanismem.

5.5. Vakuový systém

Vakuový systém je tvořen turbomolekulární pumpou (obr. 5.20a), která je připojena pomocí příruby ke svařovací komoře v dolní části. Turbomolekulární vakuová pumpa čerpá molekuly atmosféry za pomoci rychle rotujících lopatek, které jsou zkonstruovány tak, že v momentě, kdy molekula narazí na lopatku, tak je odražena směrem pryč ze systému. Turbomolekulární pumpa je schopna čerpat od tlaků 1 až 0,1 Pa napříč vysokým a i ultravysokým vakuem. Toho je docíleno za pomoci kontroly rychlosti otáčení lopatek. Turbomolekulární pumpa však není schopna čerpat z atmosférického tlaku. Proto je k ní

5.6. TĚSNĚNÍ SYSTÉMU

ve vakuovém systému připojena také rotační olejová pumpa (obr. 5.20b), která funguje na principu vytlačení vzduchu mechanickým rotorem. Rotační olejová pumpa je schopna čerpat z atmosférického tlaku na tlak okolo 0,1 Pa [3].



Obrázek 5.20: (a) Schéma turbomolekulární olejové pumpy a (b) schéma rotační olejové pumpy. Převzato z [5].

Pomocí těchto pump bude čerpán prostor uvnitř svařovací komory, uvnitř lineru a prostor zdroje elektronů (tedy veškerá místa, kudy bude elektronový svazek procházet) na tlaky alespoň v řádu 10^{-3} Pa. Vnitřní průměr lineru je 16 mm a jen skrze něj bude čerpána oblast zdroje elektronů. Rychlost čerpání elektronového zdroje bude však dostatečná. V oblasti elektronového zdroje bude vhodné umístit měрку kontrolující tlak v okolí katody, která zabrání spuštění procesu svařování do doby, než se požadovaného vakua docílí.

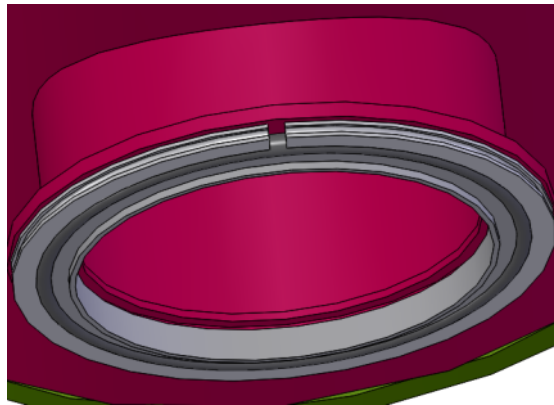
5.6. Těsnění systému

Vakuum, na které je systém třeba čerpat, je v řádu 10^{-3} Pa. Tato hodnota je dána termoemisním zdrojem elektronů. Toto vakuum se považuje za poměrně nízké a takový systém pak není třeba komplikovaně těsnit. K těsnění celého systému jsou využity vitonové těsnicí O-kroužky (obr 5.21), které dokáží efektivně těsnit vakuum do hodnot přibližně 10^{-4} Pa. Pod pojmem viton se rozumí fluor-kaučuková pryž, jejíž vlastností je například vysoká odolnost vůči teplotním změnám a chemikáliím.

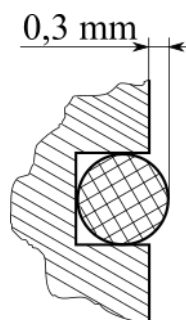
Jak již bylo v předešlých částech zmíněno, tak vakuum bude čerpáno pomocí vakuové pumpy, která je připojena přírubou ke svařovací komoře. Dosedací plocha příruby a vakuové pumpy je prvním místem, kde je třeba umístit vitonové těsnění (obr. 5.22). Těsnění spojení vakuové pumpy se svařovací komorou bude zajištěno pomocí mechanismu od firmy Lewvac. Ne všechna těsnění použitá v tomto návrhu jsou komerčně prodávána firmou Lewvac. Pro ty, která nejsou, jsou v daných plochách vyfrézovány drážky, do kterých se umístí samostatně zakoupené těsnicí kroužky. Aby kroužky dobře těsnily, navrhují se drážky tak, aby kroužek měl vždy po vložení do drážky přesah vůči dosedací ploše přibližně 0,3 mm, tak jak je zachyceno na obrázku 5.23.



Obrázek 5.21: Vitonový O-kroužek určený k těsnění systému.



Obrázek 5.22: Těsnění spojovacích ploch vakuové pumpy a svařovací komory. Zbytek těsnicího mechanismu bude nasazen až po připojení vakuové pumpy, jejíž příruba bude k přírubě svařovací komory uchycena za pomoci těsnicího kroužku viditelného na obrázku a svorek se šrouby od firmy Lewvac.

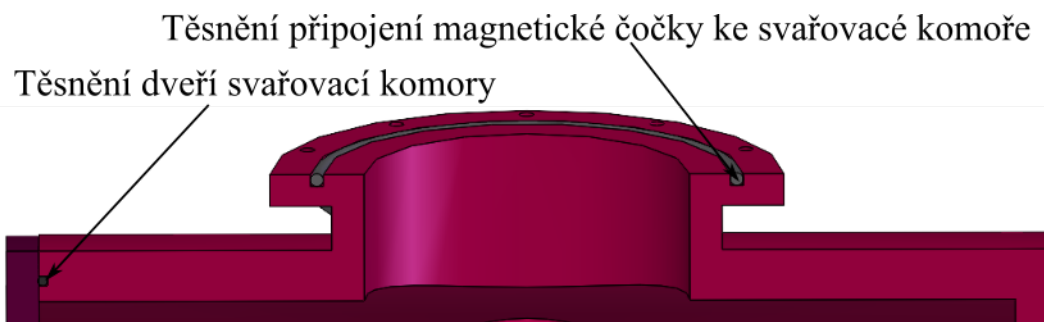


Obrázek 5.23: Znázornění přesahu vitonového těsnicího O-kroužku vůči drážkám vyfrézovaných v dosedací ploše.

Protože celá svařovací komora bude čerpána, je třeba těsnit všechny spoje komory s jinými díly. Na jedné straně komory je přivařené víko. Na druhé straně jsou dvířka

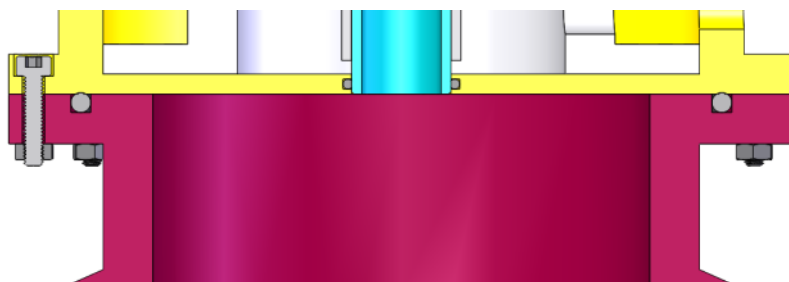
5.6. TĚSNĚNÍ SYSTÉMU

komory a na horní straně komory je příruba pro připojení magnetické čočky. Dvířka komory a místo uchycení magnetické čočky k přírubě komory jsou těsněny, tak jak zachycuje obrázek 5.24.



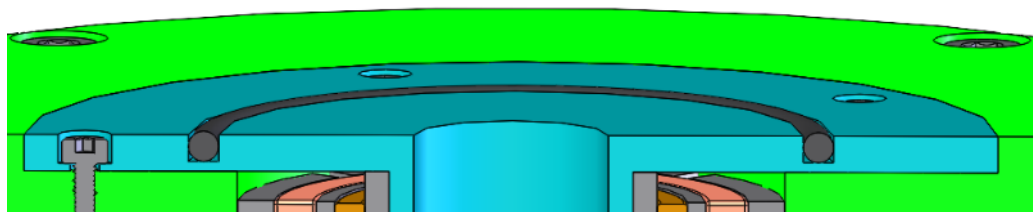
Obrázek 5.24: Znázornění míst, na kterých je třeba svařovací komoru těsnit, protože zde dochází ke spojení s jinými díly sestavy.

Magnetická čočka dosedá na přírubu svařovací komory, jak je znázorněno na obrázku 5.25. Na tomto obrázku je také vidět těsnění lineru pomocí vitonového kroužku uloženého do drážky vyrobené ve vnější části magnetického obvodu čočky. Díky takto provedenému těsnění je vakuum pouze uvnitř svařovací komory a uvnitř lineru. Zbytek magnetické čočky je na vzduchu. Liner se sestaveným držákem vinutí bude nasunut do magnetické čočky. Z důvodu přesahu těsnicího kroužku bude třeba liner do vnitřního průměru těsnění zasunout silou. Z důvodu ulehčení tohoto sestavování je na konci lineru vyrobeno zkosení.



Obrázek 5.25: Připojení magnetické čočky ke svařovací komoře s těsněním a těsnění lineru.

Součástí této práce není návrh elektronového zdroje, avšak v konstrukčním návrhu těsnění je na něj brán ohled. Za účelem těsnění budoucího elektronového zdroje je těsnicí kroužek umístěn také do vyfrézované drážky v horní ploše lineru tak, jak zachycuje obrázek 5.26.



Obrázek 5.26: Těsnění magnetické čočky v místě připojení budoucího elektronového zdroje za pomoci vitonového kroužku uloženého do vyfrézované drážky v horní ploše lineru.

6. Závěr

Cílem této práce bylo započít návrh prototypu elektronové svářečky. Nejprve byl vyhotoven elektronově optický návrh magnetické čočky, vychylovacího systému a korekčního systému. Tento návrh byl upraven na základě teplotní analýzy. Poté byl vyhotoven konstrukční návrh optických částí a také konstrukční návrh svařovací komory. Vše je navrženo s důrazem na jednoduchost a snadnou možnost změny jednotlivých prvků a to především proto, že celý návrh je brán jako prototyp a předpokládá se, že bude nutno některé části v pozdějších krocích vývoje elektronové svářečky upravit.

V práci není řešen návrh zdroje elektronů a také zde není řešen návrh manipulátoru svařovaného objektu. V konstrukčním návrhu vybraných částí optického systému a svařovací komory je na toto však brán ohled.

Magnetická čočka je navržena tak, aby byla schopna pracovat v poměrně velkém rozsahu budičích proudů a také při urychlovacím napětí až 60 keV. Díky tomu je zajištěna velká míra rozsahu možné fokusace elektronového svazku, což kladně přispívá k velké variabilitě celého systému. Celý systém je navržen pro výkon svazku 1 kW.

Vychylovací a korekční systém jsou konstrukčně omezeny především geometrií magnetické čočky. Z teplotní analýzy nakonec vyplynulo, že například vychylovací systém bude možno budít vyššími proudy a díky tomu bude možno vychylovat elektronový svazek až 4 mm od osy, což je důležité především při malých pracovních vzdálenostech, při kterých se dociluje také nejpřesnějších svarů, popřípadě vrtání děr s nejmenšími průměry.

Součástí příloh této práce je celý konstrukční návrh ve formátu STEP. Dále také výkresová dokumentace vybraných dílů. Celý držák vinutí vychylovacího a korekčního systému není ve výkresové dokumentaci zahrnut a to proto, že se bude vyrábět 3D tiskem a ten vyžaduje k výtisku modely ve formátu STL, které jsou též obsaženy v přílohách práce. Postup sestavení a vinutí deflektorů a stigmátoru je v práci detailně popsán. Dalšími přílohami této práce jsou skripty v Matlabu, které usnadňují propočty prováděné v elektronově optickém návrhu. Přesněji se pak jedná o skript usnadňující výpočet minimalizace komy vychýlení a o skript počítající parametry vinutí magnetické čočky. Poslední položkou příloh je návrh magnetické čočky, vychylovacího systému a stigmátoru v programu EOD.

Literatura

- [1] BARTH, J. E. a P. KRUIT. Addition of different contributions to the charged particle probe size. *Optik*. Stuttgart, 1996, (3), 101-109.
- [2] DELONG, A. a V. DRAHOŠ. *Praktická elektronová mikroskopie*. Praha: Československá akademie věd, 1958.
- [3] DUBRAVCOVÁ, V. *Vákuová a ultravákuová technika*. Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 80-050-1090-7.
- [4] DUPÁK, L. *Mikroobrábění nekovových materiálů elektronovým svazkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 101 s. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.
- [5] FRANC, V. *Návrh mechanismu justáže Wehneltova válce elektronové trysky*. Brno: 2020. Dostupné také 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.
- [6] HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [7] HORÁČEK, M., DUPÁK, J. Temperature controlled cathode heating in electron beam welding machine. *Vacuum*, 2001, vol.62, no.2-3, s.165-169. ISSN 0042-207X.
- [8] HULÍNSKÝ, V. a K. JUREK. *Zkoumání látek elektronovým paprskem*. Praha: SNTL, 1982. Moderní metody v chemické laboratoři. ISBN L-16-B3-V-31/82066.
- [9] JÁNSKÝ, P. *Coulombovské interakce v elektronových svazcích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 64 s. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.
- [10] REIMER, L. *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.
- [11] SCHULTZ, H. *Electron beam welding*. Cambridge CB1 6AH, England: Abington Publishing, 1993. ISBN 1-85573-050-2.
- [12] SHÁNĚL, O. *Tolerances and Misalignment Aberrations for Electron Optical Elements and Systems*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 87 s. Vedoucí disertační práce Ing. Jakub Zlámal, Ph. D.
- [13] WILLIAMS, D. B. a C. B. CARTER. *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*. Second edition. New York: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-76500-6.

- [14] ZLÁMAL, J. a B. LENCOVÁ. Development of the program EOD for design in electron and ion microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2011, 645(1), 278-282 [cit. 2022-05-16]. ISSN 01689002. Dostupné z: doi:10.1016/j.nima.2010.12.198
- [15] ZOBAČ, M. *Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 158 s. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.

Seznam příloh

Seznam výkresů

Číslo výkresu	Název výkresu	Formát výkresu
DP_ES_001	Vnitřní část magnetického obvodu čočky	A3
DP_ES_002	Vnější část magnetického obvodu čočky	A3
DP_ES_004	Liner	A3
DP_ES_000	Výkres sestavy elektronové svářečky	A2

Seznam souborů pro 3D tisk

Název souboru	Popis	Formát souboru
DP_ES_009_a	Držák vinutí dolního deflektoru	.stl
DP_ES_009_b	Držák vinutí horního deflektoru	.stl
DP_ES_009_c	Držák vinutí stigmátoru	.stl
DP_ES_010	Podpěra vinutí cívky čočky	.stl

Seznam skriptů

Název skriptu	Tvorba v programu	Formát skriptu
deflektory_optimalizace_komy	Matlab	.m
stigmator_astigmatismus_tolerance	Matlab	.m
parametry_vinuti_cocky	Matlab	.m

Seznam dalších příloh

Popis přílohy	Tvorba v programu
3D konstrukční model	Solidworks
Elektronově optický návrh	EOD