

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Ing. Martin Zobač

**ŘÍZENÍ A DIAGNOSTIKA ELEKTRONOVÉHO SVAZKU
PRO POKROČILÉ TECHNOLOGIE**

**ELECTRON BEAM CONTROL AND DIAGNOSTICS
FOR ADVANCED TECHNOLOGIES**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Vedoucí práce: prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektronový svazek; vychylování svazku; diagnostika svazku; profil svazku; elektronová svářečka

KEYWORDS

electron beam; beam deflection; beam diagnostics; beam profile; electron beam welder

OBSAH

1	Úvod	5
2	Přehled stavu problematiky	6
2.1	Technologické využití elektronového svazku	6
2.2	Vychylování svazku	6
2.3	Řízení a diagnostika svazku	7
2.4	Profily svazku	8
3	Cíle disertační práce	9
4	Experimentální zařízení	10
4.1	Elektronová svářečka MEBW-60/2	10
4.2	Elektronická část	11
4.3	Software	11
4.4	Faradayova sonda	14
5	Vychylování svazku	14
5.1	Model vychylovacího systému	15
5.2	Vyhodnocení polohy svazku	15
5.3	Geometrické zkreslení	15
5.4	Magnetická hystereze	16
5.5	Stabilita	16
5.6	Dynamika vychylovacího systému	17
6	Profily svazku	17
6.1	Příčný profil svazku	18
6.2	Podélný profil	18
6.3	Transformace profilů měřených přeostřením	19
6.4	Měření proudové a výkonové hustoty	20
6.5	Tepelné zatížení clony	21
7	Experimentální výsledky	21
7.1	Zkreslení vychylovacího systému	22
7.2	Remanentní magnetismus vychylování	23
7.3	Dlouhodobá stabilita vychylovacího systému	23
7.4	Rozložení výkonové hustoty ve svazku	24
7.5	Srovnání profilu měřeného se stacionárním a pohyblivým detektorem	24
7.6	Určení optimálního žhavicího proudu katody	26
7.7	Fokusační křivky	27
8	Závěr	28
	Literatura	31

1 ÚVOD

Názvem elektronový svazek označujeme proud elektronů pohybující se ve vakuu přibližně stejným směrem a rychlostí. Na svazek můžeme působit pomocí elektronově-optických prvků. Pomocí elektronových čoček lze svazek soustředit na malou plochu a dosáhnout tak výkonové hustoty až 10^6 W mm^{-2} . Při interakci svazku s pevnou látkou elektrony předávají velkou část své kinetické energie materiálu ve formě tepla, což lze využít v technologických aplikacích k lokalizovanému intenzivnímu ohřevu materiálu. Místo působení elektronového svazku můžeme měnit pomocí magnetického nebo elektrostatického pole, a to velmi rychle díky nízké setrvačnosti vychylovacího systému. Dosažitelná je rychlost v řádu tisíců metrů za sekundu a zrychlení přes 10^9 m s^{-2} .

Uvedené výhodné vlastnosti elektronového svazku se využívají v řadě zavedených technologií i v nových aplikacích, například při 3D-tisku elektronovým svazkem, multikapilárním svařování, tepelném zpracování povrchové vrstvy nebo mikroobrábění. Tyto metody vyžadují přesný a výkonný vychylovací systém a stabilní kvalitu elektronového svazku. Mají-li se z laboratorních podmínek přenést do výroby, je vyžadována spolehlivost a reprodukovatelnost, pokud možno nezávislá na zkušenostech obsluhy. Proto je třeba vyvíjet metody pro posuzování kvality generovaného svazku, pro stanovení pracovních charakteristik elektronové trysky a dalších procesních parametrů. V práci jsem se vzhledem k velké šíři tématu soustředil především na dvě hlavní oblasti: určení vlastností vychylovacího systému a měření rozložení výkonové hustoty v příčných a podélných řezech svazku. Stanovené cíle práce jsou uvedeny ve 3. kapitole.

Řešení vychylovacího systému je komplexní problém, zahrnující oblasti elektronové optiky, elektroniky a softwaru. Při vývoji elektronové svářečky a při experimentech s novými aplikacemi elektronového svazku jsme narazili na řadu nedostatků stávajícího vychylovacího systému. Při mikrosvařování byla na závadu malá stabilita výchylky a nízká opakovatelnost nastavení polohy. Při vytváření tvarových svarů se negativně projevilo geometrické zkreslení. Při gravírování, které vyžaduje rychlé pohyby svazku, se ukázaly nedostatky v dynamice vychylování. Příčiny těchto nedostatků jsou rozebrány v 5. kapitole spolu s uvedením měřicích metod, které jsou ověřeny experimenty uvedenými v 7. kapitole.

Rozložení výkonové hustoty v příčném, podélném nebo jinak vedeném řezu svazku (tzv. profilu svazku) poskytuje informace o vlastnostech svazku a o stavu elektronově-optického systému. Z profilu svazku můžeme například stanovit rozměry svazku nebo maximální výkonovou hustotu. Ze

série profilů lze posoudit seřízení trysky, astigmatismus optické soustavy nebo najít rovinu nejmenšího průměru svazku. Problematika měření profilů svazku, zpracování naměřených dat a jejich interpretace je popsána v 6. kapitole, ověření a praktické aplikace jsou v 7. kapitole.

2 PŘEHLED STAVU PROBLEMATIKY

2.1 TECHNOLOGICKÉ VYUŽITÍ ELEKTRONOVÉHO SVAZKU

Počítačem řízený intenzivní elektronový svazek přináší nové možnosti v *tepelném zpracování kovů* díky téměř libovolnému rozložení tepelného příkonu na povrchu zpracovávané součástky. Mezi možnými postupy lze uvést povrchové tvrzení, přetavení povrchové vrstvy, legování, plátování, navařování a disperzní přetavení [35].

Při *svařování* zaostřený elektronový svazek zahřívá materiál spojovaných součástek na teplotu vyšší, než je teplota tavení. Při dobře sesazených komponentech dojde k promísení taveniny na rozhraní a po vychladnutí vzniká pevný spoj. Rozsah proveditelných průvarů začíná v oblasti svarů sub-milimetrových až mikrometrových [3] a končí u svarů přes 300 mm hlubokých [29].

Při *obrábění* elektronovým svazek se materiál zahřeje na tak vysokou teplotu, že dojde k jeho odpaření [32]. K tomu je nutné dosáhnout (zejména při zpracování kovů) nejvyšší výkonové hustoty svazku v porovnání s ostatními technologiemi (10^5 – 10^6 W mm⁻²). Moderní zařízení dosahují produktivity až 3000 děr za sekundu díky vysokému pulsnímu výkonu generátoru svazku (řádově desítky kW) [31]. Nejmenší produkované průměry děr jsou okolo 25 μm.

Dynamickým řízením místa dopadu svazku lze vytvářet *obecné textury* na povrchu materiálu, například značky či nápisy [5, 36]. *3D-tiskem* elektronovým svazkem můžeme vyrobit trojrozměrnou kovovou součást na základě virtuálního modelu v počítači. Princip spočívá ve vytváření součásti vrstvu po vrstvě z kovového prášku umístěného v nádobě s pohyblivým dnem. Elektronový svazek je vychylován po povrchu prášku, přičemž přetaví oblast odpovídající řezu daného objektu v příslušné rovině. Poté je dno nádoby sníženo a nanesen další prášek. Ten je opět lokálně roztaven a propojen s předchozí vrstvou. Proces se opakuje tak dlouho, až je celý objem tělesa kompletní [1].

2.2 VYCHYLOVÁNÍ SVAZKU

Elektronový svazek může sloužit ke *zobrazování* předmětů v pracovní komoře podobně jako v rastrovacím elektronovém mikroskopu (REM) [38].

Svazkem se rastruje po vymezené oblasti a pomocí vhodného detektoru se synchronně snímá signál odpovídající množství zpětně odražených a/nebo sekundárních elektronů. Rozlišení je u technologických zařízení sice výrazně nižší než u elektronového mikroskopu, nicméně v řadě případů je postačující.

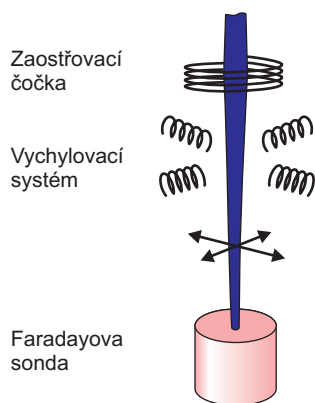
Počítačem generované trajektorie místa dopadu svazku mohou být libovolného tvaru. V kombinaci s REM režimem můžeme velmi přesně zvolit místo dopadu svazku, protože existuje jednoznačný vztah mezi místem v obraze a polohou (vychýlením) svazku. Rychlost pohybu svazku můžeme dynamicky měnit. Numerické řízení přináší možnost redukce vad zobrazení zavedením korekčních (softwarových) členů.

Při elektronovém svařování je nutné svazek velmi přesně polohovat vzhledem ke spáře mezi svařovanými součástkami. Vychylovací systém může pomoci vést svazek po spáře. Tzv. off-line systémy nejprve pomocí svazku s malým výkonem nasnímají potřebnou oblast a automaticky nebo ručně určí trajektorii budoucího svaru. V druhém kroku je pak proveden svar patřičným výkonem. On-line systémy provádějí lokalizaci spáry během svařování pomocí svazku. Ten je vždy krátce vychýlen před místo probíhajícího svařování a velmi rychle překmitne přes spáru. Z odezvy detektoru je určena poloha spáry a pokračuje svařování po zjištěné trajektorii [2].

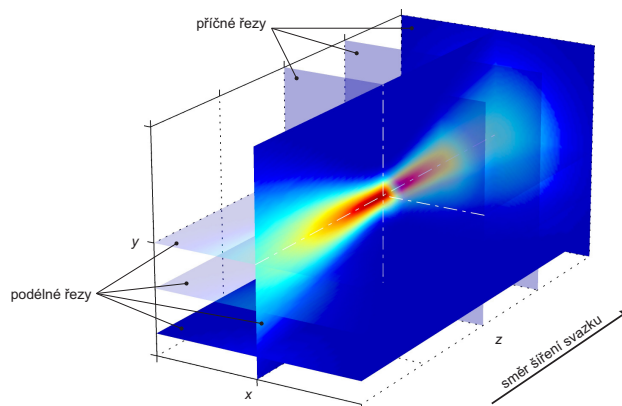
2.3 ŘÍZENÍ A DIAGNOSTIKA SVAZKU

Pojem *řízení svazku* označuje postupy sloužící k ovlivnění vybraných parametrů elektronového svazku, například jeho výkonu, zaostření, místa působení a podobně. K získání a formování svazku se využívá elektronová tryska a většinu parametrů svazku tak můžeme ovlivnit změnou nastavení trysky. Pojem *diagnostika svazku* označuje soubor měřicích metod vedoucích ke stanovení charakteristik svazku a elektronové trysky. Tyto informace jsou potřebné k seřízení přístroje, ke stanovení jeho vlastností, výkonnosti a k zajištění reprodukovatelného provozu.

Většina moderních zařízení disponuje základními prostředky pro seřízení elektronové trysky doplněné kontrolu jakosti prováděných operací. Protože jde většinou o komerční výrobky, nelze v této oblasti příliš čerpat z odborné literatury. Výjimku tvoří publikace [9, 20, 22, 30]. Nemnoho technických informací najdeme ve firemních prezentacích a prospektech. S ohledem na šíři tématu diagnostiky se v práci soustředím na jednu vybranou problematiku, kterou je měření profilů svazku. Popis praktického řešení řízení elektronově-optického zařízení je součástí 4. kapitoly.



Obrázek 1: Princip měření profilu svazku Faradayovou sondou.



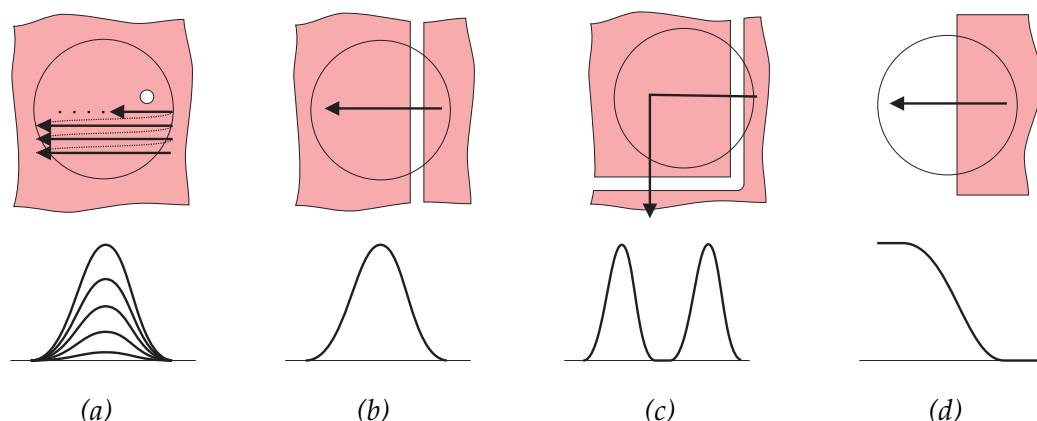
Obrázek 2: Příčný a podélný profil svazku. Definice rovin řezů na příkladu fokusovaného svazku.

2.4 PROFILY SVAZKU

Profilem svazku je nazýváno rozložení výkonové (případně proudové) hustoty na zvolené linii nebo rovině (řezu) svazku. Profily reálného svazku závisí na geometrii trysky, jejím seřízení, optických vadách systému a dalších vlivech. Z profilu je možno určit řadu charakteristických parametrů, například průměr a kruhovitost svazku, maximální výkonovou hustotu svazku, míru seřízení trysky, astigmatismus optické soustavy, rovinu nejmenšího průměru svazku a další [17, 20, 23]. Tyto údaje ve fázi návrhu zařízení vytváří zpětnou vazbu pro návrháře elektronové optiky. Za provozu dávají možnost posoudit seřízení přístroje a předpovědět úspěšnost následující technologické operace.

V práci se zabývám metodou postupného snímání rozložení proudové hustoty pomocí Faradayovy sondy s tvarovanou vstupní clonou (viz obr. 1) [22, str. 64–71]. Svazek může být během měření nehybný a sonda se mechanicky pohybuje nebo je nehybná sonda a svazek je vychylován, případně se kombinuje pohyb a vychylování. Podle orientace roviny měření profilu vzhledem k ose svazku mluvíme o příčném nebo podélném profilu (viz obr. 2). Příčný profil poskytuje informaci o rozložení plošné hustoty výkonu svazku. Slouží k posouzení příčných rozměrů svazku, určení mezních hodnot výkonové hustoty a tvaru stopy svazku. Podélný profil zachycuje vývoj svazku podél jeho osy. S jeho pomocí lze určit místo nejmenšího průměru, hloubku ostroti, divergenci svazku a další parametry.

Při vzorkování profilu je část svazku, která projde k vlastnímu snímači, vymezena tvarovou clonou. Běžně používané jsou clony ve tvaru šterbiny, ostré hrany nebo ve formě malého kruhového otvoru (viz obr. 3) [4]. V případě bodové sondy (obráz. 2.3a) odpovídají naměřená data lokální proudové hustotě svazku. Snímání se provádí řádek po řádku, výsledný profil je



Obrázek 3: Různé tvary clon pro měření profilu, způsob postupného snímání a příklady signálové odezvy detektoru: (a) bodová clona, (b) štěrbinová clona, (c) L-štěrbinová clona a (d) hrana. Šipky vyznačují směr relativního pohybu sondy a svazku.

dvourozměrný. Při měření se štěrbinovou clonou (obr. 2.3b) nebo při použití hrany (obr. 2.3d) je profil integrální. Díky tomu, že je snímání uskutečněno jedním průchodem svazku přes snímač, se sníží tepelné zatížení sondy.

Průměr (nebo také šířka) svazku je přibližný údaj vzhledem k charakteru většiny reálných svazků, které nevykazují žádné ostré ohraničení. Jednotlivé definice šířky svazku vykazují značně rozdílné výsledky lišící se až pětikrát [30]. Kanonická definice vychází z odečtení šířky průběhu proudové hustoty v místě poklesu intenzity na zvolenou mez oproti maximu. Často používané kritérium je takzvaná pološířka $d_{50\%}$ neboli FWHM (z anglického Full Width at Half Maximum). Pro hodnocení částicových svazků je doporučována norma ISO 11 146 [15], původně určená pro laserové svazky.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z předchozí kapitoly vyplývá, že pro další rozvoj pokročilých technologií využívajících elektronový svazek je nezbytné zdokonalovat zřízení, jeho diagnostiku i diagnostiku produkovaného elektronového svazku. Hlavními cíli práce jsou zejména:

- návrh a výstavba experimentálního zařízení,
- analýza jednostupňového magnetického vychylovacího systému,
- metodika měření vlastností vychylovacího systému,
- měření charakteristik elektronově-optického zařízení,
- snímání profilů intenzivních svazků a
- vyhodnocení charakteristických parametrů svazku z těchto profilů.

Výsledky budou sloužit k dalšímu vývoji trysky s ohledem na plánovaný rozvoj technologií elektronového svazku, například mikroobrábění, pokročilé svařování [6, 7, 39], pro posouzení vlivu nastavení trysky na parametry

svazku, k reprodukovatelnému seřízení elektronové trysky a pro srovnání se simulacemi trysky, jejichž výpočty v ÚPT souběžně probíhají [16].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

4.1 ELEKTRONOVÁ SVÁŘEČKA MEBW-60/2

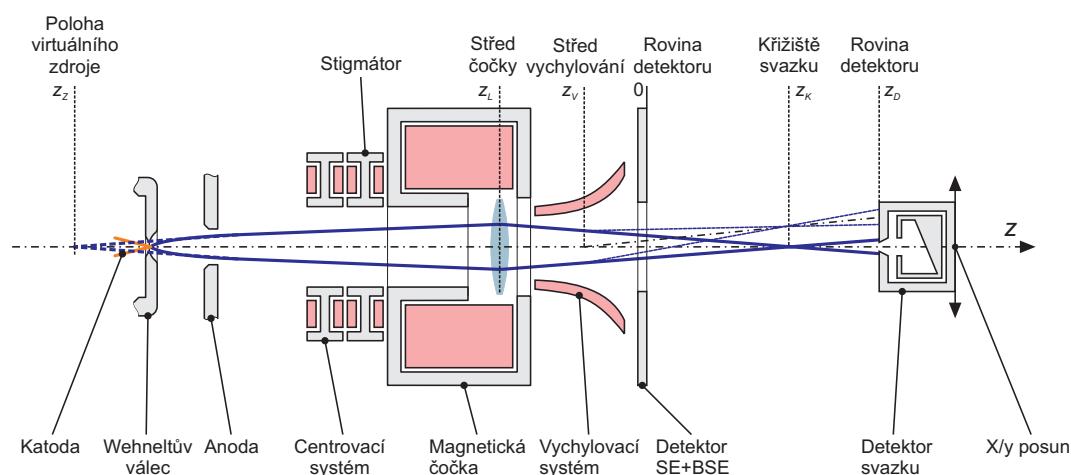
V průběhu mého doktorského studium proběhl vývoj nové elektronové svářečky MEBW-60/2 (Micro Electron Beam Welder), určené zejména pro svařování v oblasti menších výkonů v přístrojové, vakuové a kryogenní technice (*viz* obr. 4). Úpravy mechanických částí provedl Ing. Vlček. Já jsem se podílel na vývoji jako koordinátor projektu, výhradní návrhář elektroniky a programátor softwaru. Práce na návrhu a výrobě MEBW-60/2 byly zahájeny v lednu 2006, prototyp byl dokončen v září 2007 a výrobní dokumentace byla dokončena v říjnu 2008. Licenční výrobu nyní zajišťuje firma Focus GmbH [10]. Další informace je možno čerpat z publikací [7, 8, 34]. Kromě prototypu se realizovala i upravená verze zařízení v ÚPT AV ČR, která je nyní plně funkční a je používána pro experimenty v rámci této práce i v dalších projektech.



Obrázek 4: Elektronová svářečka MEBW-60/2.

Elektronová tryska vychází z konstrukce popsané v [5] a pracuje s urychlovacím napětím do 60 kV a s výkonem do 2 kW. Optický systém elektronové trysky MEBW-60/2 je na obrázku 5. Obsahuje jednu magnetickou čočku, jednostupňový magnetický centrovací systém a jednostupňový magnetický vychylovací systém. Jako zdroj elektronů slouží přímo žhavená vlásenková katoda z wolframového drátu o průměru 0,15 mm.

Pracovní komora je válcová s vnitřními rozměry $\phi 235 - 155$ mm. Svářečka je vybavená motorizovaným manipulátorem, umožňujícím rotaci a lineární



Obrázek 5: Schéma optické soustavy trysky s vyznačením chodu svazku.

pohyb v ose Z, který je vhodný pro svařování rotačně symetrických součástí. V případě potřeby je možno použít x-y stolek poháněný krokovými motory [33]. Vakuový systém obsahuje dvě turbo-molekulární vývěvy; předvakuum zajišťuje rotační vývěva. Tlak v trysce je za provozu pod $4 \cdot 10^{-4}$ mbar, dosažitelný mezní tlak okolo 10^{-5} mbar.

4.2 ELEKTRONICKÁ ČÁST

Elektronika MEBW-60/2 je rozdělena do šesti samostatných funkčních bloků, a to:

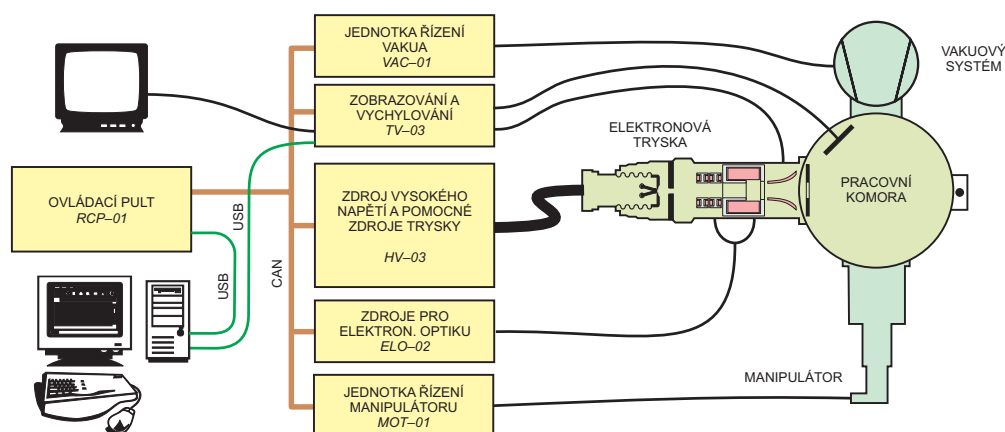
- zdroje vysokého napětí (HV-03),
- jednotky řízení vakua (VAC-01),
- jednotky řízení manipulátorů (MOT-01),
- zdroje pro elektronovou optiku (ELO-02),
- zobrazovací a vychylovací jednotky (TV-03) a
- ovládacího pultu (RCP-01).

Napojení na fyzikální část je symbolicky naznačeno na obr. 6. Vzájemnou komunikaci jednotek zajišťuje sériová sběrnice standardu CAN 2.0.

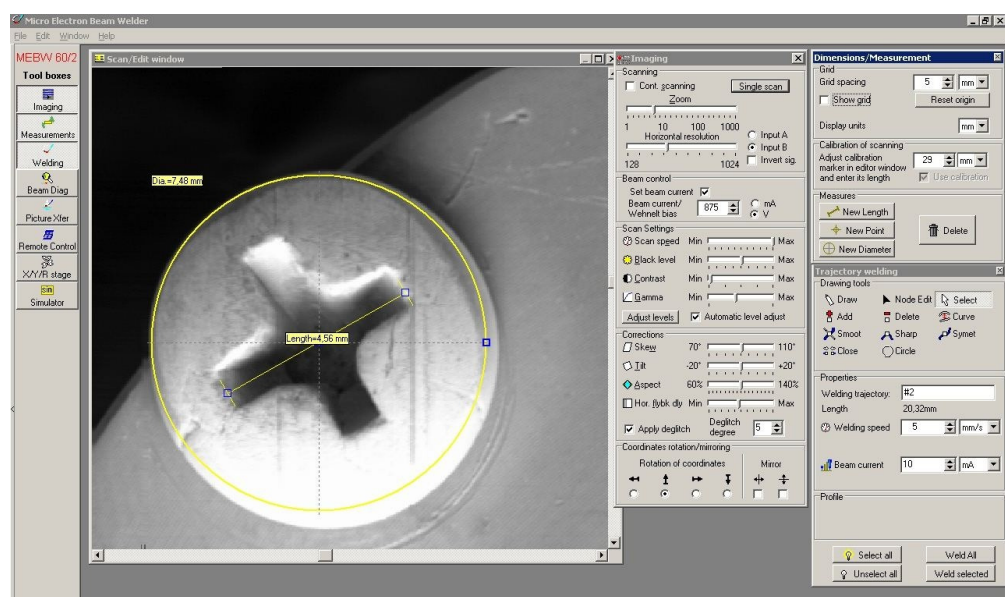
4.3 SOFTWARE

Svářečku MEBW-60/2 lze řídit pomocí ovládacího pultu nebo z běžného osobního počítače, který je připojen pomocí dvou USB portů. Prostřednictvím jednoho portu je řízen vychylovací systém a zpracovávána obrazová data, druhý slouží k ovládání všech zbývajících funkcí.

Komunikaci s hardwarem ze strany PC zajišťuje program DACPATH, který disponuje kromě grafického uživatelského rozhraní (viz obr. 7) i DDE kanál [24] pro propojení s dalšími aplikacemi, například s MatLabem [21]. Program se skládá z řady navzájem propojených modulů. Modul *Snímání*



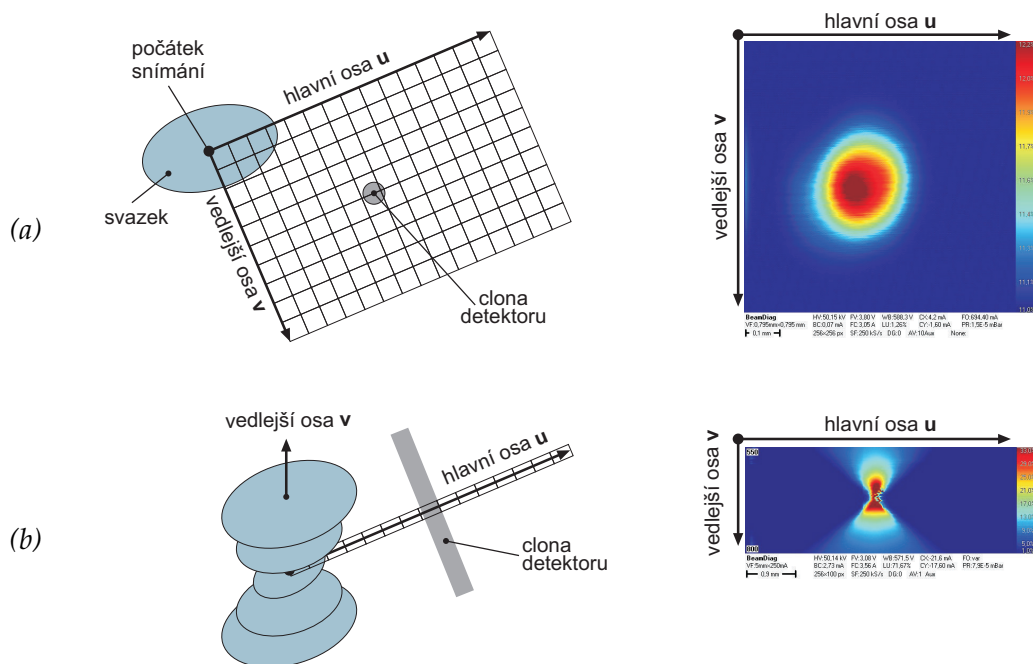
Obrázek 6: Blokové schéma řízení elektronové svářečky MEBW-60/2.



Obrázek 7: Snímek uživatelského rozhraní PC software svářečky MEBW-60/2.

obrazu (*Imaging*) umožňuje snímání obrazu obdobným způsobem jako rastrovací elektronový mikroskop. Volí se poloha a velikost zorného pole, rozlišení, rychlost snímání, detektor a proud sondy (svazku). *Svařování po zadané křivce (Welding)* umožňuje zadat požadovanou trajektorii svazku složenou z úseček a částí Bézierových křivek. Body se vkládají ručně pomocí myši na podkladě nasnímaného obrazu, takže můžeme snadno určit například spáru mezi dvěma součástkami.

Pomocí modulu *Diagnostka svazku (BeamDiag)* můžeme získat příčné a podélné profily svazku. Snímání probíhá buď rastrováním ve dvou kolmých směrech v rovině $x - y$ (použití pro příčné profily, viz obr. 4.8a) nebo vychýlováním jen v jednom směru v kombinaci se změnou zvoleného parametru (použití pro podélné profily, viz obr. 4.8b). Sejmutí příčného profilu s rozlišením 256×256 bodů trvá asi 0,4 s při maximální rychlosti

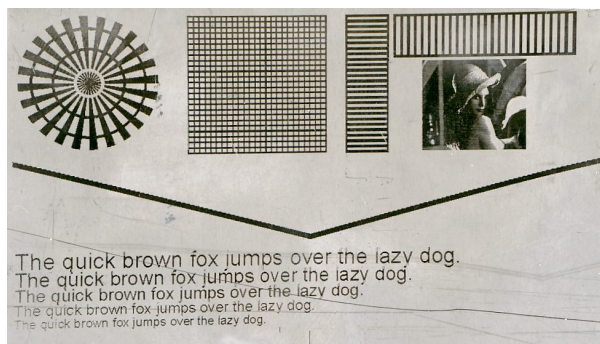


Obrázek 8: Snímání profilu svazku: (a) – vychylování svazku ve dvou osách, (b) – vychylování svazku pouze v jednom směru kombinované se změnou další nezávislé veličiny (osa v).

snímání. Sejmутí podélného profilu se stejným rozlišením při prodlevě 19 ms na každém řádku trvá asi pět sekund. Nasnímaná data jsou uložena binárně ve 32bitové hloubce a vizualizována ve formě pseudo-barevné intenzitní mapy. Kompletní sada procesních parametrů (cca 70 hodnot) a nastavení snímání jsou uloženy do zvláštního souboru.

Diagnostika vychylovacího systému (DeflDiag) je experimentální modul určený pro analýzu vlastností vychylovacího systému. Podle zvoleného režimu řídí vychylovací systém a případně další procesní parametry. Modul je řešený jako otevřený systém, který je postupně rozšiřován podle nově vzniklých potřeb. Pro ovládání hardwaru byla napsána softwarová knihovna, které zjednodušuje implementaci konkrétního postupu. K dispozici je řada funkcí pro generování jednoduchých grafických entit (čára, kružnice a další) i komplexních útvarů, například nápisů nebo rastrových obrázků (viz obr. 9).

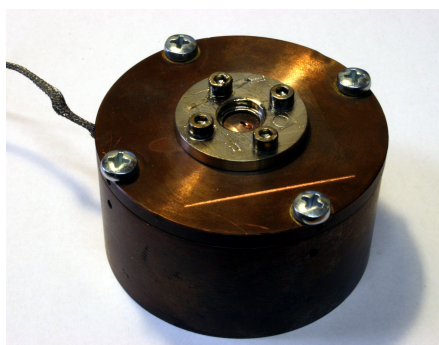
Modul *odměřování (Measurements)* umožňuje po zkalibrování vychylovacího systému odečítat rozměry a polohu prvků v obraze. K dispozici je odečet délky, průměru a polohy. *Picture Transfer* vytváří zadaný motiv řádek po řádku přetavením povrchu svazkem, přičemž odlišného působení na povrch je dosaženo změnou doby vystavení daného místa tepelným účinkům svazku (viz obr. 10) [36].



Obrázek 9: Testovací obrazec vytvořený přetažením povrchu elektronovým svazkem.



Obrázek 10: Příklad detailu fotografie přenesené na povrch nerezového plechu přetavením elektronovým svazkem.



(a)



(b)

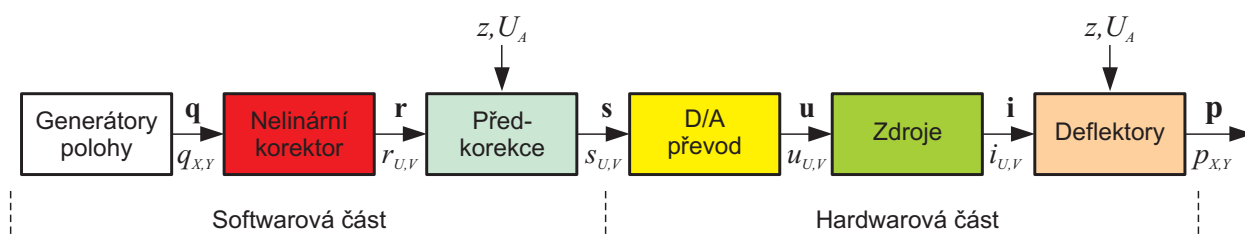
Obrázek 11: Faradayovy sondy: (a) – starší konstrukce sondy, (b) – novější konstrukce.

4.4 FARADAYOVA SONDA

Na obrázku 11 jsou dvě konstrukce Faradayovy sondy, které byly použity pro experimenty uvedené v této práci. Základem starší konstrukce (obr. 4.11a – autor Ing. J. Dupák) je robustní měděný plášť ve tvaru hrníčku, který má ve vnitřním prostoru izolovaně připevněnu sběrací elektrodu. K dispozici je kryt s centrálním otvorem, na který se montuje vstupní clona. Případně je možné použít dvojici měděných desek s podbroušenými hranami. Sonda je vhodná pro měření svazku s výkonem do 2 kW. Druhá, modernější konstrukce (obr. 4.11b – návrh Ing. I. Vlček) má menší rozměry, které umožňují měření i ve vnitřní části trysky.

5 VYCHYLOVÁNÍ SVAZKU

Vysoká dosažitelná rychlost vychylování svazku magnetickým polem je přednost, která otevírá nové možnosti pro technologické aplikace elektronového svazku. Řešení vychylovacího systému je komplexní problém, zahrnující oblasti elektronové optiky, mechanické konstrukce, technologie, elektroniky a softwaru. Při experimentech jsme narazili na řadu nedostatků



Obrázek 12: Model vychylovacího systému elektronového svazku (rozdělení na funkční bloky).

vychylovacího systému. V této kapitole jsou popsány vlastnosti magnetického jednostupňového dvouosého (X-Y) vychylovacího systému a metody jejich měření.

5.1 MODEL VYCHYLOVACÍHO SYSTÉMU

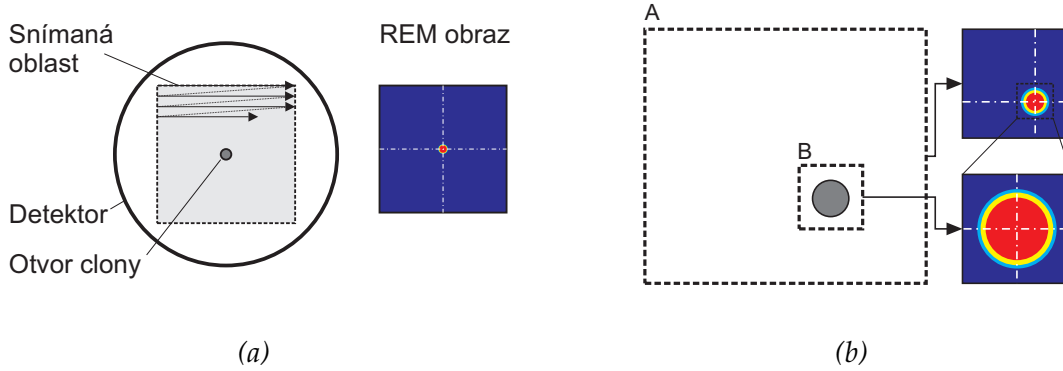
Schéma na obrázku 12 představuje model vychylovacího systému, který používám v této práci. *Deflektory* jsou tvořeny vychylovacími cívkami a případným magnetickým obvodem. Jejich chování je zpracováno v odborných článcích a publikacích [12, 18, 19]. *Budicí zdroje vychylovacích cívek* dodávají proudy do vychylovacích cívek úměrné napětíovým signálům u . Numerické řízení polohy svazku umožňuje dvojice *D/A převodníků*, které převádějí bezrozměrný numerický vstupní vektor s na napětíovou úroveň. *Předkorekce* převádí bezrozměrné řízení na délkové jednotky. *Nelineární korektor* má za úkol napravovat geometrické zkreslení vychylovacího systému.

5.2 VYHODNOCENÍ POLOHY SVAZKU

K přímé detekci polohy svazku je možné využít kvadrantový detektor sestavený ze čtyř shodných vodivých plošek rozmístěných po devedesáti stupních. Rychlé změny magnetického pole můžeme měřit plochou měřicí cívkou, která se vloží do dutiny deflektoru. Napětí na cívkce je úměrné časové změně magnetického toku procházející cívkou. Třetí metoda spočívá v rastrování elektronovým svazkem malého výkonu přes Faradayovu sondu (viz obr. 13). Ze signálu sondy je sestaven obraz, ve kterém je určena poloha vztažného bodu. V případě vyšší požadované přesnosti měření je možné postup zopakovat se zorným polem upraveným podle výsledků prvního měření.

5.3 GEOMETRICKÉ ZKRESLENÍ

U ideálního vychylovacího systému je výchylka svazku úměrná proudům vychylovacích cívek. U reálných systémů je možné vyjádřit závislost polohy



Obrázek 13: Vyhodnocení polohy svazku: (a) – princip vyhodnocení polohy detektoru snímáním v REM režimu, (b) – zpřesňující snímání ve dvou krocích.

svazku na buzení vychylování přenosovou funkcí ve tvaru:

$$\begin{pmatrix} r_U \\ r_V \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} a_{Ux^3} & a_{Ux^2y} & a_{Uxy^2} & a_{Uy^3} & a_{Ux^2} & a_{Uxy} & a_{Uy^2} & a_{Ux} & a_{Uy} & a_{U0} \\ a_{Vx^3} & a_{Vx^2y} & a_{Vxy^2} & a_{Vy^3} & a_{Vx^2} & a_{Vxy} & a_{Vy^2} & a_{Vx} & a_{Vy} & a_{V0} \end{pmatrix}}^A \begin{pmatrix} x^3 & x^2y & xy^2 & y^3 & x^2 & xy & y^2 & x & y & 1 \end{pmatrix}^T, \quad (1)$$

kde x a y jsou vstupní souřadnice, A je matice koeficientů. Funkce obsahuje členy do třetího řádu včetně, což umožňuje korigovat i vady nelineárního charakteru jako je soudkovitost či poduškovitost. Koeficienty přenosové funkce se určí tak, aby odchylky požadované a skutečné polohy svazku byly co nejnižší. K tomu je nutné změřit odchylky v dostatečném počtu bodů rozprostřených po celém vychylovacím poli. Vzniklá přeuročená soustava se vyřeší pomocí regresní analýzy, například metodou nejmenších čtverců.

5.4 MAGNETICKÁ HYSTEREZE

Opakovatelnost polohování svazku zhoršuje hystereze magnetických materiálů, kterými prochází magnetický tok vychylovacích cívek [11, kap. 2 a 3]. Skutečná výchylka svazku je tak závislá nejen na okamžitém proudu vychylovacích cívek, ale i na předchozím stavu. Konstrukce a volba materiálů vychylovacího systému a přilehlé prvky mají rozhodující vliv na hysterezi systému. Je-li nezbytné použít magneticky vodivé prvky, měla by volba materiálu respektovat požadavek na co nejužší hysterezní křivku.

5.5 STABILITA

Zvlnění či šum ve vychylovacím řetězci se projevuje rozmazáním stopy svazku, zvlněním či deformacemi obrazu v REM režimu. Nestabilitu je možno snížit vhodným návrhem budicích obvodů (pro vnitřní zdroje

nestability), případně přidavným stíněním (pro rušení pocházející z vnějších zdrojů). Míru šumu ve vychylovacím řetězci můžeme určit měřením proudů deflektorů, pole deflektorů (například s pomocí měřicí cívky), výchylek svazku (například kvadrantovým detektorem) nebo nepřímo z degradace REM obrazu.

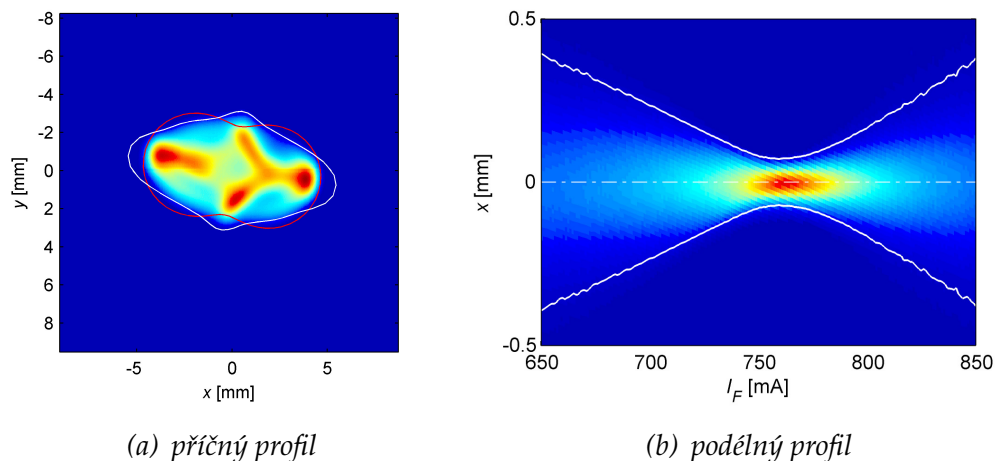
Dlouhodobá stabilita se vyznačuje relativně pomalými změnami polohy svazku, které snižují reprodukovatelnost nastavení polohy. Zdrojem nestability mohou být budicí zdroje vychylovacího systému, elektrická a mechanická nestabilita celého zařízení nebo nabíjení nevodivých předmětů v blízkosti svazku. Při měření dlouhodobé stability se pro svou relativní jednoduchost a přesnost ukázalo jako nejvhodnější měření pomocí REM režimu.

5.6 DYNAMIKA VYCHYLOVACÍHO SYSTÉMU

Rychlost vychylování svazku můžeme měnit v širokém rozsahu a velmi strmě. Minimální rychlost není prakticky nijak omezena; maximální závisí na mnoha faktorech, například na indukčnosti vychylovacích cívek, na jejich citlivosti pro danou energii svazku, na pracovní vzdálenosti a na špičkovém napětí budicího zdroje [38]. Relativně snadno dosažitelná rychlost je 10^3 m s^{-1} při zrychlení řádově 10^9 m s^{-2} (asi 10^6 krát více ve srovnání s mechanickým polohováním). Maximální rychlost přesunu místa dopadu svazku je dána především vlastnostmi vychylovacích cívek a jejich zdrojů. Teoretická mezní rychlost pro systém s daným zdánlivým výkonem [38] nemusí však být vždy dosažena. Snížit ji mohou nežádoucí jevy, například indukce vířivých proudů ve vodivých prvcích v okolí vychylovacího systému nebo parazitní kapacita cívek.

6 PROFILY SVAZKU

Potřeba charakterizace elektronového svazku vznikla na našem pracovišti během vývoje technologií a zařízení využívajících svazek. Bez možnosti objektivního posouzení stávajícího vybavení by byl další postup velmi obtížný. Dalším důležitým důvodem, souvisejícím se zavedením průmyslové výroby elektronové svářečky MEBW-60/2, je nutnost stanovení referenčních charakteristik a hodnot elektronové trysky pro zajištění reprodukovatelné výroby zařízení. Měření a interpretace profilů elektronového svazku, tj. rozložení výkonové, případně proudové hustoty v řezu svazku, je poměrně rychlá a jednoduchá metoda charakterizace svazku.



Obrázek 14: Příklad příčného a podélného profilu s vyznačenou obálkou svazku.

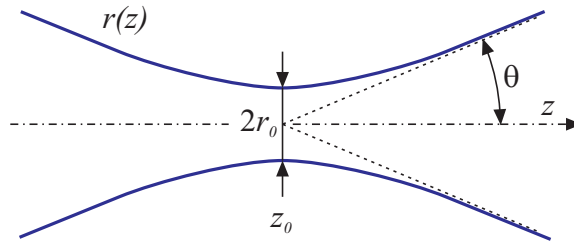
6.1 PŘÍČNÝ PROFIL SVAZKU

Měření profilů v rovině kolmé k ose svazku jsem řešil postupným snímáním proudu svazku pomocí Faradayovy sondy s bodovou clonou. Vymezení dostatečně malé části svazku se dosáhne zmenšením vstupu sondy clonou s malým otvorem, přičemž vzorkování probíhá po řádcích. Změnu vzájemné polohy svazku a sondy zajišťují vychylováním svazku magnetickým polem. Vycházím přitom z předpokladu, že vzhledem k malým vychylovacím úhlům to profil významně neovlivní. Díky rychlosti vychylovacího systému je možné provést vzorkování velice rychle a tím snížit množství energie, která se přemění v teplo v detektoru.

Signál z detektoru, který prošel celým řetězcem zpracování, má často nesprávnou stejnosměrnou složku a obsahuje šum. Stejnosměrná složka se dá zjistit podle okrajové části profilu. Pro odstranění šumu pozadí se mi osvědčilo prahování. Střed svazku stanovuji výpočtem těžiště rovinného útvaru, průměr svazku podle kritéria $d_{4\sigma}$ [15]. Příklad nalezené obálky svazku, tj. hranice, za kterou se vyskytuje jen malá část elektronů, je na obrázku 6.14a.

6.2 PODÉLNÝ PROFIL

Podélný profil svazku se získá obdobně jako příčný profil, přičemž se sonda a svazek vzájemně pohybují v rovině rovnoběžné s osou svazku. Příčný pohyb lze nahradit vychylováním svazku stejně jako u příčného profilu. Pro podélný pohyb to není možné, avšak do jisté míry se dá ke stejnému účelu využít změna roviny zaostření. Takto získaný profil má osu z nahrazenou osou proudů ostřicí čočky I_F . V případě, že je proudová osa na závadu, můžeme takový profil transformovat (viz odstavec 6.3). Při měření podélného profilu je možné použít bodovou nebo šterbinovou



Obrázek 15: Aproximace podélné obálky svazku podle vztahu (2).

sondu. V druhém případě získáme integrální profil. Hledání obálky je podobné určování okraje svazku v příčném profilu. Ilustrativní příklad profilu s vyznačenou obálkou $d_{4\sigma}$ je na obr. 6.14b.

Pro aproximaci obálky zaostřeného svazku je možno použít vztah vycházející z [14]:

$$r_a(z) = \sqrt{r_0^2 + \theta^2(z - z_0)^2}, \quad (2)$$

kde r_0 je poloměr svazku v nejužším místě (pase), z_0 je poloha tohoto místa, θ je divergence (poloviční úhel) svazku (viz obr. 15) [28, str. 31]. Součin divergence svazku θ a nejmenšího poloměru svazku r_0 se označuje zkratkou BPP z anglického „Beam Parameters Product“. BPP charakterizuje kvalitu svazku a to, jak může být zaostřen do malého bodu.

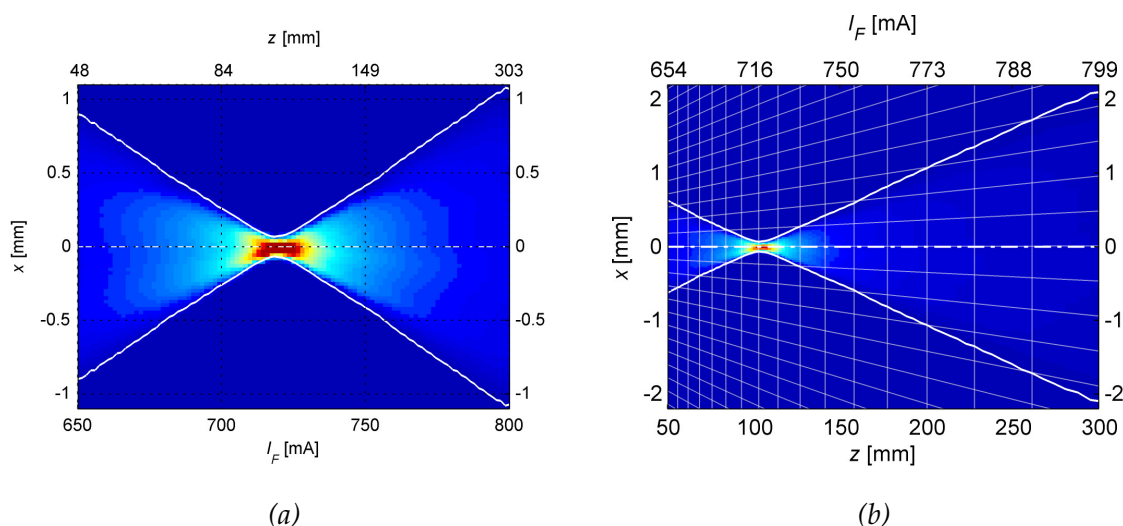
6.3 TRANSFORMACE PROFILŮ MĚŘENÝCH PŘEOSTŘENÍM

Měření proudové hustoty svazku v různých místech podél osy z je možno za určitých okolností nahradit změnou roviny zaostření realizované změnou budícího proudu ostřicí čočky I_F . Měření je snazší a rychlejší, což se uplatní zejména při snímání podélných profilů. Pro transformaci byly odvozeny následující vztahy:

$$\frac{1}{z_{o_i}} = \frac{1}{f_0} - \frac{1}{f_i} + \frac{1}{z_d}, \quad (3)$$

$$M_i = \frac{z_{o_i}}{z_d}, \quad (4)$$

kde z_{o_i} je vypočtená poloha řezu, M je lineární zvětšení, které se aplikuje na daný řez, f_i, f_0 jsou ohniskové dálky čočky během měření a pro kterou je přepočet proveden a z_d je poloha detektoru vzhledem k čočce. Kromě toho je nutné upravit velikost plošné hustoty výkonu (proudu) faktorem $1/M_i^2$ a lineární hustotu faktorem $1/M_i$. Na obrázku 6.16a je příklad podélného profilu naměřeného s použitím přeostržení čočky. Na spodní vodorovné ose jsou uvedeny použité fokusační proudy a na horní (nelineární) ose je vypočtená poloha z . Na obrázku 6.16b je tentýž profil vykreslen po popsané transformaci.



Obrázek 16: Podélný profil získaný přestřelením čočky a jeho transformace pro $z_D = 105$ mm a $I_F = 720$ mA: (a) – naměřený profil s lineární osou I_F , (b) – přepočtený profil s lineární osou z . Mřížka naznačuje provedenou transformaci.

6.4 MĚŘENÍ PROUDOVÉ A VÝKONOVÉ HUSTOTY

Pro vyhodnocení lokální proudové hustoty svazku je nutné vybavit sondu vhodně tvarovanou clonou, která vymezení malou část svazku vstupující do vnitřní části sondy. Tvar clony se volí podle požadovaného typu měření. Pro měření plošné proudové hustoty se používá clona s kruhovým nebo čtvercovým otvorem. Rozměry clony se volí s ohledem na očekávané rozměry měřeného svazku a požadované rozlišení měření. Lokální proudová hustota svazku J je rovna $I_D/\eta_D S_A$, kde I_D je proud sondy, η_D je účinnost detekce a S_A je plocha clony.

Při použití štěrbinové clony poskytuje měření informaci pouze o rozložení proudu ve směru kolmém k hraně štěrbin. Signál je úměrný lineární hustotě $K = I_D/\eta_D d_A$, kde d_A je šířka štěrbin. Clona se realizuje nejčastěji pomocí dvou desek či břitů, mezi kterými se ponechá mezera. Za předpokladu rotačně souměrného svazku se známým rozložením lze z rozložení lineární proudové hustoty spočítat rozložení plošné hustoty.

Vzhledem ke skutečnosti, že měřící clona detektoru nemůže mít libovolně malé rozměry, je rozlišení naměřených profilů též limitované. Při zvyšování hustoty snímaných bodů dojde od určité hranice k překrývání měřených oblastí a k „rozmazání“ profilu. Při vyhodnocování rozměrů svazku z takto zkrácených profilů bude výsledek zatížen chybou. Odhad chyby měření jsem provedl numericky pro různé poměry průměru svazku a velikosti clony. Bude-li například průměr svazku d_S a clony d_A shodný, bude vyhodnocený průměr svazku o 53 % větší. Pro desetkrát menší clonu ($d_S/d_A = 10$) již bude chyba menší než 0,7 %. Rovněž vyhodnocení proudové hustoty je zatíženo

Tabulka 1: Teplo potřebné k dosažení teploty tavení povrchu a rychlost svazku. Černě jsou uvedeny měrná tepla, červeně odpovídající rychlost pohybu svazku. Vypočteno pro 50 keV, tloušťku 1 mm, počáteční teplotu 25 °C a výkon svazku 1 kW s konstantní intenzitou.

Materiál	Plošná hustota výkonu Q_s							
	10^3 W mm^{-2}		10^4 W mm^{-2}		10^5 W mm^{-2}		10^6 W mm^{-2}	
	Tepelná dávka W_s a minimální rychlost svazku v_T							
	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹
Wolfram	3989	0,28	507	7	60	188	26,2	1361
Molybden	2155	0,52	245	15	48,3	234	35,5	1006
Tantal	1170	0,96	124	29	28,8	392	22,6	1579
Niob	719,8	1,6	86,4	41	37,8	298	34,4	1039
Měď	1340	0,84	158	23	30,5	370	22,2	1611
Hliník	230,1	4,9	43,6	82	31,1	363	30	1189
Nerez	130,9	8,6	43,9	81	38	297	37,5	952

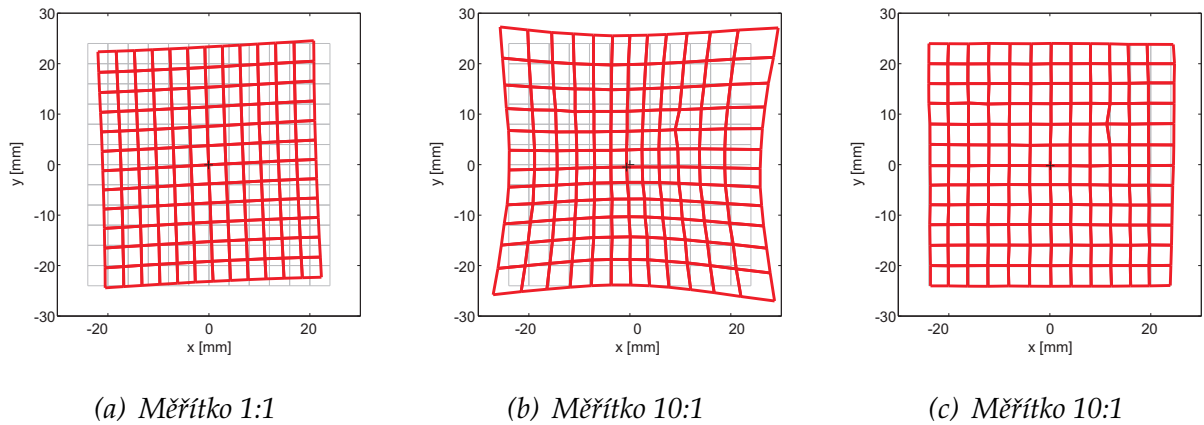
chybou. Například pro $d_s = d_A$, bude chyba asi 57 %. Měření s přesností okolo jednoho procenta získáme s clonou desetkrát menší než je průměr svazku. Sběrovou účinnost sondy η_D je možno ovlivnit tvarem kolektoru, velikostí vstupního otvoru vnitřního kolektoru, profilem otvorů, kterými prochází svazek do kolektoru a přidavným elektrickým polem.

6.5 TEPELNÉ ZATÍŽENÍ CLONY

Při volbě materiálu vstupní clony detektoru se snažíme zabránit poškození clony překročením teploty tavení daného materiálu. Rychlost ohřevu při dané hustotě výkonu svazku závisí na tepelné kapacitě, tepelné vodivosti a hustotě materiálu clony. Při měření profilu intenzivního svazku potřebujeme vědět, jaká minimální rychlost vychylování svazku zamezí poškození clony. Minimální rychlost, kterou musí svazek dosáhnout, bude záviset na schopnosti daného materiálu absorbovat a rozvádět dodávané teplo. Vypočtené hodnoty minimální rychlosti pro svazek o výkonu 1 kW s různou plošnou hustotou jsou uvedeny červeně v tabulce 1. Rychlosti pro hustoty do 10^4 W mm^{-2} včetně jsou relativně nízké a snadno dosažitelné (pod 100 m s^{-1}). Pro vyšší výkonové hustoty jsou již v řádech stovek až tisíců metrů za sekundu. Taková rychlost se již blíží horní hranici možností magnetického vychylovacího systému.

7 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky vybraných experimentů. Měření jsem realizoval na experimentálním zařízení MEBW-60/2-E. Ří-



Obrázek 17: Zkreslení vychylovacího pole: (a) – naměřená síť kontrolních bodů v oblasti 48×48 mm (střední zbytková chyba 1,95 mm), (b) – síť korigovaná polynomem 1. řádu (chyba 0,16 mm), (c) – síť korigovaná polynomem 3. řádu (chyba 0,022 mm). Odchylky poloh jednotlivých uzlů sítě jsou zvětšeny v uvedeném měřítku.

zení experimentů bylo zautomatizováno s pomocí skriptů vytvořených v prostředí MatLab, ve kterém bylo provedeno i následné vyhodnocení.

7.1 ZKRESLENÍ VYCHYLOVACÍHO SYSTÉMU

Reálný vychylovací systém vykazuje vždy určité geometrické zkreslení. Cílem tohoto experimentu je zkreslení objektivně posoudit a nalézt koeficienty korekční funkce, která pomůže minimalizovat chyby nastavení polohy svazku. Měření proběhlo hledáním polohy svazku pomocí REM režimu. Na přesném x-y stolku poháněném krokovými motory byla umístěna Faradayova sonda s clonou z měděné fólie tloušťky 0,05 mm s kruhovým otvorem o průměru asi 0,2 mm. Detektor byl mechanicky přemísťován manipulátorem do jednotlivých bodů pravidelné pravoúhlé sítě.

Naměřená data jsem použil k nalezení koeficientů korekční funkce (1). Pro srovnání jsem fitování provedl pro členy nultého, prvního a třetího řádu. Polynom nultého řádu odstranil pouze posun počátku (viz obr. 7.17a). Polynom prvního řádu korigoval natočení, špatnou ortogonalitu a poměr stran, nekorigované zůstávaly vady nelineárního charakteru (obr. 7.17b). K odstranění těchto vad byl úspěšně použit polynom třetího řádu, jak je vidět na obrázku 7.17c. Nalezené koeficienty korekční funkce jsou uvedeny

Tabulka 2: Koeficienty přenosové funkce získané měřením pro polynom třetího řádu.

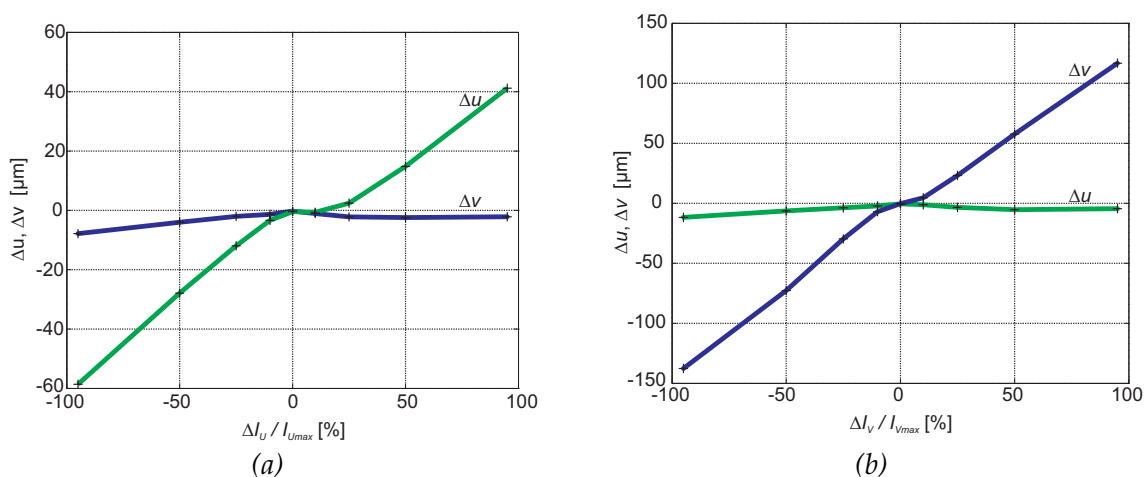
	a_0	a_x	a_y	a_{x^2}	a_{xy}	a_{y^2}	a_{x^3}	a_{x^2y}	a_{xy^2}	a_{y^3}
	–	–	–	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
U:	–1,30	1,15	0,04	–0,22	0,07	–0,09	–45,67	–4,10	–21,53	–2,47
V:	0,35	–0,05	1,05	0,08	–0,06	–0,20	1,65	–15,78	3,11	–35,94

v tabulce 2. Polynom prvního stupně snížil odchylku asi dvanáctkrát a polynom třetího stupně asi 88krát.

7.2 REMANENTNÍ MAGNETISMUS VYCHYLOVÁNÍ

V tomto měření jsem se soustředil na měření zbytkového magnetismu (remanence), tedy indukce magnetického pole po snížení intenzity budícího pole na nulu. Výsledky mají sloužit především k získání představy o vlivu remanence na přesnost a reprodukovatelnost polohování elektronového svazku.

Při měření jsem zjišťoval změnu polohy svazku při nulových (resp. velmi malých) proudech deflektorů po přebuzení deflektoru. Polohu jsem určoval pomocí REM režimu s malým zorným polem. Vychylovací systém jsem před každým měřením demagnetizoval pomocí budících proudů s tlumeným harmonickým průběhem. Poté jsem zaměřil přesnou polohu svazku v nevychýleném stavu. Po krátkém vybuzení vybraného deflektoru do zvolené úrovně jsem polohu změřil podruhé a z rozdílu určil posunutí.

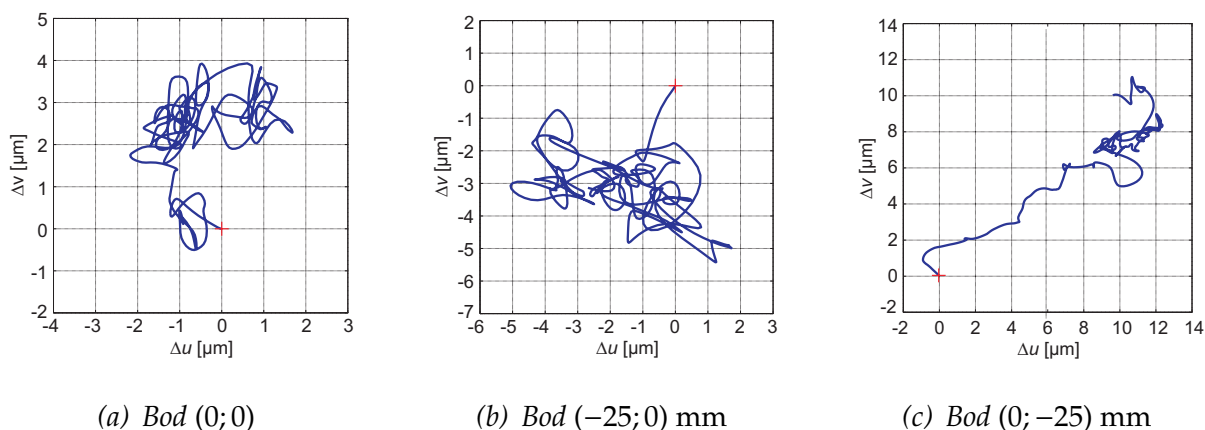


Obrázek 18: Posun svazku vlivem remanence magnetického obvodu vychylovacího systému pro přebuzení ve směru (a) U a (b) V. Měření při energii svazku 50 keV v pracovní vzdálenosti 170 mm.

V grafech 18 jsou vyneseny naměřené posuny svazku pro U a V deflektor. Rozdíl maximálních úchylek je asi 100 μm a 260 μm pro U a V deflektor.

7.3 DLOUHODOBÁ STABILITA VYCHYLOVACÍHO SYSTÉMU

Stabilitu vychylovacího systému potřebujeme znát pro aplikace jako je mikrosvařování či mikroobrábění, kde přesné polohování svazku hraje důležitou roli. Měření jsem realizoval opakovanou lokalizací detektoru v pevné poloze pomocí REM režimu (viz část 5.2).



Obrázek 19: Fluktuace vychylování ve třech bodech vychylovacího pole. Pracovní vzdálenost 105 mm, energie svazku 50 keV, celková doba měření 20 minut, filtrováno dolní propustí 0,2 Hz.

Tři provedená měření byla zpracována do grafů 19. Ze srovnání výsledků vyplývá, že mezi U a V směrem není větší rozdíl. Na základě měření můžeme prohlásit, že dvacetiminutová stabilita výchylky (po ustálení po zapnutí) je lepší než $\pm 1,5 \mu\text{m}$. Při vyšším urychlovacím napětí (a tedy nižší citlivosti vychylování) či menší pracovní vzdálenosti bude stabilita vyšší, a naopak.

7.4 ROZLOŽENÍ VÝKONOVÉ HUSTOTY VE SVAZKU

V tomto měření jsem se zaměřil na rozložení výkonové hustoty ve svazku charakterizované sérií příčných profilů. Změnu roviny řezu svazku jsem dosáhl přeostrhováním čočky. Měření umožňuje posoudit příčné rozměry svazku, určit maximální výkonovou hustotu a hloubku ostrosti. Protože experiment měl především ověřit funkčnost metody, měřil jsem jen pro jeden vybraný proud svazku (5,0 mA).

Nejvyšší výkonové hustoty ($7 \cdot 10^3 \text{ W mm}^{-2}$) byla dosažena pro proud čočky $I_F = 757 \text{ mA}$. Hodnota však není příliš spolehlivá vzhledem k rozměrům svazku srovnatelným s otvorem clony (chyba asi 49 %). Na obrázku 20 je 3D vizualizace svazku sestavená z vybraných profilů podél proudové osy I_F .

7.5 SROVNÁNÍ PROFILU MĚŘENÉHO SE STACIONÁRNÍM A POHYBLIVÝM DETEKTOREM

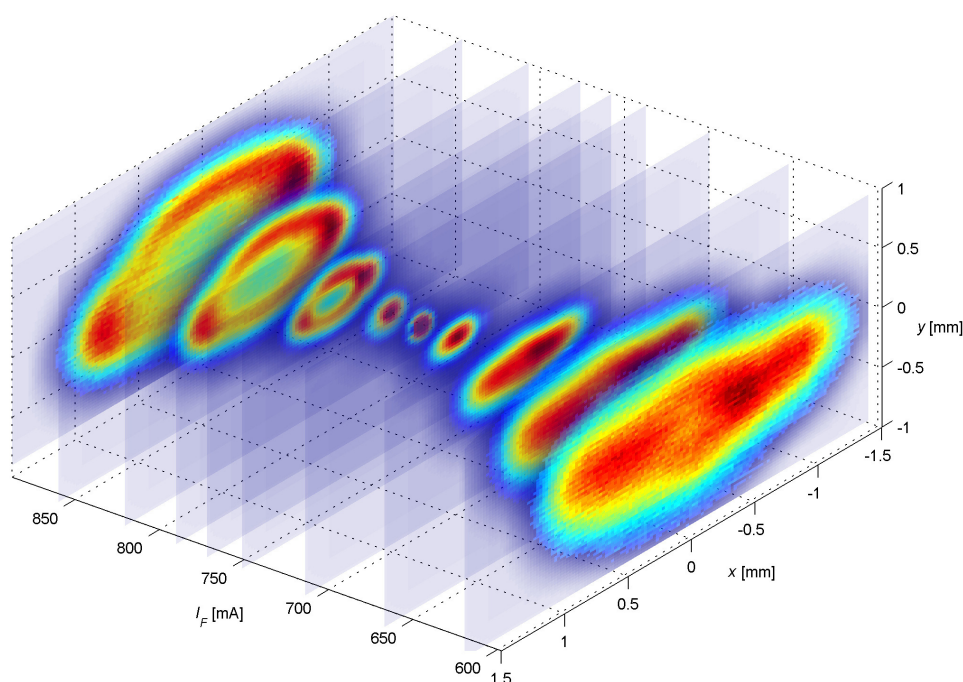
Cílem experimentu bylo ověření možnosti transformace profilů naměřených v jedné rovině pro různé vybuzení ostřicí čočky do příslušných rovin podél optické osy. Měření jsem provedl s detektorem se šterbinovou clonou namontovanou na manipulátoru, který umožňuje posuv ve směru osy z . Za shodných podmínek jsem naměřil dva podélné profily s pomocí šterbinové

Tabulka 3: Srovnání parametrů svazku určených z profilů získaných se stacionárním a pohyblivým detektorem.

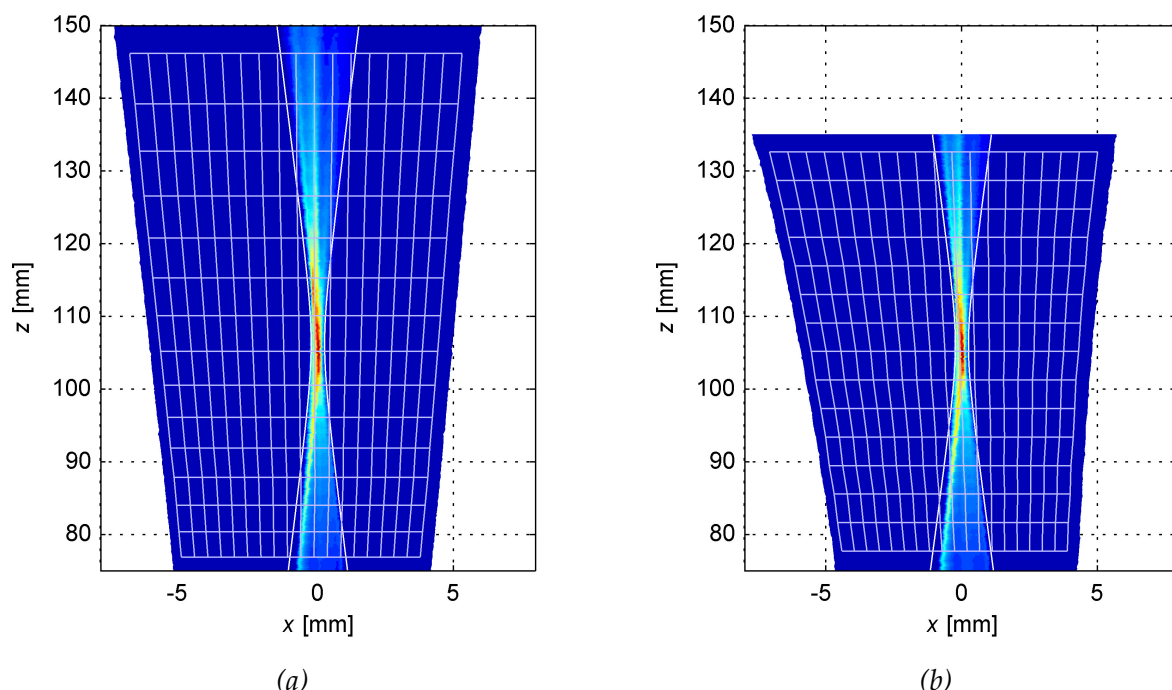
Profil	Poloha pasu z_0 mm	Poloměr pasu r_0 mm	Divergence θ mrad	BPP mm mrad
Stacionární detektor	106,3	0,243	33,9	8,26
Pohyblivý detektor	106,1	0,239	36,4	8,70
Rel. rozdíl	0,17 %	1,95 %	6,8 %	5,0 %

clony. V prvním případě byl detektor nehybný v poloze $z_D = 105$ mm a měnil se proud ostřicí čočky. V druhém případě byl proud čočky $I_F = 715$ mA a detektor se pomocí manipulátoru posunoval.

Přepočet podélného profilu měřeného se stacionárním detektorem jsem provedl podle vztahů (3) a (4). Při srovnání obrázků 7.21a a 7.21b je vidět velmi dobrá shoda získaných profilů. Objektivní porovnání podle charakteristických parametrů svazku vypočtených z obou profilů je v tabulce 3. Rozdíl v hodnotách divergence (6,8 %) a BPP (5 %) považuji za vyhovující pro praxi.



Obrázek 20: Příčné řezy svazkem na ose fokusačního proudu. Měřeno při energii 50 keV, proudu svazku 5,0 mA, žhavicím proudu 3,42 A v pracovní vzdálenosti 105 mm. Poznámka: barevná škála odpovídá výkonové hustotě svazku a je upravena individuálně pro každý řez.

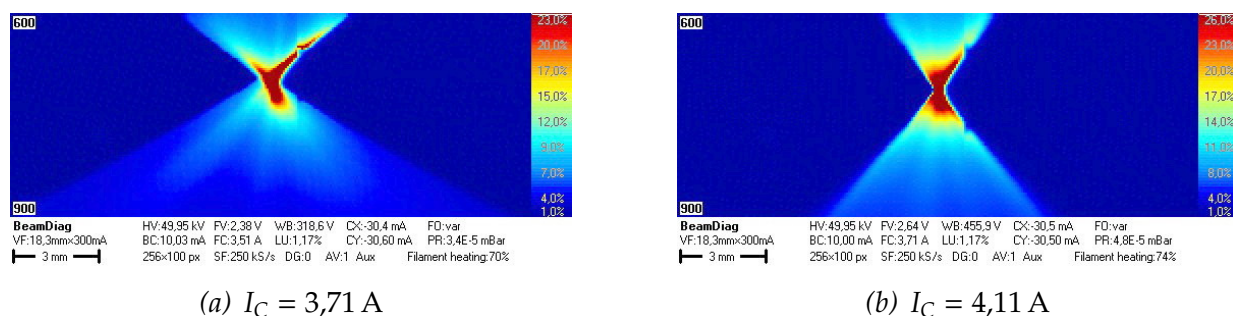


Obrázek 21: Profily změřené přestřelením čočky s detektorem (a) v poloze $z_D = 105$ mm a (b) pomocí pohyblivého detektoru pro fixní proud čočky $I_F = 715$ mA. Proud svazku byl 10 mA a energie 50 keV.

7.6 URČENÍ OPTIMÁLNÍHO ŽHAVÍCÍHO PROUDU KATODY

Při tomto experimentu jsem hledal vhodné kritérium pro nalezení optimálního provozu katody. Vlastnosti termoemisního elektronového zdroje se zlepšují s jeho teplotou, ovšem za cenu zkrácení životnosti. Proto se v praxi vždy hledá určitý kompromis. Důležitá je závislost na proudu svazku, protože pro menší emisní proudy bude vhodné jiné nastavení než pro proudy vysoké. Vlastnosti zdroje elektronů je možno dobře posoudit pomocí BPP odečteného z podélného profilu (viz příklady na obr. 22).

Závislost BPP na žhavicím proudu katody I_C a proudu svazku I_B je v grafu 23. Získané závislosti odpovídají předpokladu, že se zvyšováním



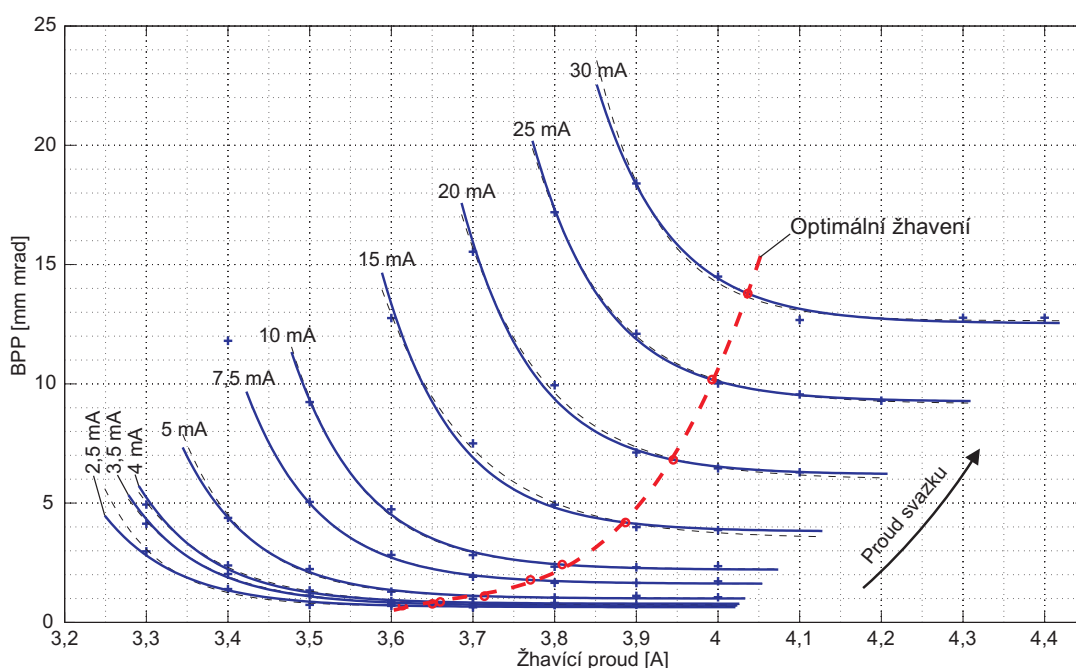
Obrázek 22: Příklad dvou profilů svazku pro stanovení optimálního žhavení katody pro různé žhavicí proudy katody. Proud svazku 10 mA, šířka zorného pole 18,3 mm.

žhavicího proudu (a tedy i teploty katody) dochází ke zlepšování vlastností zdroje až po určitou hranici. Po jejímž překročení již kvalita dále neroste a pouze se zkracuje životnost vlákna. Současně je ze sítě křivek vidět, že pro vyšší proudy svazku je nutný vyšší žhavicí proud, nicméně kvalita svazku i tak klesá. Optimální žhavicí proud je v grafu 23 vyznačen červeně.

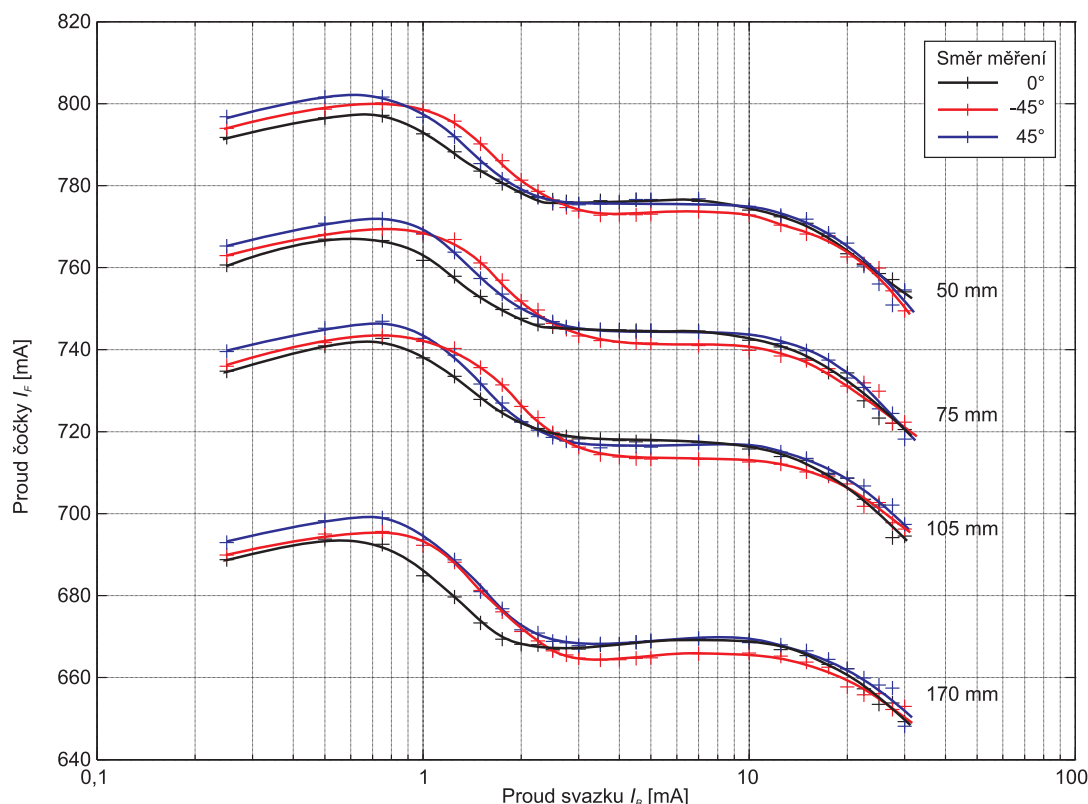
7.7 FOKUSAČNÍ KŘIVKY

Hledání správného zaostření elektronového svazku je jeden z nejčastějších úkolů, před kterými stojí obsluha zařízení. Situaci komplikuje závislost na řadě faktorů. Ostření je především nutno korigovat při změně pracovní vzdálenosti a/nebo urychlovacího napětí. Kromě toho byla empiricky vy sledována závislost na velikosti proudu svazku, která souvisí se změnou polohy virtuálního zdroje elektronů při změně potenciálu řídicí elektrody – Wehneltova válce. Experiment se zabývá nalezením závislosti optimálního fokusačního proudu na pracovní vzdálenosti a proudu svazku.

Z výsledků měření jsem určil optimální ostřicí proud (*viz* 24), velikost konstanty magnetické čočky $k_F = 51,1 \pm 1,9 \text{ mm A}^2$ a změny polohy virtuálního zdroje.



Obrázek 23: Závislost BPP na žhavicím proudu katody I_C a proudu svazku I_B pro novou katodu. Křivka optimálního žhavení (červeně) určena pro 10% zvýšení BPP.



Obrázek 24: Závislosti proudu čocky na proudu svazku a pracovní vzdálenosti pro zaostření do vzdálenosti uvedené v grafu. Měřeno při 50 keV.

8 ZÁVĚR

V předložené práci jsem se soustředil na dvě významná témata z oblasti řízení a diagnostiky technologických zařízení s elektronovým svazkem: na analýzu vlastností magnetického jednostupňového vychylovacího systému a na měření rozložení výkonové hustoty v příčných a podélných řezech svazku.

Ve 4. kapitole jsem se věnoval především popisu elektronové svářečky MEBW-60/2, která byla navržena a vyrobena během mého doktorského studia. Během řešení projektu jsem zastával funkci koordinátora a konstruktéra elektroniky a softwaru. Elektronová svářečka MEBW-60/2, jejíž sériovou výrobu nyní zajišťuje licenční výrobce – německá firma Focus GmbH, byla prezentována na řadě mezinárodních výstav.

V 5. kapitole jsem zavedl model vychylovacího systému a odvodil jsem jeho matematický popis. Navrhl jsem tři metody vyhodnocení polohy svazku. Pro určení geometrického zkreslení vychylování jsem navrhl postup srovnávající požadované a skutečné výchylky svazku. Podle výsledků jsou stanoveny koeficienty navržené korekční funkce, která umožní zmenšit zkreslení. Popsal jsem mechanismus vlivu magnetické hystereze deflektorů

a uvedl jsem možné příčiny snížené časové stability výchylky. Uvedl jsem základní popis dynamického chování: vztahy pro maximální rychlost vychylování danou vlastnostmi budicího zdroje a nežádoucími jevy, jako indukce vířivých proudů v blízkosti deflektorů a parazitní kapacity obvodu vychylovacích cívek.

V 6. kapitole jsem rozebral problematiku měření profilů svazku. U příčných profilů jsem popsal stanovení středu svazku, jeho rozměrů a tvaru obálky. Pro podélný profil jsem vytvořil postup pro určení osy a obálky svazku a pro získání charakteristických parametrů svazku: rozměru a polohy místa nejmenšího průměru svazku (pasu), divergence svazku a parametru BPP (Beam Parameters Product). Odvodil jsem vztahy pro transformaci profilů měřených s využitím přestření čočky. Popsal jsem úpravu signálu detektoru a vztahy pro výpočet plošné a lineární proudové hustoty svazku i s odhadem systematických chyby měření. V další části jsem se věnoval sběrové účinnosti sondy, elektronickému zpracování signálu a výpočtům tepelného zatížení detektoru.

Kapitola 7 přinesla soubor výsledků měření vlastností elektronové trysky. Ve zkrácené verzi jsou uvedeny jen vybrané experimenty. Výsledky jsou rozděleny do tří skupin. V první skupině jsou měření vlastností vychylovacího systému. Stanovení geometrického zkreslení umožnilo sestavit korekční vztah, který zvýšil přesnost polohování svazku o téměř dva řády. Měření hystereze magnetického obvodu ukázalo, že při nevhodném provozu vychylovacího systému mohou vzniknout chyby polohování až 260 μm . Měření dlouhodobé stability vychylovacího systému prokázalo, že fluktuace svazku se pohybují pod hodnotou 1,5 μm během 20minutového intervalu. Určení polohy pivotního bodu, které se uplatní například pro korekci změn zvětšení optické soustavy při změně pracovní vzdálenosti, je uvedeno v nezkrácené verzi. Způsoby určení krátkodobé stability, mezní rychlosti přeběhu svazku a doby ustálení svazku v cílové poloze jsou naznačeny v teoretické části. Výsledky měření vlastností vychylovacího systému byly prezentovány na konferenci Electron Beam Technologies EBT'2009 [37]. Jsou z části přímo aplikovatelné (korekce zkreslení) nebo mohou být podkladem pro další vývoj zařízení, například pro zvýšení stability budicích zdrojů, vytvoření modelu hystereze vychylovacího systému nebo zlepšení dynamiky vychylovacího systému.

Druhá skupina výsledků uvádí elektrické vlastnosti triodové elektronové trysky s termoemisní přímo žhavenou katodou. Získané přenosové charakteristiky zachycují závislost emisního proudu na energii elektronů, žhavicím proudu katody a poloze vlákna katody. Voltampérové charakteristiky katody pohlíží na žhavené vlákno jako na nelineární odpor. Tyto

výsledky (*viz* nezkrácená verze) naleznou využití například při návrhu žhavicího zdroje s pokročilým řízením, vedoucí k prodloužení životnosti vlákna a k predikci jeho přerušení [13].

Třetí skupina výsledků se týká měření vlastností generovaného svazku, přičemž jednotícím prvkem je využití měření rozložení výkonové hustoty v řezu svazku. Trojice měření sérií příčných profilů svazku demonstruje změny profilu podél optické osy svazku a vliv žhavení katody a předpětí Wehneltu. Ze sérií podélných profilů svazku je odvozena změna kvality svazku (posuzovaná pomocí údaje Beam Parameters Product – BPP) v závislosti na žhavicím proudu a poloze katody. Byla vysledována závislost kvality svazku na provozním stáří katody. Určení fokusačních křivek je praktická pomůcka ke správné volbě buzení čočky pro danou pracovní vzdálenost s ohledem na proud svazku. Získané fokusační křivky jsou praktickou pomůckou pro obsluhu zařízení a umožňují případné zavedení automatických korekcí.

Výsledky umožňují reprodukovatelné seřízení elektronové trysky a zjednodušují volbu procesních parametrů. Jsou však úzce spjaty s konkrétním zařízením a nejsou dosud zpracovány do podoby využitelné v běžné praxi. Hlavním cílem provedených měření byla demonstrace popisovaných měřících metod. Mohou se stát podkladem k obecnějšímu studiu chování elektronově-optických zařízení podobného typu.

LITERATURA

- [1] ARCAM AB. *Electron Beam Melting–RAPID MANUFACTURING IN METAL* [online]. [cit. 26. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/>.
- [2] BRAVERMAN, V. – BELOZERCEV, V. – BASHENKO, V. Device for Automatic Seam Control. In [27], s. 100–103.
- [3] DILTHEY, U. – DORFMÜLLER, T. Micro electron beam welding. *Microsystem Technologies*, 2006, 12, s. 626–631. ISSN 1432-1858.
- [4] DILTHEY, U. – GOUMENIOUK, A. – BÖHM, S. – WELTERS, T. Electron beam diagnostics: A new release of the diabeam system. *Vacuum*, 2001, vol. 62, no. 2–3, s. 77–85. ISSN 0042-207X.
- [5] DUPÁK, J. – VLČEK, I. – ZOBAČ, M. Electron gun for computer-controlled welding of small components. *Vacuum*, 2001, vol. 62, no. 2–3, s. 159–164. ISSN 0042-207X.
- [6] DUPÁK, L. – DUPÁK, J. Planar Heating Element Adjusted by Electron Beam Micromachining. In [27], s. 82–84.
- [7] DUPÁK, L. – ZOBAČ, M. – DUPÁK, J. – VLČEK, I. Experimental Device for Electron Beam Micromachining. In [26], s. 272–275.
- [8] DVS. *Klein, präzise und sparsam — neues Elektronenstrahlschweißgerät auf dem Markt*. DVS, Düsseldorf, 2008.
- [9] FATH, J. – LÖWER, T. Industrial Applications of Backscattered Electrons in Modern EB-Welding Machines. In [26], s. 66–69.
- [10] FOCUS GmbH. *Micro Electron Beam Welder MEBW-60/2* [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.focus-e-welding.de/>.
- [11] GOLDMAN, A. *Modern Ferrite Technology*. New York : Springer, 2nd edition, 2006. ISBN 978-0-387-28151-3.
- [12] HAWKES, P. W. – KASPER, E. *Principles of Electron Optics*. Volume 1 – Basic Geometrical Optics. London : Academic Press, 1989. ISBN 0-12-333351-2.
- [13] 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.
- [14] HUMPHRIES, S. Jr. *Charged Particle Beams*. New York : John Wiley and Sons., Inc., 1990. ISBN 0-471-60014-8.
- [15] ISO 11146-1:2005(E). *Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios — Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams*. 2005.
- [16] JÁNSKÝ, P. et al. Numerical Simulations of the Thermionic Electron Gun for Electron-Beam Welding and Micromachining. *Vacuum*, 2009, 84, s. 357–362. ISSN 0042-207X.
- [17] KOLEVA, E. – MENHARD, C. – LOEWER, T. – MLADENOV, G. Emittance Calculation Based on the Current Distribution Measurements at Changes of the Beam Focusing. In [26], s. 51–65.
- [18] LENC, M. – LENCOVÁ, B. Analytical and numerical computation of multipole components of magnetic deflector. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, s. 4409–4414. ISSN 0034-6748.
- [19] LENCOVÁ, B. On the design of electron beam deflection systems. *Optik*, 1988, vol. 79, no. 1, s. 1–12.

- [20] LÖWER, T. Analysis, visualization and accurate description of an electron beam for high repeatability of industrial production processes. In [25], s. 45–50.
- [21] MATHWORKS™. *MatLab – The Language Of Technical Computing* [online]. [cit. 16. 2. 2009]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [22] MELEKA, A. H. *Electron-beam Welding: Principles and Practice*. London : McGRAW-HILL, 1971. ISBN 07-094218-8.
- [23] MENHARD, C. G. Fast measurements of important electron beam parameters by variation of beam focusing. In [26], s. 11–12.
- [24] MICROSOFT. *Dynamic Data Exchange* [online]. [cit. 13. 7. 2009]. Dostupné z: [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms648711\(VS.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms648711(VS.85).aspx).
- [25] MLADENOV, G. (Ed.). *Proceedings of the 7th International Conference on Electron Beam Technologies*, Varna, 2003. Bulgarian Academy of Sciencies.
- [26] MLADENOV, G. (Ed.). *Proceedings of the 8th International Conference on Electron Beam Technologies*, Varna, 2006. Bulgarian Academy of Sciencies.
- [27] MLADENOV, G. (Ed.). *Proceedings of the 9th International Conference on Electron Beam Technologies*, Varna, 2009. Bulgarian Academy of Sciencies.
- [28] PASCHOTTA, R. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Berlin : Wiley-VCH, 2008. ISBN 978-3-527-40828-3.
- [29] PRO-BEAM. [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.pro-beam.de/>.
- [30] SCHULTZ, H. *Electron Beam Welding*. Cambridge : Abington Publishing, 1994.
- [31] STEIGERWALD STRAHLTECHNIK. [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.steigerwald-eb.de/en/>.
- [32] VISSER, A. *Werkstoffabtrag durch Elektronen–und Photonenstrahlen*. Bern : Technishe Runhschau, 1972.
- [33] VLČEK, I. – ZOBAČ, M. Křížový stolek do stolní elektronové svářečky. *Jemná mechanika a optika*, 2006, roč. 51, č. 7–8, s. 214–216. ISSN 0447-6441.
- [34] VLČEK, I. et al. Prototyp stolní elektronové svářečky MEBW–60/2. *Jemná mechanika a optika*, 2008, roč. 53, č. 1, s. 27–29. ISSN 0447-6441.
- [35] ZENKER, R. – BUCHWALDER, A. – THIEMER, S. – BACKOFEN, J. Electron Beam Surface Countouring. In [26], s. 78–84.
- [36] ZOBAČ, M. Marking of Welded Pieces Using Continuous or Pulsed Electron Beam. In [25], s. 191–197.
- [37] ZOBAČ, M. Analysis of a high speed electron beam deflection system. In [27], s. 59–63.
- [38] ZOBAČ, M. *Zobrazování svarů v elektronové svářečce*. Diplomová práce, Fakulta elektrotechniky a informatiky VUT v Brně, Ústav radioelektroniky, Brno, 1998.
- [39] ZOBAČ, M. Rozvoj aparatury pro mikroobrábění elektronovým svazkem. In MÜLLEROVÁ, I. (Ed.) *PDS 2004*, s. 65–70, Brno, 2004. ÚPT AV ČR. ISBN 80-239-4561-0.

ŽIVOTOPIS

Osobní informace

Jméno	Ing. Martin Zobač
Bydliště	Rozdrojovice 38e, 664 34, p. Kuřim
Email	zobac@isibrno.cz
Datum a místo narození	6. února 1975 v Brně
Národnost:	česká

Pracovní zkušenosti

Období 1998 – dosud	Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i v Brně
Dosažená pozice	vývojový pracovník
Hlavní pracovní náplň	vývoj elektroniky pro elektronově-optická zařízení, technologie elektronového svazku, vývoj a realizace zdrojů vysokého napětí

Vzdělání

Období	1989 – 1993
Název vzdělávací instituce	Střední průmyslová škola elektrotechnická v Brně
Druh studia	středoškolské s maturitou
Období	1993 – 1998
Název vzdělávací instituce	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Obor Elektronika a sdělovací technika
Druh studia	vysokoškolské magisterské
Získaný titul	Ing.
Období	2002 – dosud
Název vzdělávací instituce	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, Ústav fyzikálního inženýrství
Druh studia	doktorské

Osobní schopnosti a dovednosti

Mateřský jazyk	čeština
Ostatní jazyky	angličtina, čtení: výborně, psaní: dobře, mluvený projev: dobře
Počítačové dovednosti	Programování v Delphi, C, C++ pro OS Windows, HTTP, JavaScript, CSS, AutoCad, MatLab, LaTeX, MS Office
Klíčové vědecké výsledky:	vývoj a realizace zdroje vysokého napětí pro elektronové svařování (60kV/2kW); vývoj a realizace prototypu elektronové svářečky MEBW-60/2
Počet publikací	v impaktovaných časopisech: 3, v neimpaktovaných časopisech: 5, konferenční příspěvky: 6, ostatní: 5
Ocenění	1998 – ocenění nejlepších diplomových prací udělované na VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a informatiky, za práci Zobrazení svarů v elektronové svářečce

SUMMARY

The thesis deals with problems of control and diagnostics of electron beam technological devices which use electron beam for localised intensive heating of a material. A brief description of the electron beam welder MEBW-60/2 is included; the author has participated on its development and implementation. Main topics are the analysis of deflection system properties and the measurement of current distribution of the beam (so-called beam profiles). Geometrical aberrations, hysteresis, stability and dynamics of a single-stage magnetic x-y deflection system are described. Suitable measurement procedures and correction methods are introduced. Methods of transverse and longitudinal beam profile acquisition is presented using successive sampling of the local current density of the beam by a modified Faraday cup. The data processing and evaluation of characteristic beam parameters are shown. The presented methods were verified by fourteen experiments using the electron beam welder. The methods have proven to be useful in practical evaluation of the device properties.

Tato stránka zůstává prázdná.

