

# Vliv parametrů elektronového svazku na geometrii svaru

Bc. Filip Čáp

---

Diplomová práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Filip Čáp
Osobní číslo:	T22656
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv parametrů elektronového svazku na geometrii svaru

## Zásady pro vypracování

- Vytvořit literární studii k tématu práce.
- Osvojit si technologii svařování elektronovým svazkem.
- Provést sérii experimentů s různými parametry elektronového svazku na vzorcích z korozivzdorné oceli 1.4301.
- Provést určení geometrie, metalografii svarů a vyhodnocení vlivu parametrů.
- Návrhnout obecný postup optimalizace nastavení svařovacího procesu.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2003, XIV, 461 s. ISBN 0471434027. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/0471434027>  
CHATURVEDI, Mahesh (ed.). *Welding and joining of aerospace materials*. Woodhead publishing, 2020. Dostupné z <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpWJAME003/welding-joining-aerospace/welding-joining-aerospace>  
WĘGŁOWSKI, M. St; BŁACHA, S.; PHILLIPS, A. Electron beam welding—techniques and trends—review. *Vacuum*, 2016, 130: 72-92.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**  
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta



## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá vlivem parametrů elektronového svazku na geometrii svaru. Práce je rozdělena do dvou částí. V teoretické části jsou představeny jednotlivé metody svařování, podrobněji je rozebrána technologie svařování elektronovým svazkem. Dále tato část obsahuje shrnutí aktuálního výzkumu a vývoje v oblasti elektronového svařování. Cílem praktické části práce je stanovení vlivu jednotlivých parametrů elektronového svazku na geometrii svaru a návrh obecného postupu optimalizace nastavení svařovacího procesu.

Klíčová slova: svařování, elektronový svazek, geometrie svaru, austenitická ocel

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the influence of electron beam parameters on weld geometry. The thesis is divided into two parts. In the theoretical part, individual welding methods are introduced, the electron beam welding technology is discussed in detail. Furthermore, this part contains a summary of current research and development in the field of electron beam welding. The aim of the practical part of the thesis is to determine the influence of individual electron beam parameters on the weld geometry and to propose a general procedure for optimizing the welding process setup.

Keywords: welding, electron beam, weld geometry, austenitic steel

Touto cestou bych rád poděkoval doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. a Ing. Liboru Dupákovi, Ph.D. za všechny cenné rady a čas, který věnovali této práci. Dále pak všem členům skupiny Elektronových technologií na ÚPT v Brně a v neposlední řadě také mé rodině a všem blízkým za podporu během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 SVAŘOVÁNÍ</b> .....	<b>13</b>
1.1    OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ .....	14
1.1.1    Svařování obalenou elektrodou.....	14
1.1.2    Svařování pod tavidlem.....	15
1.1.3    Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu .....	15
1.1.4    Svařování netavící se elektrodou v ochranném plynu.....	15
1.1.5    Svařování plazmou.....	16
1.2    ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	17
1.2.1    Bodové a švové svařování.....	17
1.3    PLAMENOVÉ SVAŘOVÁNÍ .....	18
1.4    TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	19
1.4.1    Svařování třením .....	19
1.4.2    Svařování ultrazvukem.....	20
1.5    SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM PAPRSKŮ.....	20
1.5.1    Svařování laserem .....	20
1.6    SVAŘOVACÍ METODY SPECIFICKÉ PRO PLASTY .....	22
1.6.1    Svařování horkým tělesem.....	22
1.6.2    Svařování horkým plynem .....	23
<b>2 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM SVAZKEM</b> .....	<b>24</b>
2.1    HISTORIE ELEKTRONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	24
2.2    PRINCIP ELEKTRONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....	25
2.2.1    Emise elektronů.....	25
2.2.2    Urychlení elektronů.....	26
2.2.3    Fokusace a vychylování .....	26
2.2.4    Dopad paprsku na povrch a interakce s materiálem.....	27
2.3    ZÁKLADNÍ PARAMETRY ELEKTRONOVÉHO SVAZKU A JEJICH VLIV NA GEOMETRII SVARU .....	29
2.4    ZAŘÍZENÍ PRO SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ .....	31
2.4.1    Vakuový systém .....	32
2.4.2    Pracovní komora .....	33
2.5    VYUŽITÍ ELEKTRONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....	34
2.6    VÝHODY A NEVÝHODY .....	36
2.7    DALŠÍ VYUŽITÍ ELEKTRONOVÉHO SVAZKU .....	38
2.7.1    Vrtání elektronovým svazkem .....	38
2.7.2    Povrchové úpravy.....	38



<b>3</b>	<b>AKTUÁLNÍ STAV VÝZKUMU V OBLASTI ELEKTRONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....</b>	<b>40</b>
3.1	SOUČASNÝ VÝZKUM.....	40
3.2	KLÍČOVÁ TÉMATA, PROBLÉMY A TRENDY .....	43
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>ZKOUMANÝ MATERIÁL.....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>PŘÍPRAVA VZORKŮ.....</b>	<b>49</b>
6.1	POLOTOVARY VZORKŮ .....	49
6.2	SVÁŘEČKA MEBW 60/2-E .....	49
6.3	SADY VZORKŮ.....	50
6.3.1	Sada č. 1 .....	50
6.3.2	Sada č. 2 .....	51
6.3.3	Sada č. 3 .....	51
6.3.4	Sada č. 4 .....	51
6.4	POSTUP SVAŘOVÁNÍ VZORKŮ .....	51
<b>7</b>	<b>MĚŘENÍ GEOMETRIE SVARŮ.....</b>	<b>58</b>
7.1	PŘÍPRAVA METALOGRAFICKÉHO VÝBRUSU .....	58
7.2	POUŽITÝ MIKROSKOP A SOFTWARE .....	60
7.3	POSTUP MĚŘENÍ.....	61
<b>8</b>	<b>VÝSLEDKY A JEJICH DISKUSE .....</b>	<b>63</b>
8.1	SADA VZORKŮ Č.1 .....	63
8.1.1	Vliv fokusačního proudu při $I = 2$ mA.....	63
8.1.2	Vliv fokusačního proudu při $I = 5$ mA.....	65
8.1.3	Vliv fokusačního proudu při $I = 10$ mA.....	67
8.1.4	Vliv fokusačního proudu při $I = 15$ mA.....	69
8.1.5	Vliv fokusačního proudu při $I = 20$ mA.....	71
8.1.6	Shrnutí výsledků sady č. 1 .....	75
8.2	SADA VZORKŮ Č. 2 .....	76
8.2.1	Vliv rychlosti svařování při $I = 5$ mA .....	77
8.2.2	Vliv rychlosti svařování při $I = 15$ mA .....	79
8.2.3	Shrnutí výsledků sady č. 2 .....	81
8.3	SADA VZORKŮ Č. 3 .....	81
8.3.1	Vliv fokusačního proudu při $WD = 0$ mm.....	82
8.3.2	Vliv fokusačního proudu při $WD = - 30$ mm .....	83
8.3.3	Vliv fokusačního proudu při $WD = + 30$ mm .....	85
8.3.4	Shrnutí výsledků sady č. 3 .....	87
8.4	SADA VZORKŮ Č. 4 .....	88
8.5	NÁVRH OBECNÉHO POSTUPU OPTIMALIZACE NASTAVENÍ SVAŘOVACÍHO PROCESU.....	92

<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>93</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>98</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>100</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>103</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>104</b>

## ÚVOD

Svařování elektronovým svazkem je nekonvenční metoda spojování součástí v průmyslové výrobě. Technologie disponuje řadou předností. Zároveň se jedná o proces s mnoha stupni volnosti (výkon svazku, urychlovací napětí, rychlost pohybu svazku, zaostření atd.). Volba optimální kombinace parametrů není triviální úkol.

Tato práce se zaměřuje na studium vlivu vybraných parametrů elektronového svazku na geometrii svaru. Cílem práce je analyzovat, jak tyto parametry ovlivňují tvar a rozměry svaru. Porozumění těmto vlivům je zásadní pro optimalizaci procesu svařování.

V úvodu práce jsou nejprve představeny jednotlivé metody svařování. Další část se již blíže věnuje elektronovému svařování. Je zde popsán princip, využití a také přednosti a nedostatky této technologie. Navazující část se zaměřuje na popis a shrnutí aktuálního stavu výzkumu v oblasti svařování elektronovým svazkem. Praktická část práce, jejíž cíl byl již nastíněn výše, se věnuje popisu přípravy a provedení experimentů a jejich vyhodnocení.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 SVAŘOVÁNÍ

Svařování je definované jako vytváření nerozebíratelného spojení dvou homogenních nebo heterogenních materiálů. Kromě svařování lze takové spojení získat pájením a lepením, k nerozebíratelným způsobům spojování se dále řadí nýtování a někdy i lisování. [1]

Postupem času se vyvinula celá řada svařovacích metod. Rozdělit je lze na svařování tlakové a tavné. Při tlakovém svařování je aplikována dostatečně velká vnější síla k vyvolání plastické deformace čelních ploch svařovaných součástí. Proces obvykle probíhá bez přídavného materiálu, svařované plochy součástí jsou často (není to však podmínkou) zahřáty pro usnadnění nebo umožnění vzniku pevného spojení. Oproti tomu tavné svařování probíhá bez působení vnějšího zatížení, ke spojení svařovaných materiálů dochází při jejich roztavení. Může být použit přídavný materiál. [2]

Přehled metod svařování a jejich číselné označení poskytuje norma ČSN EN ISO 4063 [3]. Základní rozdělení svařovacích technik podle této normy zachycuje schéma na obr. 1. Následující kapitola se pak věnuje jejich stručnému popisu.



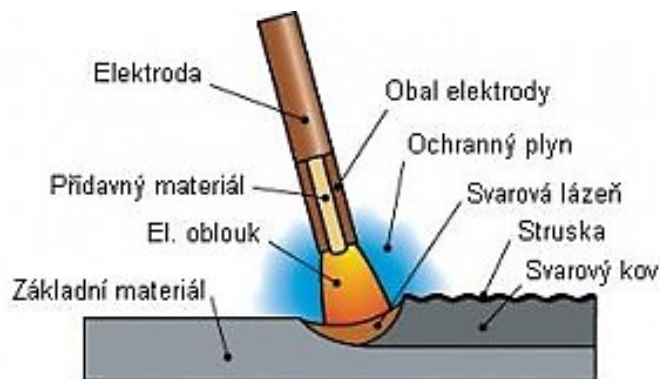
Obr. 1 Rozdělení metod svařování podle ČSN EN ISO 4063 [3]

## 1.1 Obloukové svařování

Termín obloukové svařování se vztahuje k rozsáhlé a různorodé skupině svařovacích procesů, které využívají elektrický oblouk jako zdroj tepla k roztavení svařovaného materiálu a následnému vytvoření spoje. Oblouk vzniká mezi svařencem a špičkou elektrody. Elektroda může být buď tavící se nebo netavící se, posouvaná manuálně nebo mechanicky, případně stacionární, pokud se pohybuje svařenec. Tavící se elektroda slouží nejen k vedení elektrického proudu pro zajištění oblouku, ale zároveň k dodání přídavného materiálu do místa svaru. Zároveň může vytvářet struskový povlak, který chrání horké místo svaru před oxidací. [4]

### 1.1.1 Svařování obalenou elektrodou

Nejrozšířenějším procesem obloukového svařování je svařování obalenou elektrodou (obr. 2). Během svařování není třeba přivádět žádný ochranný plyn, ochrannou atmosféru  $\text{CO}_2$  vytváří obal elektrody. Tato metoda nabízí velkou všestrannost, nízké počáteční náklady a možnost použití v terénu zásluhou přenosnosti napájecího zdroje. Nevýhodou je požadavek na zručnost svářeče, nižší produktivita zapříčiněná zastavováním procesu při spotřebování a následné výměně elektrod, dále vznik zdraví škodlivého dýmu. V neposlední řadě je potřeba po svařování odstraňovat strusku. [5]



Obr. 2 Svařování obalenou elektrodou [6]

K dalším metodám obloukového svařování patří např. svařování pod tavidlem, svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu (např. MIG a MAG), netavící se elektrodou v ochranném plynu (TIG) a svařování plazmou. [3]

### 1.1.2 Svařování pod tavidlem

Podobnou metodou obloukového svařování je svařování pod tavidlem, místo obalu elektrody se však využívá granulovaného tavidla (jak je patrné z obr. 3) dodávaného do místa svaru z násypky, která se pohybuje zároveň s elektrodou. Výhodou této technologie je možnost přidání legujících prvků do tavidla, použití více elektrod v tandemu, dále minimální rozstřík a tepelné ztráty do okolí, čistota vzniklého svaru. Metodu lze použít pro svařování tlustostěnných součástí, prakticky je však omezená na svařování ve vodorovné poloze a obvodové svařování trubek. [7]



Obr. 3 Svařování pod tavidlem [8]

### 1.1.3 Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu

Při tomto procesu probíhá hoření elektrického oblouku mezi tavící se elektrodou a svařencem v ochranné plynové atmosféře. Jako materiál elektrody se používá drát plný nebo plněný, který je potřeba během svařování neustále konstantní rychlostí podávat ze zásobníku. Součástí svářečského hořáku je plynová hubice, kterou se do oblasti svaru vhání ochranný inertní nebo aktivní plyn tak, aby docházelo v místě oblouku a svaru k laminárnímu proudění. [1]

Výhodou technologie je univerzálnost – možnost svařovat široké množství kovů a slitin ve všech polohách, dále vysoká rychlost, zhotovení dlouhých svarů bez přerušení a hlubší průvar než při svařování netavící se elektrodou. V neposlední řadě také snadná automatizace. [1]

### 1.1.4 Svařování netavící se elektrodou v ochranném plynu

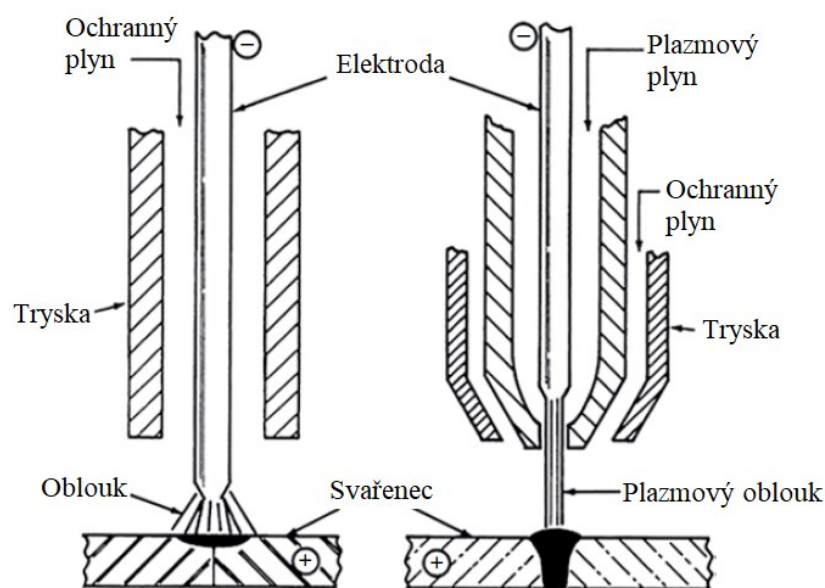
Svařování netavící se elektrodou v ochranném plynu je proces, při kterém hoří elektrický oblouk mezi špičkou netavící se elektrody (zpravidla wolframové) a svarovou lázní. Tento

proces se často označuje zkratkou TIG, ta pochází z angl. Tungsten Inert Gas, případně také WIG. Při svařování se může použít přídavný materiál ve formě drátu nebo tyče. Jako ochranný plyn se využívá inertních plynů – argonu, helia, jejich směsí a dalších kombinací s kyslíkem a oxidem uhličitým. [1]

Díky možnosti přesné regulace a stínění inertním plynem je tato technologie schopna vytvářet velmi kvalitní svary. U zhotovených svarů je také minimální potřeba čištění – na povrchu nevzniká struska. Mezi další výhody patří možnost svařovat téměř všechny kovy ve všech svařovacích polohách, použitelnost pro složité tvary a tenké plechy. Nevýhodou je požadavek na velmi vysokou zručnost svářeče, nižší produktivita, možnost vzniku wolframových vměstků ve svaru a citlivost na průvan. [5]

### 1.1.5 Svařování plazmou

Svařování plazmou je pokrokovou technologií obloukového svařování. Podobně jako při svařování metodou TIG se používá netavící se wolframová elektroda a ochranný plyn, rozdíl je však v celkové konstrukci hořáku (srovnání poskytuje obr. 4). Proces se vyznačuje vysokou hustotou energie, která je ovlivněna velikostí svařovacího proudu, průtokem plazmového plynu a velikostí trysky. Rozlišují se dva typy oblouku – přenášený a nepřenášený – podle toho, zda vzniká mezi elektrodou a svařencem nebo elektrodou a tryskou. Výhodou technologie je vysoká rychlost a vynikající kvalita svaru. [9]



Obr. 4 Porovnání metody TIG a svařování plazmou [5]



## 1.2 Odporové svařování

Během odporového svařování vzniká teplo průchodem elektrického proudu místem kontaktu dvou svařovaných dílů. Proudová hustota dosahuje takových hodnot, že dochází k lokálnímu tavení kovu a následnému vzniku spoje. Hodnoty proudu se obvykle pohybují v rozsahu 1 000 – 100 000 A, napětí 1 – 30 V. [2]

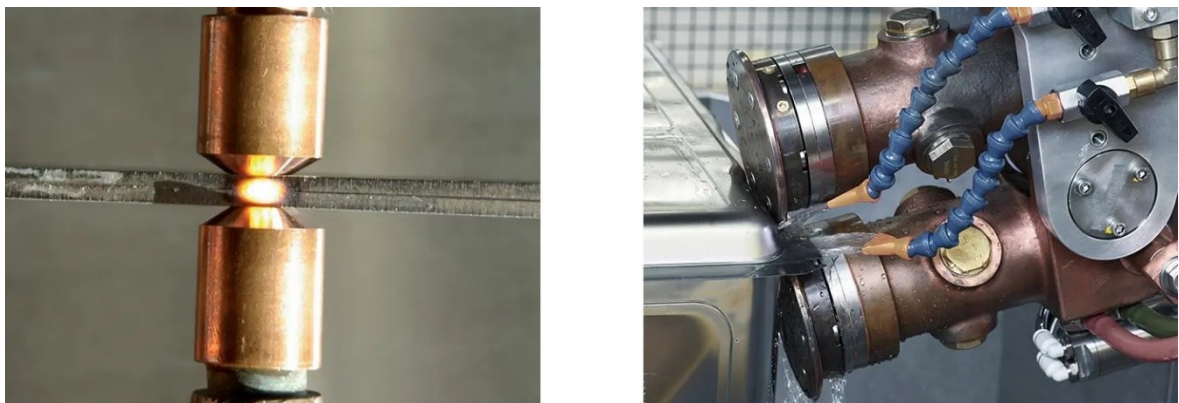
Výhodami metod odporového svařování jsou obecně vysoká rychlost, účinnost, absence potřeby přídavného materiálu a nízká úroveň znečištění. Mezi nevýhody se řadí vysoké investiční náklady (oproti obloukovému svařování drahé zařízení) a omezený rozsah použití. [2]

Mezi základní typy odporového svařování se řadí svařování:

- bodové,
- švové,
- výstupkové,
- na tupo. [2]

### 1.2.1 Bodové a švové svařování

Zřejmě nejrozšířenější metodou odporového svařování, používanou hojně v automobilovém průmyslu, je bodové svařování. Na běžném automobilu se nachází až 5 000 bodově svařovaných spojů. Využívá se pro svařování plechů do 3 + 3 mm tloušťky. Velmi podobnou metodou je švové svařování, rozdíl je v podobě elektrod, které jsou válcového tvaru a svým otáčením obvykle zabezpečují i posuv výrobku. Obě metody zachycuje obr. 5. [2]

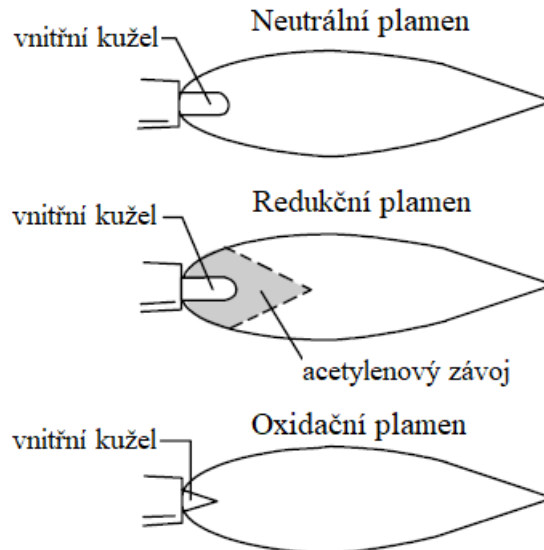


Obr. 5 Metody odporového svařování – vlevo bodové, vpravo švové svařování [10]

### 1.3 Plamenové svařování

Plamenové svařování s kyslíkem je jedním z nejstarších způsobů svařování. Pro ohřev a roztavení materiálu v místě spojení se využívá plamen vznikající při chemické reakci hořlavého plynu s kyslíkem. Nejčastěji používaným plynem je acetylen ( $C_2H_2$ ), lze však použít i jiné uhlovodíky, výjimečně i vodík. Kyslík i zvolený hořlavý plyn bývají uskladněny v tlakových lahvích, se odkud jsou pod vhodným tlakem přiváděny hadicemi do hořáku. [1; 11]

Podle poměru přiváděného kyslíku a acetyleny se rozlišují se tři typy vzniklého plamene, viz obr. 6. Redukční plamen má přebytek plynného paliva a tím i přebytek uhlíku. Tento plamen má nejnižší teplotu a při jeho použití dochází k nauhličení svarové lázně. Používá se při svařování hořčíkových slitin, navařování tvrdých kovů a cementování. Nejčastěji používaný typ plamene je plamen neutrální, který neovlivňuje chemické složení svařovaného materiálu. Třetím typem je oxidační plamen s přebytkem kyslíku. Tento plamen se vyznačuje nejvyšší teplotou, použití nachází při svařování mosazi a některých druhů bronzu. [1; 11]



Obr. 6 Srovnání vzhledu neutrálního, redukčního a oxidačního plamene [7]

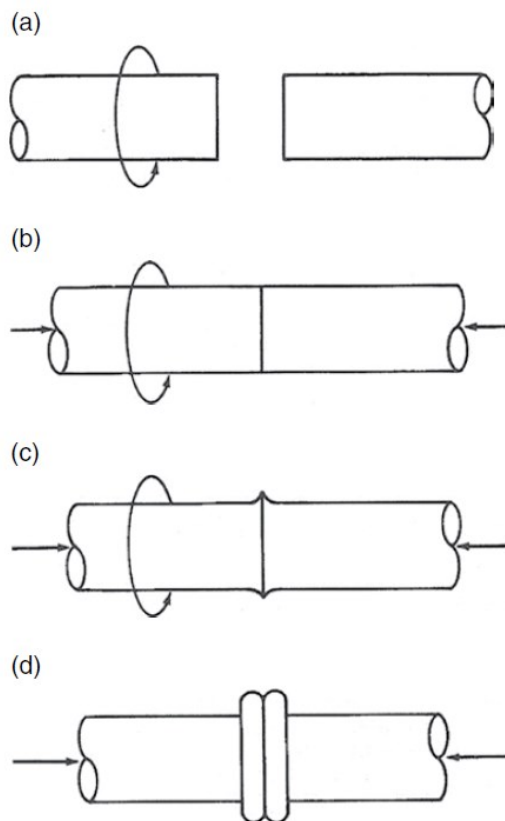
Plamenové svařování je v dnešní době stále často využíváno v menších provozech, automobilových a zemědělských opravách, uměleckých ateliérech atd. Důvodem je univerzálnost, kdy je možné jedním vybavením provádět kromě svařování i ohřev a řezání. [11]

## 1.4 Tlakové svařování

Hlavními představiteli metod tlakového svařování jsou technologie svařování třením a ultrazvukové. Dále do této skupiny dle ČSN EN ISO 4063 patří tlakové svařování s plamenovým ohřevem, tlakové svařování za studena a tlakové svařování za tepla. [3]

### 1.4.1 Svařování třením

Svařování třením je založeno na principu přeměny mechanické energie na teplo v místě svaru. Obr. 7 zobrazuje obvyklé uspořádání metody, kdy jedna ze svařovaných částí rotuje a je přitlačována ke druhé, která je zajištěna v nehybné poloze. Zajištění polohy nehybné části musí být velmi pevné, aby odolalo axiálně působící síle a zároveň bránilo rotaci. Obvykle je alespoň jedna ze svařovaných částí kruhového nebo téměř kruhového průřezu. V důsledku tření se teplota na rozhraní spoje zvyšuje na kovací teplotu. Působením axiálního zatížení dochází k vytlačování horkého kovu ze spoje. Cyklus třecího svařování bývá zpravidla automatizovaný. [4]



Obr. 7 Průběh vzniku spoje při svařování třením [5]

### 1.4.2 Svařování ultrazvukem

Při svařování ultrazvukem dochází ke vzniku svaru pomocí vibrací o vysoké frekvenci při působení tlaku. Elektromechanická ultrazvuková hlava pracuje s frekvencí v rozsahu 20–60 kHz a amplitudou o velikosti pouze několik setin mm. Svařování ultrazvukem je vhodné jak pro kovové, tak i plastové výrobky. V případě kovových částí se jedná obvykle o tenké plechy, fólie nebo dráty. Metoda je velmi vhodná například ke svařování součástí citlivých elektronických zařízení, vzniká při ní velmi málo tepla. [2]

## 1.5 Svařování svazkem paprsků

Tyto technologie svařování využívají možnosti zaostření paprsku laseru nebo elektronů na velmi malou plochu. Metody svařování svazkem paprsků se vyznačují následujícími vlastnostmi a možnostmi:

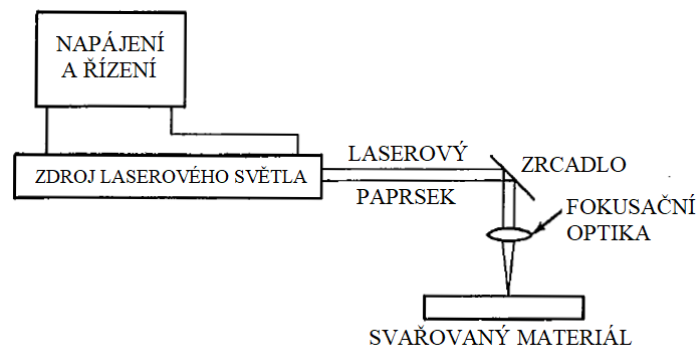
- velmi vysoká hustota energie oproti jiným technologiím svařování,
  - svařování jedním průchodem,
  - svařování materiálů velkých tloušťek,
  - velmi úzké svary (a úzká tepelně ovlivněná oblast),
  - malé deformace po svařování, možnost svařovat již obrobené díly,
  - přítomnost ochranného plynu (laser) nebo vakua (elektronový svazek) – dobrá ochrana proti oxidaci – možnost svařovat citlivé materiály jako titan a zirkonium.
- [12]

Vzhledem k faktu, že svařování elektronovým svazkem bude v této práci věnováno mnoho prostoru v dalších kapitolách, se následující odstavce věnují pouze jedné z metod svařování svazkem paprsků – svařování laserem.

### 1.5.1 Svařování laserem

Slovo laser je akronym pro angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření, což je proces vytváření světla s fotony stejné fáze a vlnové délky. Lasery jsou zařízení pro přeměnu energie – transformují energii z elektrických, optických, tepelných nebo chemických zdrojů na specifickou frekvenci světla v rámci elektromagnetického spektra. Laserové světlo vzniká buzením atomů nebo molekul, které vytvářejí velmi úzké pásmo elektromagnetických frekvencí (v ideálním

případě monochromatické) s fázovým elektrickým polem (koherentním). Jednoduché schéma uspořádání při svařování laserem zobrazuje obr. 8. [13]



Obr. 8 Schéma svařování laserem [4]

Základní rozdělení laserů je možné provést podle skupenství aktivního prostředí. Pro účely svařování se využívá laserů plynových a pevnolátkových. Nejčastěji používanými typy pro svařování jsou lasery:

- CO<sub>2</sub>,
- Nd:YAG,
- vláknové,
- diskové,
- diodové. [13]

Režim práce laseru může být kontinuální, kvazikontinuální nebo pulzní. [13]

Mezi výhody svařování laserem patří, jak již bylo uvedeno výše, schopnost vytvářet hluboké a zároveň úzké svary vysokou rychlostí. Při svařování vzniká úzká tepelně ovlivněná oblast a malá deformace svařence. Technologii lze použít pro svařování odlišných materiálů a dílů s velmi rozdílnou velikostí a hmotností. Na rozdíl od svařování elektronovým svazkem není vyžadováno vakuum a ochrana vůči rentgenovému záření. Snadné ovládání a fokusace laserového paprsku pomocí optiky umožňuje automatizaci procesu. [4; 7]

Nevýhodou je kromě vysoké pořizovací ceny zařízení také odrazivost laserového paprsku od kovového povrchu. Uvádí se, že až přibližně 95 % výkonu paprsku CO<sub>2</sub> laseru se může odrazet od leštěného kovového povrchu. U YAG laseru je odrazivost paprsku o něco nižší. Odrazivost lze snížit úpravou povrchu, jako je zdrsňení, oxidace a potahování. [7]

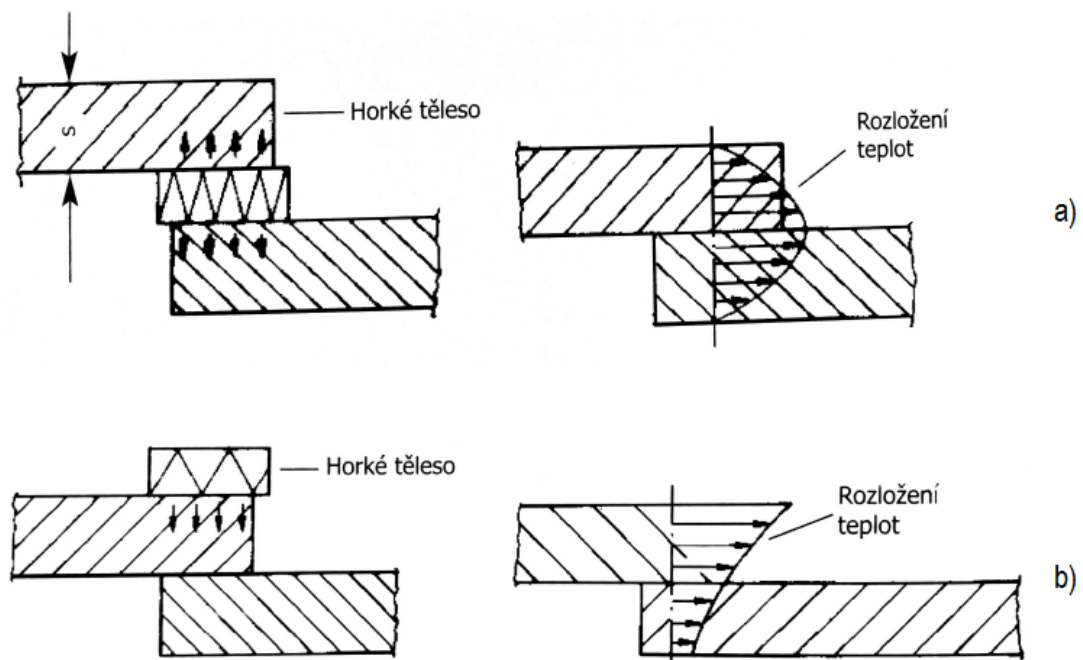
## 1.6 Svařovací metody specifické pro plasty

Svařování jako metoda spojování není doménou pouze kovových materiálů. Loyda et al. [14] uvádí rozdělení metod svařování plastů podle nosiče tepla. Takto lze technologie rozdělit následovně:

- svařování horkým tělesem (přímé a nepřímé),
- svařování horkým plynem,
- ostatní metody svařování plastů.

### 1.6.1 Svařování horkým tělesem

Svařování horkým tělesem spočívá v nahřátí spojovaných ploch nejčastěji elektricky vyhřívanými tělesy, jejichž tvar je přizpůsoben ohřívané ploše, případně je plocha ohřívána elektrickou topnou šroubovicí navinutou v těle tvarovky. Samotný proces svařování může probíhat za pomoci ručních přístrojů nebo strojů s různým stupněm mechanizace či automatizace. Jak již bylo uvedeno výše, rozlišuje se přímé a nepřímé svařování horkým tělesem. Rozdíl spočívá ve způsobu ohřevu a následném rozložení teplot, viz obr. 9. Během přímého svařování se teplo přenáší bezprostředně z horkého tělesa na svařovanou plochu materiálu. Rozdělení teplot je v tomto případě výhodné, protože dochází k rovnoměrnému ohřevu na celé svařované ploše a teplota směrem od ní postupně klesá. Naopak v případě nepřímého svařování dochází k ohřevu ze strany protilehlé ke svařované ploše, teplo musí projít celou tloušťkou jednoho ze svařovaných materiálů. Vzniklé rozložení teplot je nevýhodné, nejvyšší teplota se nenachází v místě svaru, proto tato metoda obvykle nenachází uplatnění při svařování tlustostěnných materiálů. [14]



Obr. 9 Svařování horkým tělesem a následné rozložení teplot – a) přímé, b) nepřímé [14]

### 1.6.2 Svařování horkým plynem

Při svařování horkým plynem (nejčastěji vzduchem) se spojované plochy a vnější zóny přídavného materiálu přivedou do plastického stavu a následně se pod tlakem spojí. Postup této metody se blíží svařování kovů, např. svařování plamenem s přídavným materiálem, ovšem s velkým rozdílem ve svařovacích parametrech. Svařování bez přídavného materiálu se provádí u fólií a jiných tenkých materiálů. [14]

Mezi další způsoby svařování plastů lze zařadit svařování:

- infračerveným paprskem,
- ultrazvukem,
- třecí,
- vysokofrekvenční,
- laserem. [14]

## 2 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM SVAZKEM

Svařování elektronovým svazkem je nekonvenční technologií svařování sloužící k vytváření nerozebíratelných spojů. Celý proces, případně alespoň jeho část, probíhá ve vakuu, což zaručuje jeho vysokou čistotu. Technologie je dále charakteristická svary s velkým poměrem hloubky průvaru k šířce, malou tepelně ovlivněnou oblastí a možností svařovat různorodé materiály.

### 2.1 Historie elektronového svařování

Objev elektronu učinil J. J. Thomson roku 1897 na Univerzitě v Cambridge. První vážný pokus o využití elektronového svazku jako nástroje pro tavení si připisuje o deset let později M. Pirani. Počátky využití elektronového svazku pro svařování se pak vážou k 50. letům minulého století. Stručný přehled vývoje v této oblasti poskytuje tab. 1. [15; 16]

Tab. 1 Počátky vývoje elektronového svařování ve světě [16]

Rok	Událost
1879	Sir W. Crookes: tavení platinové anody v katodovém paprsku
1897	J. J. Thomson: důkaz, že katodové paprsky byly svazky elektronů
1907	M. Pirani: patent na tavení elektronovým svazkem
1938	M. Ardenne: použití svazku elektronů jako pracovního nástroje
1951	Patent 727460 (VB): bodové svařování elektronovým svazkem
	K. H. Steigerwald: konstrukce elektronové svářečky, primárně pro vrtání
1954	J. A. Stohr: počátek práce na svařování elektronovým svazkem
1956	Heraeus: výroba elektronového děla bez vakua
1957	J. A. Stohr: prezentace výsledků praktického svařování zirkonia elektronovým svazkem na mezinárodní konferenci v Paříži
	W. L. Wyman: zpráva o práci v USA
1958	N. A. Olshansky: zpráva o práci v SSSR První komerčně dostupné vybavení ve Velké Británii



---

1959	První zpráva o svarech s velmi vysokým poměrem hloubky k šířce zhotovených Steigerwaldovým zařízením
	První zpráva o práci v Japonsku se strojem JEOL

---

## 2.2 Princip elektronového svařování

Elektron je částice charakteristická svou hmotností  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg a záporným elektrickým nábojem o velikosti  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Když je elektron umístěn do prostoru, kde existuje elektrické pole a napětí, začne na něj působit síla. Působením této síly se elektron bude pohybovat a nabude kinetickou energii [12]:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = e \cdot U, \quad (1)$$

kde:

$E_k$  – kinetická energie elektronu,

$m_e$  – hmotnost elektronu,

$v$  – rychlost elektronu,

$e$  – elektrický náboj elektronu,

$U$  – velikost urychlovacího napětí.

### 2.2.1 Emise elektronů

Elektronový paprsek je produkován termoemisí z katodového vlákna umístěného v části svářečky nazývané jako elektronové dělo, jehož schéma je zobrazeno na obr. 10. Vlákno je vyrobeno nejčastěji z wolframu, a to pro jeho vysoké atomové číslo a tím schopnost dodávat potřebné elektrony. Vlákno má nejčastěji podobu drátu kruhového průřezu, případně pásku obdélníkového průřezu. Kruhová vlákna mají menší průřez, vytvářejí menší a přesnější paprsek. Vlákna s obdélníkovým průřezem naopak nabízejí větší odolnost a delší životnost. Vlákno je elektricky zahříváno, dokud se termionickou emisí nevytvoří proud elektronů. Průřez vzniklého paprsku svým tvarem přibližně odpovídá průřezu vlákna. Pokud by bylo použito vlákno čtvercového průřezu, bude se i průřez paprsku blížit čtvercovému tvaru a podobně. [13; 16]

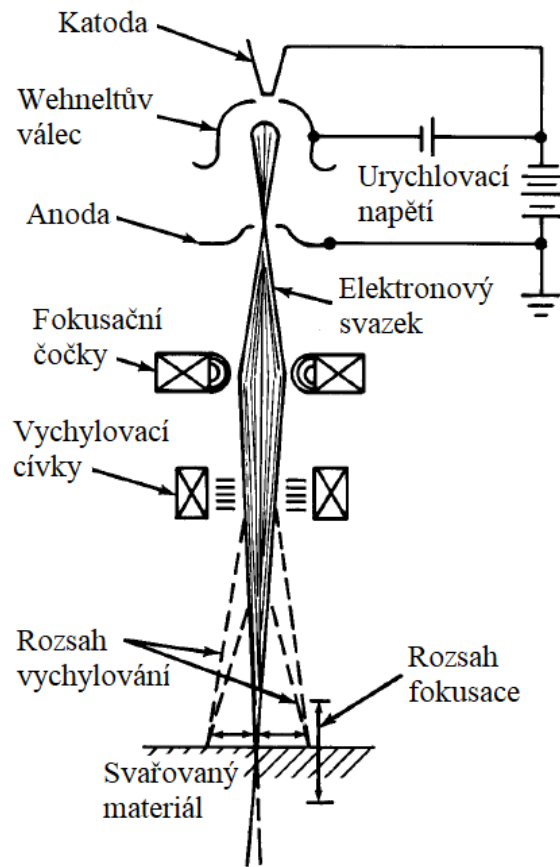
### 2.2.2 Urychlení elektronů

Vzniklý paprsek je urychlován pomocí anody s vysokým rozdílem napětí. Anoda má tvar prstence, čímž je umožněn průchod elektronů svazku. Elektrony se urychlují na rychlost 50 až 70 % rychlosti světla. Zásluhou takto extrémní rychlosti získává svazek elektronů vysokou hybnost, což po srážce se svařovaným dílem vede k intenzivnímu ohřevu a ve většině případů i k odpaření kovu na povrchu. Uvádí se dosažení teploty až 25 000 °C. Při výstupu z anody dochází vlivem prostorového náboje k rozptylu paprsku – záporně nabitě elektrony se vzájemně odpuzují, dochází ke zvětšování průměru paprsku, a tím ke snížení hustoty energie. Pro nápravu je třeba paprsek zaostřit. [13]

### 2.2.3 Fokusace a vychylování

Zaostření paprsku se provádí pomocí fokusačních magnetických čoček. Podle konkrétního případu svařování se může vyžadovat velmi ostrý paprsek, ale také paprsek, který není tak úzký. Změnou velikosti průřezu svazku dochází ke změně hustoty energie, jak již bylo naznačeno výše. [13]

Druhou částí elektronové optiky jsou vychylovací cívky. Ty zajišťující řízení prostorové polohy svazku. Řízení paprsku probíhá manipulací s vychylovacím proudem. Výsledný pohyb paprsku může být velmi rychlý. [13]

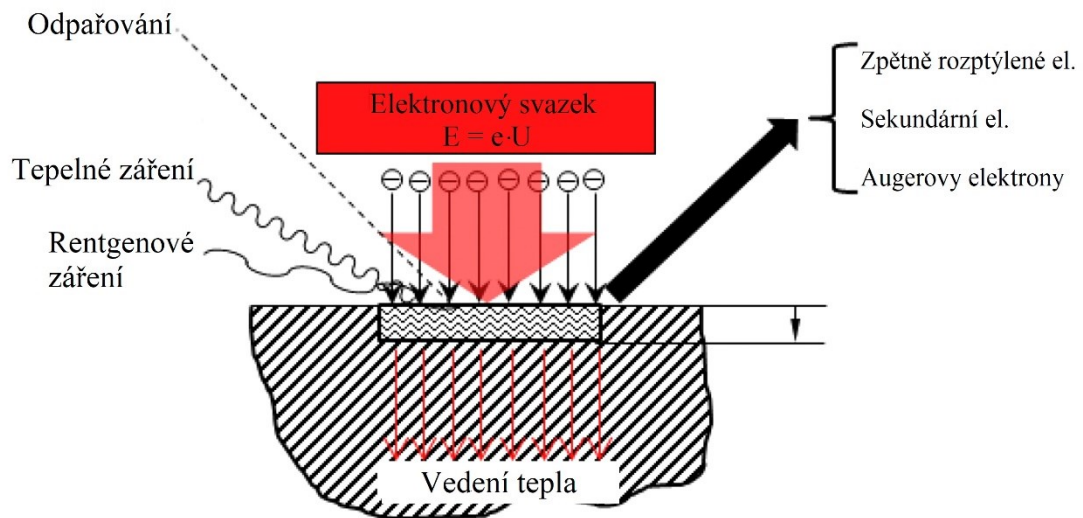


Obr. 10 Schéma elektronového děla [17]

#### 2.2.4 Dopad paprsku na povrch a interakce s materiálem

Při dopadu silně fokusovaného svazku elektronů do oblasti svarového spoje dojde k přeměně kinetické energie na teplo. Jeho absorbováním dochází k tavení materiálu při hustotě energie až  $10^{12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Elektronový paprsek dopadající na povrch svařované součásti interaguje s elektrony jejího materiálu (viz obr. 11) a způsobí emisi:

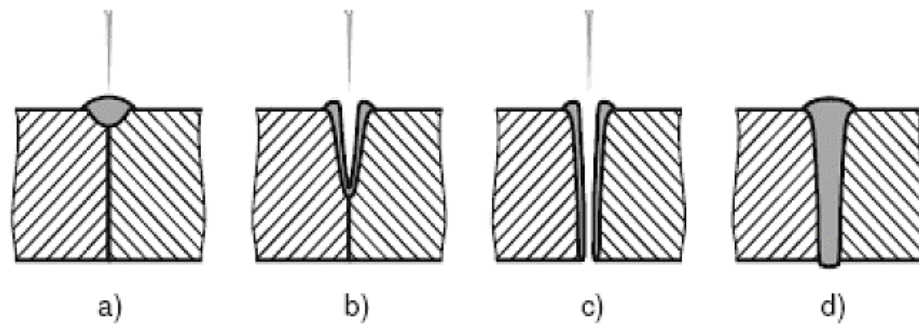
- zpětně rozptýlených (odražených) elektronů,
- sekundárních elektronů,
- Augerových elektronů,
- rentgenového záření,
- fotonů,
- tepelného záření. [16]



Obr. 11 Interakce elektronového svazku s povrchem materiálu [16], upraveno

Svařovat lze dvěma způsoby: vedením tepla a technikou klíčové dírky (keyhole). Mód vedením tepla je vhodný pro tenké materiály. Dochází k rychlému tavení materiálu na povrchu a vedením tepla spojem se dosáhne úplného, nebo částečného přetavení. Touto technikou je možné získat úzký svar – důvodem je malý průměr fokusovaného paprsku a vysoká hustota energie umožňující vysokou rychlost svařování, jejíž zásluhou nedojde k absorpci velkého množství tepla okolím svaru. [1]

Technika klíčové dírky (angl. keyhole mode) nebo také hluboké svařování se využívá pro svařování tlustších materiálů. Svazek je při tomto způsobu zaostřený do místa pod povrchem materiálu, do kterého může přímo penetrovat. Rychlý ohřev, tavení a následné odpařování kovu způsobí vznik úzké kapiláry přes celou hloubku materiálu. Důsledkem vypařování narůstá v otvoru tlak par, které tlačí tavící se kov ke stěně kapiláry. Při posuvu dutiny směrem vpřed ve směru svařování dochází k jejímu obtékání, zaplnění mezery za ní, rychlému tunutí a vytvoření svaru. Tento postup je zachycen na obr. 12. Také tento způsob svařování vytváří velmi úzký svar a úzkou tepelně ovlivněnou oblast. Tyto dvě techniky jsou spojeny také se svařováním laserem. [1; 18]



Obr. 12 Postup vzniku hlubokého svaru – a), b), c) vytvoření kapiláry, natlačení roztaveného materiálu na stěny, d) vzniklý spoj [1]

### 2.3 Základní parametry elektronového svazku a jejich vliv na geometrii svaru

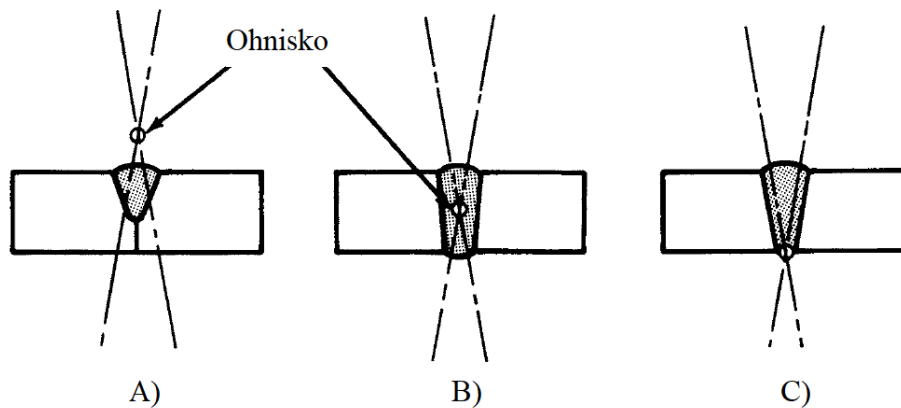
Svařování elektronovým svazkem je proces, jehož výsledek je možné ovlivnit mnoha parametry. Literatura [1; 13; 17; 19] označuje čtyři hlavní z nich, konkrétně se jedná o:

- urychlovací napětí,
- proud svazku,
- fokusaci,
- rychlost svařování.

S rostoucím urychlovacím napětím roste i hloubka průvaru. Při velké pracovní vzdálenosti mezi elektronovým dělem a součástí nebo při požadavku na úzký profil svaru se doporučuje zvýšit urychlovací napětí a snížit proud svazku. [17]

Pro jakékoliv urychlovací napětí platí, že dosažitelná hloubka průvaru roste s rostoucím proudem svazku. [17]

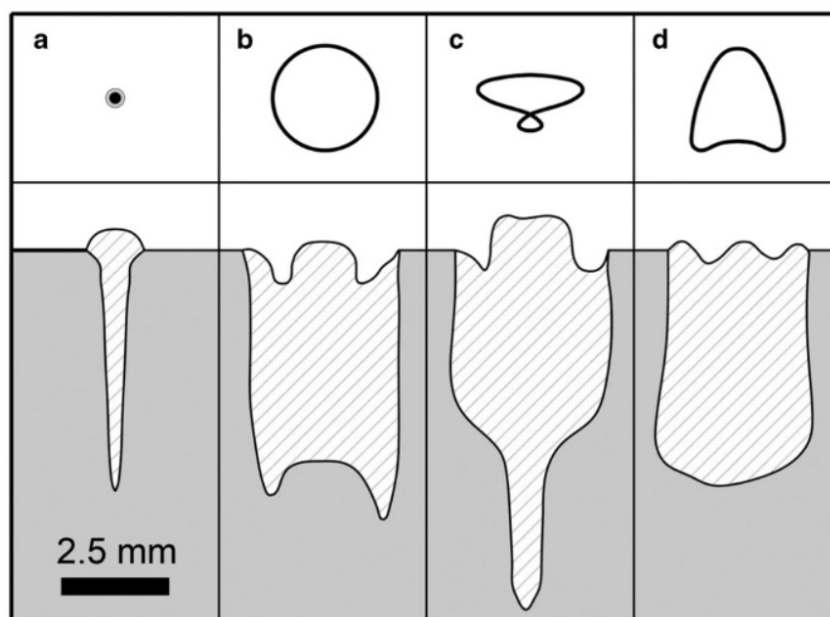
Paprskem zaostřeným mírně pod povrch svařovaného materiálu se vytvoří svar s úzkou geometrií a rovnoběžnými stěnami, hustota energie při takovém zaostření dosahuje svého maxima. Rozostření paprsku zaostřením hlouběji do materiálu nebo naopak nad povrch materiálu bude mít za následek nárůst efektivního průměru paprsku, snížení hustoty energie a vytvoření svaru mělkého, resp. svaru s geometrií ve tvaru písmene „V“. Tyto situace zachycuje obr. 13. [17]



Obr. 13 Tři možnosti zaostření paprsku elektronů – A) nad materiál, B) optimální případ, C) hluboko do materiálu [17]

Vliv velikosti svařovací rychlosti je stejný pro jakýkoliv výkon svazku – nárůst rychlosti znamená kratší čas interakce mezi svazkem a svařovaným materiálem, což se projeví užším svarem a menší hloubkou průvaru. [13; 17]

Patterson et al. [13] k výše zmíněným parametrům přidává ještě vychylování svazku, které lze použít za účelem kontroly profilu svaru, mikrostruktury, rozložení energie a k přizpůsobení svazku mezeře mezi svařovanými díly. Velké amplitudy a frekvence vychylování mají ovšem za následek snížení hloubky průvaru. Běžně používané vzory vychylování jsou kruhové, sinusové, lineární (kolmé a rovnoběžné se spojem) nebo tvar číslice „8“. Rozdílné geometrie svaru zapříčiněné rozdílnými vzory vychylování zachycuje obr. 14.



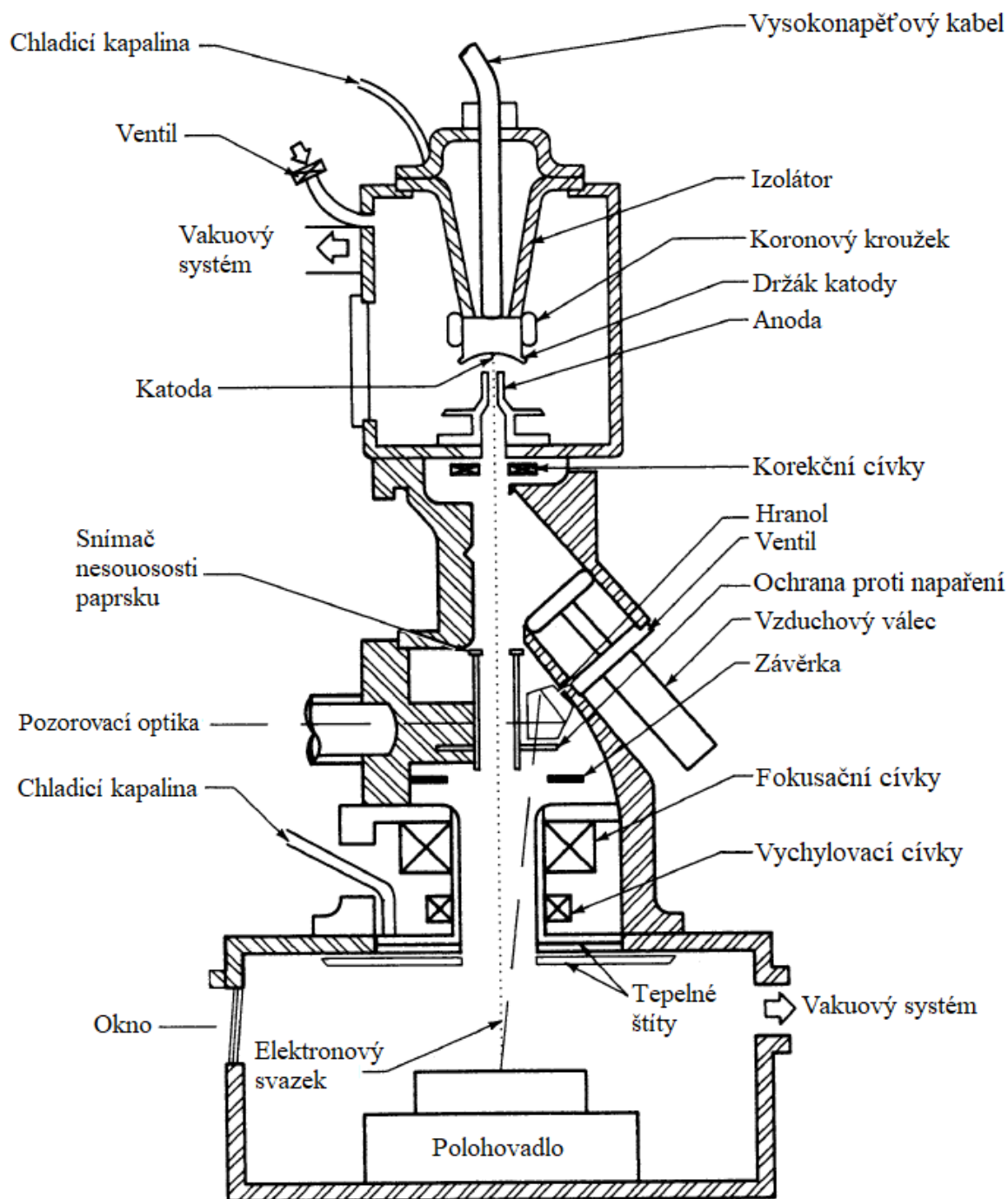
Obr. 14 Rozdílné vzory vychylování svazku a jejich vliv na geometrii svaru [13]

## 2.4 Zařízení pro svařování svazkem elektronů

Elektronové svářečky – bez ohledu na jejich velikost, oblast použití a výrobce – se zpravidla skládají ze čtyř základních konstrukčních částí:

- elektronové dělo,
- pracovní jednotka (pracovní komora a systém manipulátorů),
- vakuový systém,
- řídicí systém. [20]

Zařízení pro svařování se vyrábějí v mnoha konstrukčních řešeních přizpůsobených potřebám zákazníka. Příklad jednoho možného řešení zachycuje obr. 15. Záleží především na sériovosti výroby a s tím požadované automatizaci procesu a na rozměrech svařovaných součástí. Moderní elektronové svářečky jsou vybaveny PLC řídicími systémy nebo číslicově řízenými polohovadly umožňující automatizaci svařovacího procesu. [20]



Obr. 15 Schématický řez elektronovou svářečkou [17]

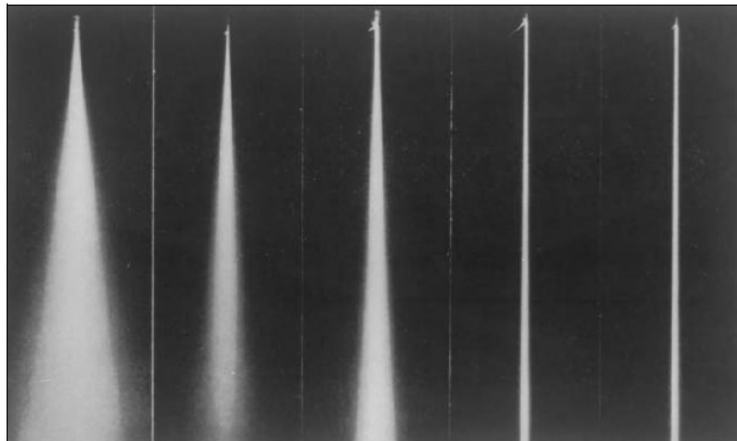
#### 2.4.1 Vakuový systém

Součástí elektronové svářečky musí být vakuový systém potřebný k odčerpání vzduchu z uzavřeného prostoru elektronového děla a pracovní komory. Vakuum se v oblasti elektronového svařování využívá ze tří hlavních důvodů:

- ochrana proti oxidaci,



- ochrana proti rozptýlení svazku – při nárazu rychle letícího elektronu do atomu kyslíku nebo dusíku (plyny vyskytující se v atmosféře) dojde k jeho vychýlení a tím je ztráta energie v důsledku srážky, úroveň rozptýlení svazku při různých tlacích zobrazuje obr. 16,
- zabránění vzniku elektrického oblouku. [19]



Obr. 16 Vliv tlaku na rozptýlení svazku elektronů [17]

Základem systému je rotační vývěva s vysokou kapacitou doplněná difuzní nebo turbomolekulární vývěvou sloužící k dosažení vysokého vakua. Difuzní vývěvy pracují na principu strhávání molekul plynu rychle proudící kapalinou nebo parou. Neobsahují pohyblivé části. Jako pracovní kapalina se používá olej. Oproti tomu turbomolekulární vývěva je tvořena statorovou a pohyblivou rotorovou částí, která se otáčí tak, aby její obvodová rychlost byla srovnatelná s rychlostí molekul čerpaného plynu. [1; 21; 22]

K vakuovému systému dále patří řídicí systém, řada vakuových ventilů a množství dalších součástí. Existuje možnost oddělení jednotlivých částí svářečky tzv. airlock systémem, takže je možné zavzdušnění pracovní komory například pro výměnu svařovaných součástí, zatímco v ostatních částech zařízení zůstane zachováno vakuum. Jinou možností je zařazení soustavy clon, kterými je postupně snižována hodnota vakua, takže vysoké vakuum zůstane pouze v oblasti elektronového děla, zatímco v pracovní komoře bude proces probíhat při nižším vakuu, případně při atmosférickém tlaku. [1]

#### 2.4.2 Pracovní komora

Jak již bylo nastíněno výše, konstrukce elektronové svářečky a tím i řešení pracovní komory se volí podle předpokládaného použití. Zároveň je třeba brát v potaz velikost použitého napětí. Svařovací zařízení pracující s nízkým napětím (do 60 kV) se obvykle konstruují

z uhlíkové oceli. Tloušťka plechu se volí tak, aby poskytovala dostatečnou ochranu proti rentgenovému záření (místy mohou být přidány i olověné prvky) a zajistila dostatečnou pevnost vůči působícímu tlaku. U zařízení pracujícího s napětím nad 60 kV přibývá vnější opláštění olovem pro ochranu personálu před rentgenovým zářením. [17]

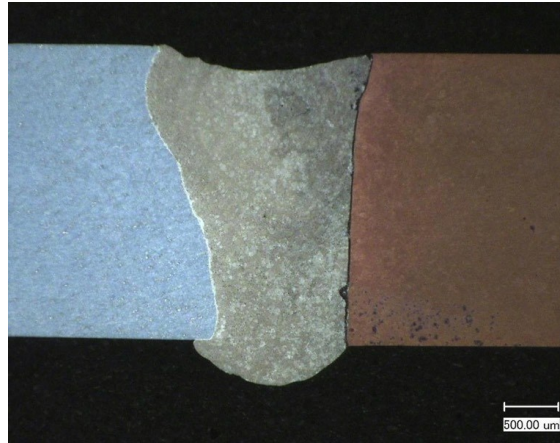
Rozdílnost mezi velikostmi komor jednotlivých svařovacích zařízení demonstruje obr. 17, na němž je vlevo zachycena stolní svářečka firmy Focus s pracovní komorou o objemu 8 litrů. Vpravo se nachází fotografie největšího elektronového svařovacího zařízení pro civilní použití výrobce pro-beam s komorou o objemu 700 m<sup>3</sup> umožňující svařování součástí o rozměrech až 6 × 6 × 14 m a hmotnosti až 100 t. [23; 24]



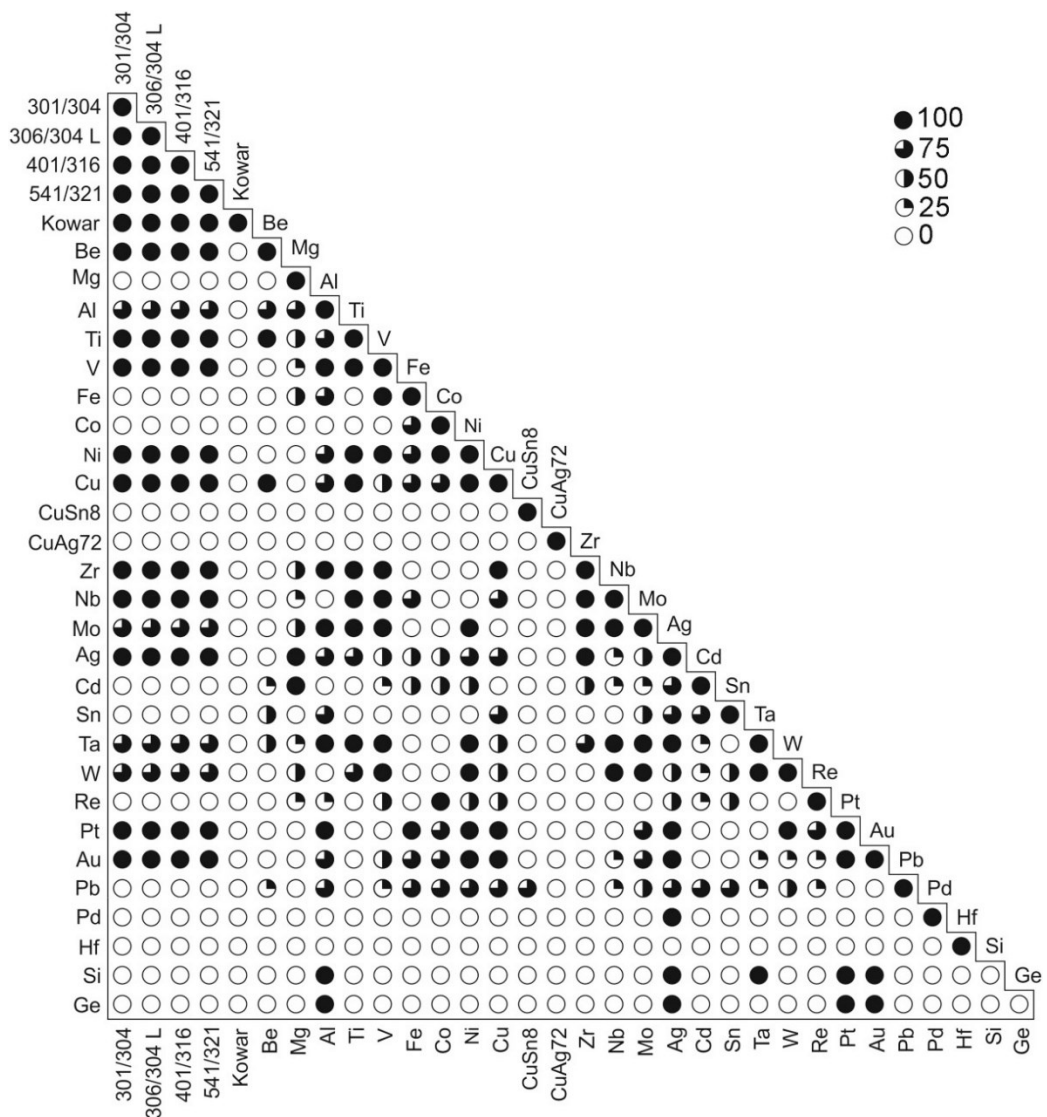
Obr. 17 Stolní svářečka a největší svářečka s pracovní komorou o objemu 700 m<sup>3</sup> [23; 24]

## 2.5 Využití elektronového svařování

Z hlediska materiálů, které lze svařovat, se technologie elektronového paprsku jeví jako velice univerzální. Svařovat lze různé druhy oceli a niklových slitin (kovar, inconel) nebo i jinými metodami těžko svařitelné kovy, jako jsou žáruvzdorné kovy (wolfram, molybden, niob) a chemicky aktivní kovy (titan, zirkonium, beryllium). Elektronové svařování je možné rovněž použít pro spojování kombinace různorodých kovů. Takový svar je zachycen na obr. 18, konkrétně se jedná o spojení hliníku a mědi. Obr. 19 zobrazuje svařitelnost různých kombinací materiálů. [16]



Obr. 18 Svarový spoj hliníku a mědi [23]



Obr. 19 Svařitelnost materiálů elektronovým svazkem, 100 – svařitelné, pevná rozpustnost existuje ve všech kombinacích slitin; 75 – pevná rozpustnost existuje, silně odlišné body tání; 50 – nedostatek údajů pro vyhodnocení, svařitelnost možná; 25 – nedostatek údajů pro vyhodnocení, svařitelnost málo pravděpodobná; 0 – vznik intermetalických sloučenin, nesvařitelné [16]

Tab. 2 poskytuje přehled o jednotlivých odvětvích průmyslu, kde se využívá svařování elektronovým svazkem, a to včetně příkladu konkrétních výrobků.

Tab. 2 Oblasti průmyslu využívající svařování elektronovým svazkem [16; 25]

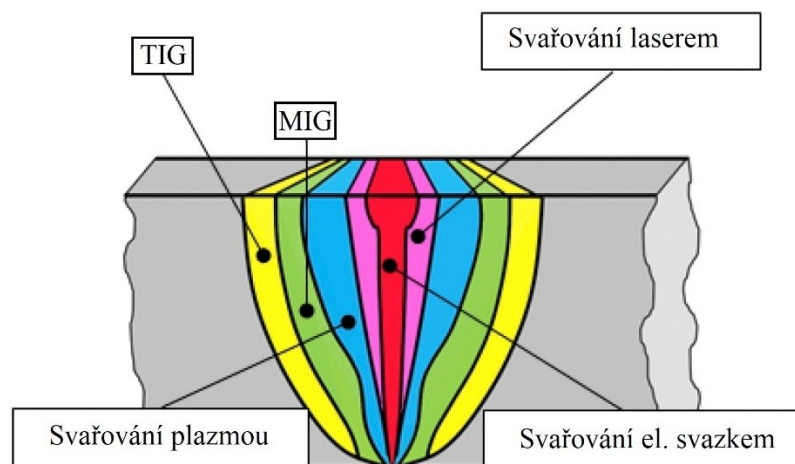
Oblast průmyslu	Výrobky
<b>Automobilový průmysl</b>	Svařované prvky převodovek, krytů motorů, chladičů, klikových hřídelí, pístních tyčí, hlav ventilů, filtrů, katalyzátorů, turbokompresorů, disků kol a airbagů
<b>Letectví a kosmonautika</b>	Titanové nádrže na propylen používané v družicích a raketách, hliníkové kontejnery, trysky, vstřikovače paliva, trupové prvky z titanu, opěrky, statory, lopatky a kryty turbín, perforovaná dna raket
<b>Energetika</b>	Prvky turbín, lopatky, silnoproudé flexibilní konektory, kontejnery na jaderný odpad, palivové tyče a další součásti ze zirkonia pro jaderný průmysl
<b>Strojírenství</b>	Ozubená kola, hydraulické válce, snímače teploty a deformací, rámy mikroskopů ze slitin hliníku, komutátory, pásové pily, vrtací nástroje, vysokotlaké ventily, pece na ničení použité munice
<b>Zdravotnictví</b>	Ozubené prvky v umělých končetinách, prototypy endoprotéz
<b>Železniční průmysl</b>	Příčnický ze slitin hliníku, tažné háky, ložisková pouzdra, univerzální spojky

## 2.6 Výhody a nevýhody

Mezi hlavní přednosti svařování elektronovým svazkem (z nichž některé již byly naznačeny) se řadí:

- velká dosažitelná hloubka průvaru na jeden průchod při zachování úzkého profilu svaru, srovnání s dalšími metodami viz obr. 20,
- vysoká kvalita svarů s minimální nebo žádnou oxidací – proces probíhá ve vakuu,
- možnost svařování některých jinak obtížně svařitelných materiálů,

- možnost svařovat rozdílné materiály,
- menší množství tepla vneseného do materiálu ve srovnání s jinými metodami,
- úzká tepelně ovlivněná oblast,
- na rozdíl od svařování laserem odpadá problém s odrazivostí,
- vysoká účinnost přenosu energie,
- dobrá možnost kontroly a monitorování svařovacích parametrů,
- vysoká reprodukovatelnost a konzistentnost. [19; 26]



Obr. 20 Geometrie tupého svaru vyrobeného různými metodami [16]

Uváděnými nevýhodami technologie jsou:

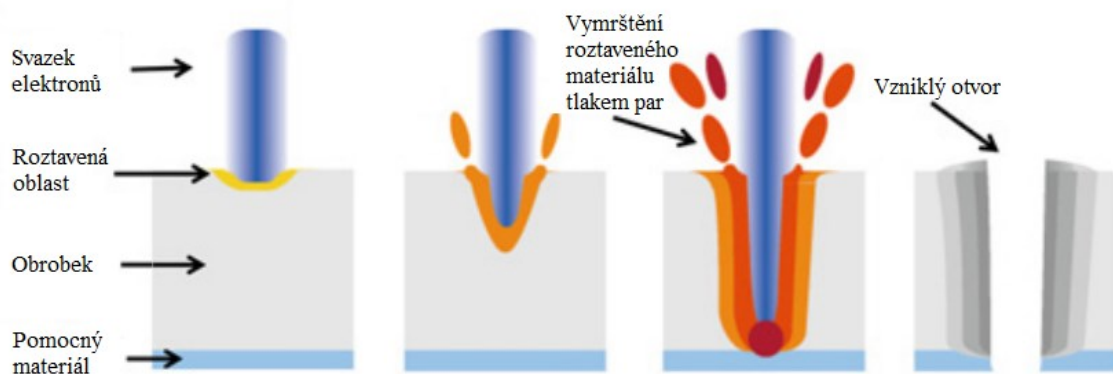
- vysoké náklady na vybavení,
- nutnost stínění rentgenového záření,
- neproduktivní čas během doby potřebné pro dosažení požadované úrovně vakua,
- velikost svařovaných součástí je omezena velikostí pracovní komory,
- nutnost přesného lícování svařovaných ploch s minimální mezerou,
- potřeba přesných nástrojů a přípravků,
- obtížná oprava svaru. [19; 26]

## 2.7 Další využití elektronového svazku

Kromě svařování existují i další technologie využívající elektronového paprsku. Patří mezi ně např. obrábění (především pak vrtání), technologie sloužící k úpravě povrchu součástí, elektronová litografie a rapid prototyping.

### 2.7.1 Vrtání elektronovým svazkem

Obrábění elektronovým svazkem nalézá uplatnění především při mikrovrtání, a to především pro schopnost hlubokého průniku (hloubka děr dosahuje 25násobku jejich průměru). Postup vrtání zobrazuje obr. 21, velmi důležitý je při něm pomocný materiál. Na rozdíl od konvenčních metod vrtání lze vrtat materiály od tvrdých kovů až po měkké polymery bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti. Výhodou oproti jiným nekonvenčním metodám (EDM, ECM) je nezávislost na elektrické vodivosti obráběného materiálu, oproti LBM zase rychlost. [27]



Obr. 21 Postup vrtání elektronovým svazkem [27]

### 2.7.2 Povrchové úpravy

Metody povrchových úprav elektronovým svazkem se vyznačují přesností a účinností. Oproti konvenčním metodám nabízejí krátkou dobu technologické operace, rovnoměrné rozložení energie svazku a přesnou kontrolu parametrů. [28]

Elektronový paprsek lze použít pro modifikaci povrchu po obrábění. Takové úpravy vyžadují daleko menší hustotu energie paprsku než obrábění nebo svařování. Paprsek může pracovat ve dvou režimech – kontinuálně nebo pulzně. Oba způsoby mají své výhody i nevýhody. Modifikace drsnosti povrchu pomocí svazku elektronů obecně spočívá v odstranění nerovností vzniklých během obrábění pomocí opakovaných cyklů tavení a tuhnutí. Klíčovým faktorem pro získání požadované drsnosti povrchu je tedy především

dosažení rovnoměrného ozařování povrchu. Kromě kovových materiálů bylo leštění elektronovým svazkem zkoumáno i na PMMA. [27]

Další možnou technologií je kalení elektronovým svazkem. Metoda je založena na zahřátí povrchu materiálu na určitou teplotu a následném prudkém ochlazení. Výsledkem je jemná krystalická mikrostruktura. Předností technologie je možnost přesného ohřevu vybraných oblastí povrchu. [28]

Kromě leštění a kalení lze elektronový svazek využít také k legování, při kterém jsou vytvářeny povrchové slitiny a povlaky s výrazně lepšími vlastnostmi oproti základnímu materiálu. [28]

### 3 AKTUÁLNÍ STAV VÝZKUMU V OBLASTI ELEKTRONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

Následující kapitola si dává za cíl seznámit čtenáře s aktuálním stavem výzkumu v oblasti svařování elektronovým svazkem. První podkapitola poskytuje přehled aktuálních studií, které se věnují dopadu jednoho nebo více nastavovaných parametrů na výsledek svařování. Následuje podkapitola věnovaná současným problémům a trendům v rámci elektronového svařování.

#### 3.1 Současný výzkum

Kar et al. [29] zkoumal vliv oscilací elektronového svazku na tupý svar desek z titanové slitiny Ti6Al4V. Kontrolována byla pórovitost vzniklých spojů, dále byla provedena únavová zkouška. Ukázalo se, že s oscilací paprsku se počet pórů snížil. Zároveň se zmenšila i jejich velikost. Dalším zvětšením průměru oscilace paprsku z 1 na 2 mm došlo k dalšímu snížení počtu pórů o 50 %. Zároveň se měnilo i jejich rozmístění. Bez oscilací se nacházely především v kořeni svaru, zatímco při použití oscilací se nacházely ve svaru rovnoměrně rozmístěné. Únavová zkouška prokázala více než dvojnásobnou životnost vzorků svařených s oscilacemi. Tato skutečnost se přičítá právě rovnoměrnějšímu rozmístění menších pórů.

Hosseini et al. [30] se zabýval vlivem svařovací rychlosti na vznik prasklin u hliníkové slitiny AW-2024-T351. Svařovací rychlost byla nastavena v rozsahu 15–40 mm/s. Pozorování mikrostruktury ukázalo zmenšování délky trhlin při zvyšující se rychlosti. Rostoucí rychlost (a tím menší tepelný příkon) měla za následek také zlepšení struktury zrna a zmírnění tepelného napětí.

Singh et al. [31] zkoumal proces svařování CuCrZr slitiny, a to jak experimentálně, tak pomocí numerické simulace. Cílem modelu byla predikce hloubky penetrace a šířky svaru jako funkce parametrů elektronového svařování – proudu svazku, urychlovacího napětí a rychlosti svařování. Srovnání modelu a experimentu prokázalo dobrou shodu. Jako nejvýznamnější parametr s největším vlivem na hloubku průvaru byl vyhodnocen proud svazku, následovaný svařovací rychlostí, a nakonec urychlovacím napětím. Proud měl zásadní vliv také na šířku svaru.

Vlivem tří výše zmíněných parametrů (proud svazku, urychlovací napětí a rychlost svařování) se zabýval také Sandhya et al. [32]. Zkoumaným materiálem byla titanová slitina Ti6Al4V. I v této studii byl jako nejvíce ovlivňující parametr vyhodnocen proud svazku.



Změna ovšem nastala v pořadí zbylých dvou parametrů, kdy byla jako nejméně zásadní označena rychlost svařování.

Li et al. [33] ve své práci řešil vliv fokusačního proudu na tvar svaru a zbytková napětí u slitiny Ti2AlNb. Byl vyvinut výpočetní model, který byl následně experimentálně ověřen. Vliv fokusačního proudu na tvar a velikost svaru byl vyhodnocen jako podstatný. Zároveň byla u provedených svarů zjištěna velká tahová napětí, jejichž velikost (a tím i riziko praskání) klesala s rostoucí šířkou svaru.

Choudhury a Chandrasekaran [34] posuzovali vliv čtyř parametrů (svařovací rychlosti, proudu svazku, urychlovacího napětí a oscilací) na plochu průřezu svaru ve slitině Inconel 825. Výsledky procesu byly predikovány dvěma různými modely a ověřeny experimentálně. V této studii vyšla jako dominantní parametr svařovací rychlost následovaná urychlovacím napětím a proudem svazku.

Raute et al. [35] zkoumal vliv svařovacích parametrů na geometrii svarů provedených ve slitině Inconel 718. Zvláštností studie je použití nízkých svařovacích rychlostí (rozsah 1–10 mm/s) a to z důvodu očekávaného pozitivního dopadu na vznik prasklin. Studovanými parametry svařování byly zvoleny proud svazku, rychlost svařování a fokusační proud. Jako parametr nejvíce ovlivňující šířku svaru byla vyhodnocena svařovací rychlost, hloubka svaru pak nejvíce závisela na proudu svazku. Fokusační proud pak ovlivňoval především tvar svaru.

Pavlík et al. [36] analyzoval vliv svařovacích parametrů na vlastnosti heterogenního svarového spoje mědi (Cu-ETP) a nerezové oceli AISI 304. Byly zhotoveny přeplátované spoje, testovanými parametry byly proud svazku, svařovací rychlost a oscilace svazku. Při použití vyššího proudu a oscilace svazku bylo dosaženo větší šířky svaru. Použití oscilace paprsku vedlo k výrazně lepší pevnosti v tahu, pozitivní vliv mělo také zvýšení hodnoty proudu a snížení svařovací rychlosti v kombinaci s oscilací paprsku.

Efektem oscilací se zabýval také Komerla et al. [37]. Zkoumaným materiálem byla v tomto případě nízkouhlíková feritická ocel S235JR a vysokopevnostní ocel DP1000. Prvním posuzovaným dopadem oscilací svazku byl vliv na profil svaru, kdy svary zhotovené za použití oscilace vykazovaly větší šířku a mírně menší hloubku. Tento efekt byl patrnější u vzorků menší tloušťky. Dále byla analyzována mikrostruktura a mechanické vlastnosti. Nebylo pozorováno výrazné ovlivnění mikrostruktury svaru, nicméně vliv na mechanické

vlastnosti byl patrný. Závěrem bylo doporučeno využívat oscilace svazku pro zlepšení životnosti výrobku (vyšší pevnost v tahu, nižší tvrdost a nižší zbytková napětí).

Tab. 3 Přehled aktuálního výzkumu

<b>Autor</b>	<b>Rok</b>	<b>Materiál</b>	<b>Testované parametry</b>
<b>Kar et al. [29]</b>	2019	Ti6Al4V	Oscilace svazku
<b>Hosseini et al. [30]</b>	2019	AW-2024-T351	Svařovací rychlost Proud svazku
<b>Singh et al. [31]</b>	2020	CuCrZr	Urychlovací napětí Svařovací rychlost Proud svazku
<b>Sandhya et al. [32]</b>	2022	Ti6Al4V	Urychlovací napětí Svařovací rychlost
<b>Li et al. [33]</b>	2019	Ti2AlNb	Fokusační proud Proud svazku
<b>Choudhury a Chandrasekaran [34]</b>	2020	Inconel 825	Urychlovací napětí Svařovací rychlost Oscilace svazku Proud svazku
<b>Raute et al. [35]</b>	2020	Inconel 718	Svařovací rychlost Fokusační proud Proud svazku
<b>Pavlík et al. [36]</b>	2022	Cu-ETP a AISI 304	Svařovací rychlost Oscilace svazku
<b>Komerla et al. [37]</b>	2019	S235JR a DP 1000	Oscilace svazku

Z výše uvedeného je patrné, že neexistuje jeden dominantní parametr ovlivňující proces elektronového svařování. Zároveň lze upozorovat, že výzkum probíhá především v oblasti svařování slitin neželezných kovů. Shrnutí nabízí tab. 3.

### 3.2 Klíčová témata, problémy a trendy

Patterson et al. [13] uvádí jako klíčové téma současného výzkumu v oblasti elektronového (a také laserového) svařování proces monitorování a kontroly svarů. I přes značný pokrok v technologii senzorů a softwaru v posledních dvou desetiletích, který vedl k vývoji účinnějších řídicích algoritmů, přetrvává řada problémů dodnes. Velkou výzvou představuje kontrola svaru v místě jeho vzniku. Dále upozorňuje na potenciál technologie laserového a elektronového svazku v oblasti aditivní výroby. Jako hlavní problém této oblasti označuje špatnou kontrolovatelnost a nekonzistentnost procesu vlivem omezené charakterizace paprsku v pracovním prostoru. Dále zmiňuje nutnost pochopení změn vlastností paprsku na různých strojích.

Weglowski et al. [16] označuje jako hlavní úspěchy posledních let pokrok v produktivitě, konstrukci strojů a aplikaci elektronového svazku do dalších technologií. Zdůrazňuje důležitost produktivity v automobilovém průmyslu a její přímou souvislost právě s konstrukcí elektronové svářečky. Hlavním cílem v rámci vývoje konstrukce je zkrácení neproduktivního času čerpání nutného k dosažení vakua a také zlepšení řídicího systému stroje. Dále jsou definovány požadavky na takový systém, mezi něž patří:

- kinematická flexibilita,
- minimalizace počtu mechanických rozhraní,
- spolehlivost a nenáročná údržba,
- nízké emise hluku,
- nízké investiční a provozní náklady.

V případě univerzálních elektronových svářeček uvádí hlavní zaměření vývoje na řídicí systém a nástroje, dále pak na:

- systém sledování svarů v reálném čase s možností přizpůsobení parametrů svazku, zatímco dochází ke svařování součásti,
- zobrazování pomocí zpětně rozptýlených elektronů,

- zajištění kvality systémem monitorujícím základní funkce během svařování a hlásícím zaznamenané chyby,
- rychlovýměnné nástroje.

K položkám budoucího vývoje v rámci elektronového svařování řadí:

- dynamické posuvné těsnění pro elektronové svářečky,
- svařování se sníženým tlakem,
- tvarování a analýzu svazku zahrnující automatickou kalibraci fokusace, velikosti proudu a vyrovnání svazku,
- vylepšenou elektronovou optiku pro vysoce výkonné elektronové dělo,
- konstrukci stroje pro aditivní technologie využívající systém podávání drátu.

Siddharth a Narayanan [19] popisují trendy vývoje elektronového svařování ve dvou oblastech – konstrukci elektronového děla a metodě svařování se sníženým tlakem, označované zkratkou RPEBW (z angl. Reduced Pressure Electron Beam Welding). Za problémy v současnosti používaných elektronových děl označují krátkou životnost vlákna katody, zvlnění napětí paprsku a špatnou reprodukovatelnost svazku. Jako řešení navrhují změnu konstrukce elektronového děla z triodového na diodové s nepřímým ohřevem. Důsledkem takového řešení je ovšem snížení proudu svazku.

Zásluhu na postupném rozšiřování metody RPEBW připisují zejména vývoji systémů pracujících s napětím 200 kV schopných pracovat v rozsahu tlaků 1000 mbar až 0,01 mbar s použitím různě čerpaných stupňů v rámci elektronové svářečky. Jako přednosti této technologie uvádějí především snížení četnosti problémů s netěsnostmi a možnosti zbavení se velkých vakuových komor. Dále uvádějí možnost používání jednodušších mechanických vývěv pro dosažení tlaku okolo 1 mbar.

Liu et al. [38] vyzdvihuje výhodnost použití technologie elektronového svařování v kosmickém prostředí především z důvodu přítomnosti vakua a aplikovatelnosti metody pro svařování leteckých materiálů a považuje ji za jednu z nejslibnějších svařovacích technologií v oblasti kosmonautiky. Zmiňuje možnost vývoje multifunkčního zařízení pracujícího s elektronovým svazkem využitelného pro instalaci a opravy stanic v kosmickém prostředí, které by sloužilo nejen ke svařování. Zároveň upozorňuje na existenci řady komplikací např. potřebu produkovat hluboké a zároveň tvarově složité svary

u součástí velkých rozměrů. Dále zdůrazňuje nutnost studia ochrany zdraví astronautů pracujících s takovýmto zařízením proti vznikajícímu rentgenovému záření a odvodu tepla ze svaru.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je posouzení vlivu několika vybraných parametrů elektronového svazku na geometrii svaru. Za tímto účelem bude provedena série experimentů na vzorcích z korozivzdorné oceli 1.4301. Svařování proběhne na stolní elektronové svářečce MEBW 60/2-E vyvinuté a umístěné na Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně. Následovat bude příprava metalografického výbrusu pro pozorování svarů pomocí optického mikroskopu s možností zaznamenávání snímků. Pořízené snímky budou dále analyzovány a získané výsledky diskutovány. Na závěr bude na základě výsledků navržen obecný postup optimalizace nastavení svařovacího procesu.

## 5 ZKOUMANÝ MATERIÁL

Materiálem pro výrobu vzorků byla ocel 1.4301. Jedná se o austenitickou chromniklovou ocel s vysokou odolností proti korozi. Chemické složení lze nalézt v tab. 4.

Tab. 4 Chemické složení oceli 1.4301 (hmotnostní podíl v %) [39]

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,10	17,5–19,5	8,0–10,5

Tento materiál je vhodný pro svařování, kování a tváření za studena a má dobrou lešitelnost. Nalézá uplatnění v různých průmyslových odvětvích, např. ve výrobě kontejnerů, konstrukci domácích spotřebičů a nábytkářském průmyslu. Mezi další oblasti použití se řadí automobilový průmysl, přístrojová technika, sanitární technika, chemický průmysl, architektura a stavebnictví. [39]

Ocel 1.4301 disponuje vynikající korozivzdorností v přirozeném prostředí bez významné koncentrace chloridů nebo kyselin. Je snadno svařitelná s přídavným materiálem i bez něj, tepelné zpracování po svařování není nutné. Při svařování však materiál není odolný vůči mezikrystalické korozi. [39; 40]



## 6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Kapitola se věnuje popisu přípravy vzorků pro měření geometrie svaru. Celý proces včetně následného měření probíhal v Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.

### 6.1 Polotovary vzorků

Polotovary pro přípravu vzorků byly dodány v podobě destiček o rozměru  $30 \times 20$  mm s různou tloušťkou (5, 10 a 15 mm). Tělíska s nejmenší tloušťkou byla zhotovena pouhým řezáním na pile. Povrch plochy, na kterou bude dopadat elektronový svazek, zůstal neobrobený. U destiček tloušťky 10 a 15 mm byla dopadová plocha obrobena frézováním.

### 6.2 Svářečka MEBW 60/2-E

Jedná se o stolní elektronovou svářečku vyvinutou na ÚPT v Brně. Jako katoda se používá wolframový drát o průměru 0,15 mm. Válcová pracovní komora je vybavena polohovacím manipulátorem umožňujícím vertikální posuv svařence a rotaci okolo osy Z. Průběh svařování lze pozorovat nejen přes okno z olověného skla, ale také pomocí detektorů zpětně odražených elektronů. Parametry svářečky jsou uvedeny v tab. 5, fotografie svářečky se nachází na obr. 22.



Obr. 22 Elektronová svářečka MEBW 60/2-E

Tab. 5 Parametry elektronové svářečky MEBW 60/2-E [41; 42]

Parametr	Hodnota
Maximální urychlovací napětí	60 kV
Maximální výkon	2 kW
Vakuum	$4 \times 10^{-2}$ Pa
Průměr pracovní komory	235 mm
Hloubka pracovní komory	165 mm
Velikost rozsahu pohybu svařencem v ose Z	120 mm
Rozsah rychlosti rotace okolo osy Z	0–32 min <sup>-1</sup>

### 6.3 Sady vzorků

Cílem diplomové práce je určit vliv různých parametrů elektronového svazku na geometrii svaru. Parametry, jejichž vliv bude zkoumán, jsou:

- proud svazku,
- fokusační proud,
- svařovací rychlost,
- pracovní vzdálenost,
- oscilace svazku (velikost jejich radiusu a frekvence).

Pro vyhodnocení vlivu výše zmíněných parametrů na geometrii svaru bylo potřeba zhotovit několik sad vzorků. Každá sada je zaměřena na posouzení dopadu určitého parametru (nebo parametrů), přičemž ostatní parametry zůstávají neměnné.

#### 6.3.1 Sada č. 1

Sada č. 1 se věnuje zkoumání vlivu proudu svazku a fokusačního proudu. Cílem je nalezení optimálního fokusačního proudu  $I_F$  pro daný proud svazku  $I$  (2 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA a 20 mA) a následné porovnání rozměrů svarů zhotovených pro různé  $I$  při optimálním  $I_F$ . Výchozí hodnota fokusačního proudu pro první svar byla určena následovně:

$$I_{F1} = I_{FTV} - 10, \quad (2)$$

kde:

$I_{FI}$  – fokusační proud prvního svaru,

$I_{FTV}$  – fokusační proud, při němž byl pozorován nejostřejší obraz vzorku na monitoru.

Pro každý další svar byla tato hodnota dále snížena o 2 mA. Celkem bylo takto provedeno 12 svarů pro každý proud svazku  $I$ . V případě proudu  $I = 20$  mA se tento rozsah ukázal jako nedostatečný a bylo potřeba jej rozšířit.

### 6.3.2 Sada č. 2

Sada č. 2 sleduje závislost geometrie svaru na rychlosti svařování  $WS$  při dvou různých proudech svazku  $I$  (5 mA a 15 mA). Rychlost svařování byla nastavována v rozsahu 5–32,5 mm/s s krokem 2,5 mm/s. Celkem tedy bylo zhotoveno opět 12 svarů pro každý proud  $I$ .

### 6.3.3 Sada č. 3

Sada č. 3 se zaměřuje na vliv pracovní vzdálenosti  $WD$ . Se změnou pracovní vzdálenosti bylo opět nutné nalézt optimální fokusační proud. Obě předchozí sady vzorků byly svařovány s povrchem destičky umístěným ve středu pracovní komory svářečky. Tato pracovní vzdálenost byla označena jako  $WD = 0$  mm a bylo při ní zhotoveno 6 svarů v okolí optimálního  $I_F$  ze sady č. 1 pro proud svazku  $I = 5$  mA. Poté byla pracovní vzdálenost změněna na  $WD = -30$  mm (tj. o 30 mm blíže k elektronovému dělu), respektive na  $WD = +30$  mm (tj. o 30 mm dále od el. děla). Pro obě nové pracovní vzdálenosti byl nalezen optimální fokusační proud stejným postupem jako u sady č. 1.

### 6.3.4 Sada č. 4

Sada č. 4 je věnována dopadu oscilací paprsku na geometrii svaru. Použité oscilace jsou kruhové, proměnnými parametry jsou jejich velikost a frekvence. Poloměr oscilací byl zvolen v rozsahu 0–0,5 mm s krokem 0,1 mm, použité frekvence byly 50 Hz, 250 Hz a 500 Hz. Pro každou frekvenci bylo tedy připraveno 6 svarů s rozdílnou velikostí rádiusu oscilace.

## 6.4 Postup svařování vzorků

Před samotným svařováním bylo nutné dodané polotovary důkladně odmastit a očistit. To bylo provedeno pomocí ultrazvukové čističky, použitou kapalinou byl isopropylalkohol. Čištění probíhalo po dobu cca 5 minut, následně byly destičky vytaženy a usušeny stlačeným vzduchem. Po čištění již bylo se vzorky manipulováno pouze v rukavicích, případně za použití pinzety.

Dalším krokem před zahájením svařování byla příprava svářečky. Ta spočívala především ve výměně katody. Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o wolframový drát o průměru 0,15 mm, lze jej spatřit na obr. 23.



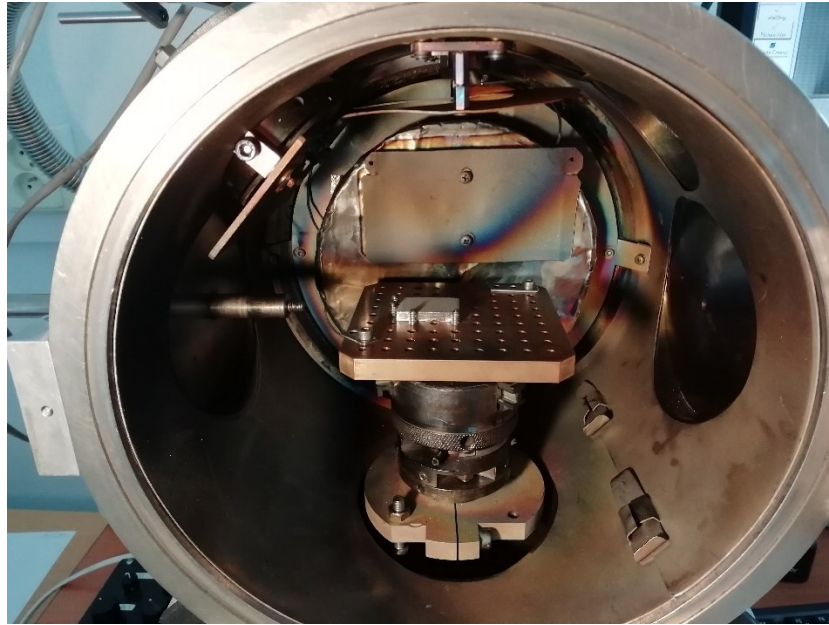
Obr. 23 Rozmontovaný držák katody během její výměny

Po výměně katody je potřeba provést její centrování. To se provádí již při vyčerpané komoře (vakuum), a to mechanicky pomocí 4 šroubů (viz obr. 24), případně elektronicky pomocí ovládacího pultu.



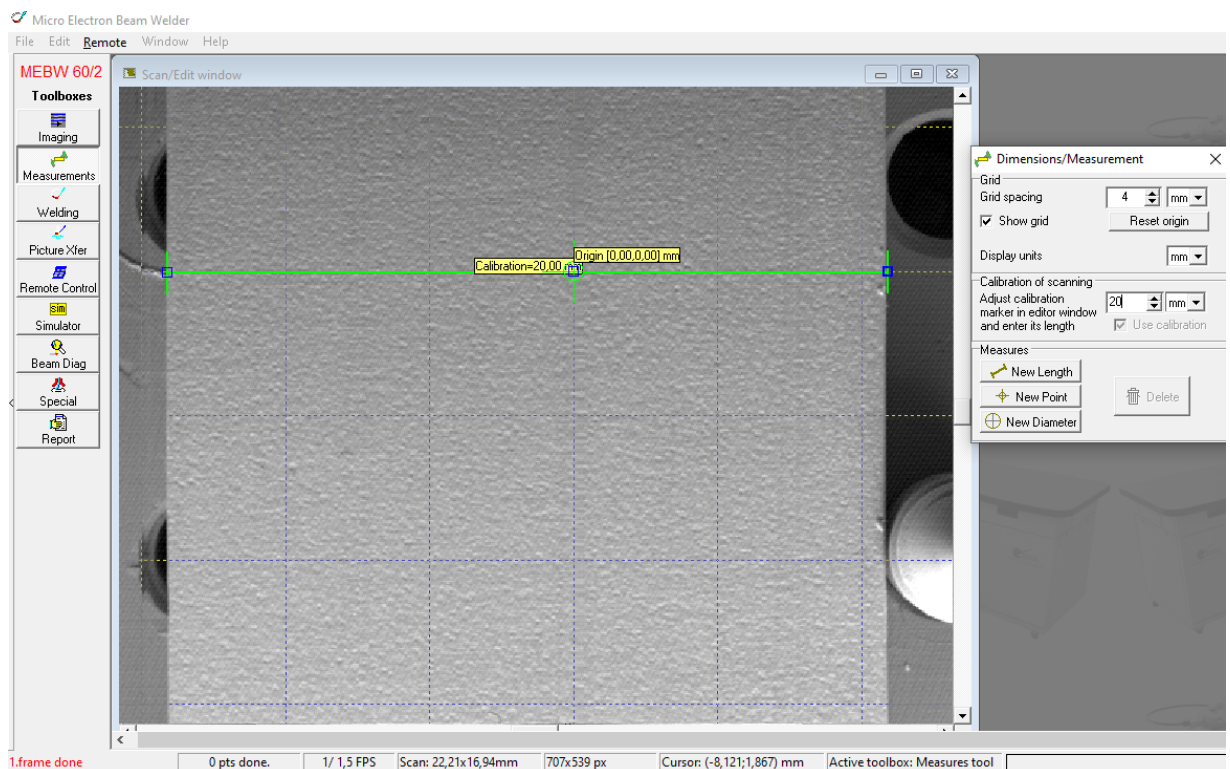
Obr. 24 Šrouby pro středění katody

Poloha vzorku v pracovní komoře svářečky byla zajištěna jednoduchým přípravkem složeným z měděné podstavy a čtveřice šroubů (obr. 25).



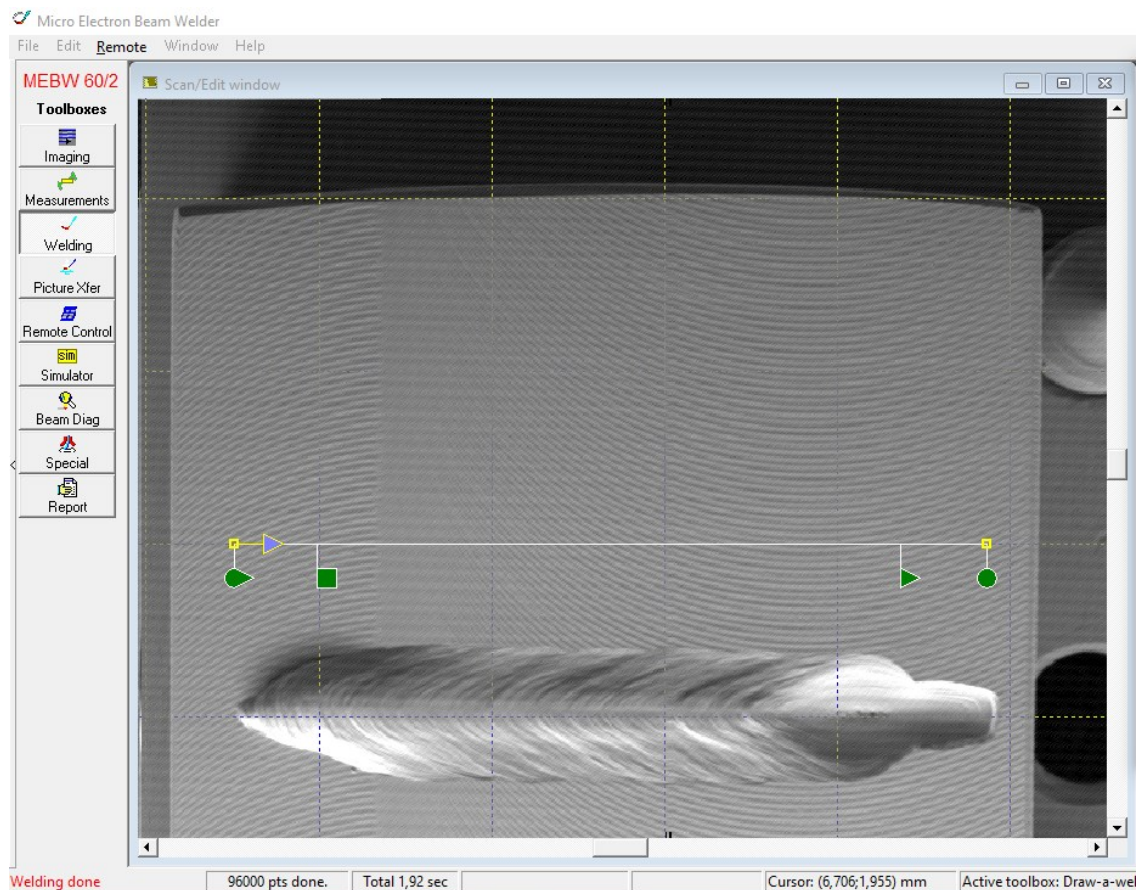
Obr. 25 Vzorek umístěný v pracovní komoře svářečky

Svařování bylo řízeno pomocí počítače. Před zhotovením prvního svaru je třeba provést kalibraci (obr. 26). Povrch svařované součásti je naskenován a následně je použita úsečka pro označení libovolného viditelného prvku známých rozměrů. V tomto případě jím byla šířka vzorku o velikosti 20 mm.



Obr. 26 Kalibrace rozměrů před svařováním

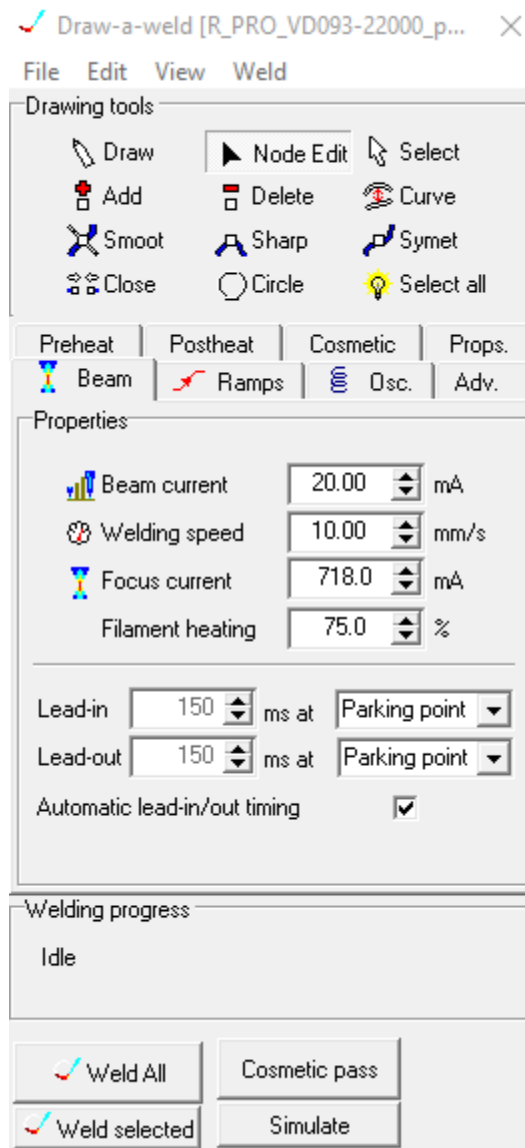
Po kalibraci rozměrů byla pomocí funkce Draw a weld nakreslena dvěma body trajektorie pro svařování (obr. 27). Svar byl umístěn tak, aby svazek vycházející z elektronového děla dopadal co nejvíce kolmo na povrch destičky. K tomu byl využit počátek souřadného systému (Origin) viditelný na obr. 26 a také mřížka (Grid), která tímto bodem prochází. Mřížka dále sloužila k dodržení rozteče mezi jednotlivými svary.



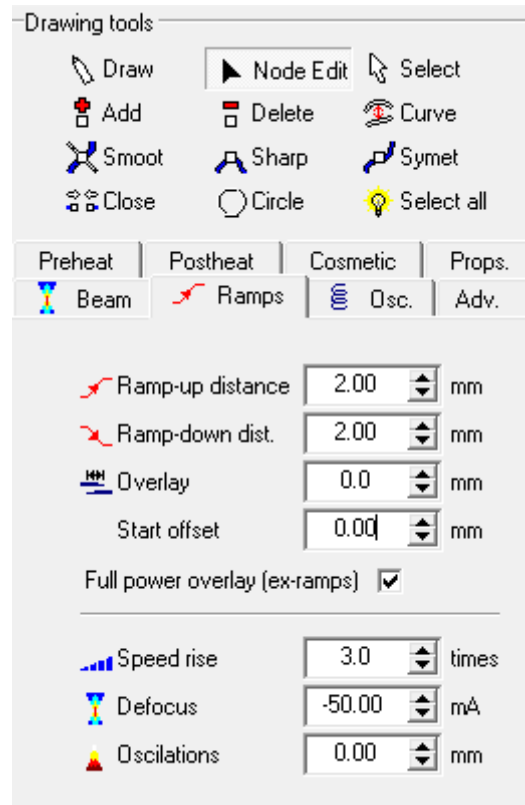
Obr. 27 Dráha svaru nakreslená v prostředí Draw a weld

V prostředí Draw a weld lze kromě návrhu a editace dráhy svařování nastavovat také další parametry svařování. Pro potřeby práce byly využity 3 z celkových 8 dostupných záložek. Konkrétně se jednalo o záložky obsahující:

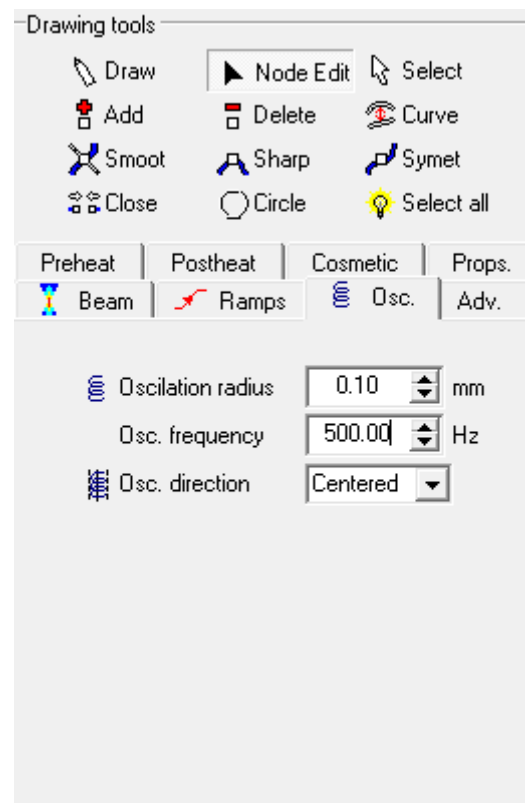
- parametry svazku (Beam) – nastavení velikosti proudu svazku, svařovací rychlosti, fokusačního proudu a žhavení katody, viz obr. 28;
- rampy (Ramps) – náběh a výběh od svaru, pro všechny svary byly použity stejné parametry, viz obr. 29 a také obr. 27, kde jsou rampy odděleny od střední části svaru zeleným čtvercem a trojúhelníkem;
- oscilace (Osc.) – nastavení velikosti, frekvence a směru oscilace svazku, pro sady vzorků 1 až 3 bylo toto nastavení neměnné, viz obr. 30.



Obr. 28 Nastavení parametrů el. svazku



Obr. 29 Nastavení ramp



Obr. 30 Nastavení oscilace svazku



Po nastavení všech parametrů byl proveden svar. Celý proces svařování je možné shrnout do následujících kroků.

- Umístění destičky na podstavu přípravku a opření o šrouby.
- Zavření pracovní komory svářečky a vyčkání na její vyčerpání (cca 3 min).
- Zapnutí vysokého napětí a žhavení katody.
- Posunutí elektronového děla posuvným mechanismem o požadovanou rozteč mezi svary.
- Kontrola správné polohy skenování.
- Nastavení a kontrola svařovacích parametrů.
- Provedení svaru.
- Vypnutí žhavení katody a vysokého napětí, zastavení vakuových vývěv.
- Vyčkání na zavzdušnění pracovní komory, otevření komory a vyjmutí vzorku.

Vzorek byl po každém provedeném svaru vyjmut ven z komory a volně ochlazován na teplotu okolního vzduchu. Během ochlazování probíhalo svařování jiného vzorku.

Hotové vzorky zobrazuje obr. 31. Mezi svary byla zvolena rozteč o velikosti 4 mm, mezi 3. a 4. svarem 6 mm z důvodu řezání vzorků v tomto místě při přípravě metalografického výbrusu.



Obr. 31 Sada tří vzorků opatřených svary

## 7 MĚŘENÍ GEOMETRIE SVARŮ

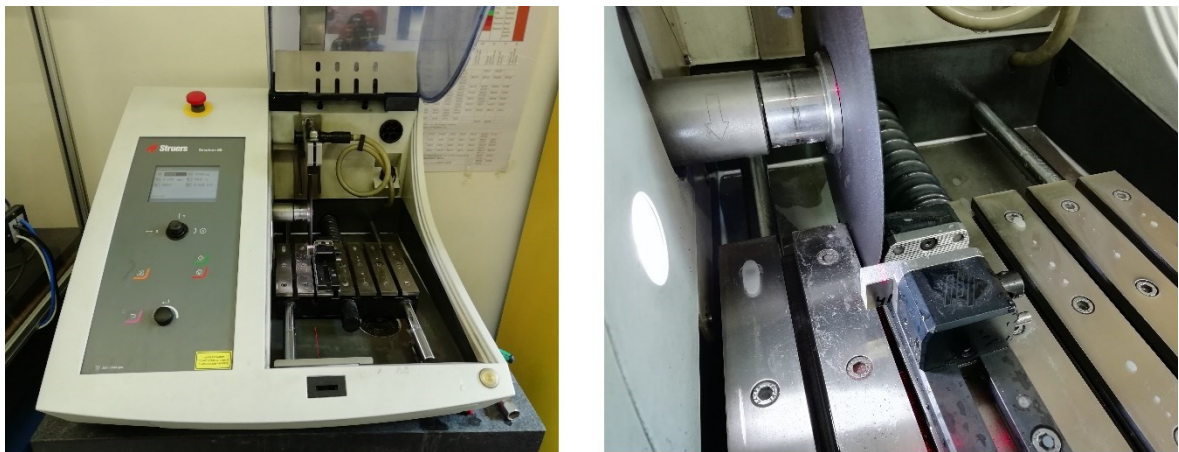
Následující kapitola se věnuje popisu určení geometrie svarů připravených elektronovým svazkem. Prvním krokem byla příprava metalografického výbrusu, následovalo pozorování pod mikroskopem, pořízení snímků a jejich analýza.

### 7.1 Příprava metalografického výbrusu

Příprava metalografického výbrusu se sestává z následujících kroků:

- rozřezání vzorků na pile,
- zalití vzorků,
- broušení a leštění,
- leptání.

Prvním krokem přípravy výbrusu bylo řezání vzorků na pile. Vzorky byly postupně řezány na metalografické rozbrušovací pile Struers Secotom-60 osazené kotoučem 50A20 (obr. 32). Každý vzorek byl rozřezán ve dvou na sebe kolmých rovinách tak, aby jej bylo možné zalít do pryskyřice. Během řezání byl kotouč chlazen vodou.



Obr. 32 Vlevo pila Struers Secotom-60, vpravo detail na upnutý vzorek před řezáním. Poté, co byly vzorky nařezány, následovalo jejich zalévání do pryskyřice. To se provádí z důvodu usnadnění manipulace se vzorkem během následujících operací. Konkrétně byl použit materiál s obchodním názvem MultiFast. Jedná se o fenolickou pryskyřici s dřevěným plnivem černé barvy. Je určena pro všeobecné použití. [43] Zalévání probíhalo na lisu Struers CitoPress-1 (na obr. 33).



Obr. 33 Lis Struers CitoPress-1

Dalším krokem bylo broušení a leštění vzorků. To probíhalo na metalografické leštičce Struers Tegramin-20 (obr. 34) umožňující broušení čtveřice vzorků najednou. Postupně byly použity kotouče zrnitosti 220, 500, 1200 a 4000, do broušeného místa byla přiváděna voda. Následovalo leštění za použití leštících kotoučů a diamantové pasty s velikostí zrn 3, 1 a 0,25  $\mu\text{m}$ .



Obr. 34 Metalografická leštička Struers Tegramin-20

Poslední operací před pozorováním geometrie svarů bylo leptání. Složení zvoleného leptadla zobrazuje tab. 6, jedná se o směs síranu měďnatého, kyseliny chlorovodíkové a destilované

vody. Leptání spočívalo v ponoření celé pozorované plochy vyleštěných vzorků (obr. 35) do leptadla po dobu 3 sekund, během které bylo se vzorkem pohybováno. Následovalo vytažení vzorku, opláchnutí isopropylalkoholem a sušení proudem teplého vzduchu.



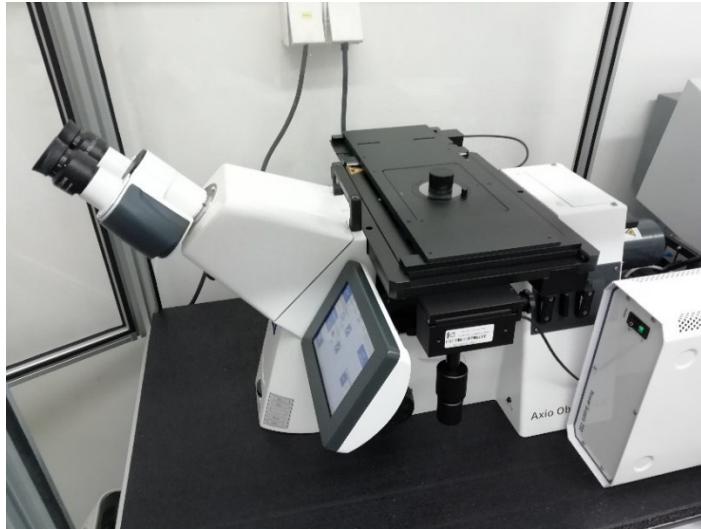
Obr. 35 Vyleštěné vzorky připravené na leptání

Tab. 6 Složení použitého leptadla

Sloučenina	Množství
$\text{CuSO}_4$	2 g
HCl	10 ml
$\text{H}_2\text{O}$	10 ml

## 7.2 Použitý mikroskop a software

Pro pozorování geometrie svarů byl použit inverzní mikroskop ZEISS Axio Observer (na obr. 36). Jedná se o optický mikroskop. Tento mikroskop se na ÚPT využívá jak pro pozorování makrostruktury, tak i mikrostruktury materiálů. Zařízení je propojeno s počítačem pomocí softwaru ZEISS ZEN core. Přímou při pozorování je tak možné pořizovat a ukládat snímky, měřit rozměry atd. V rámci této práce byl ZEN core použit pro zaznamenání snímků, které byly uloženy ve formátu CZI. Samotná analýza snímků probíhala z důvodu vytížení laboratoře na jiném počítači v softwaru ZEISS ZEN lite. Jde o bezplatný software pro prohlížení a základní analýzu souborů CZI. Pro potřeby této diplomové práce plně dostačoval.

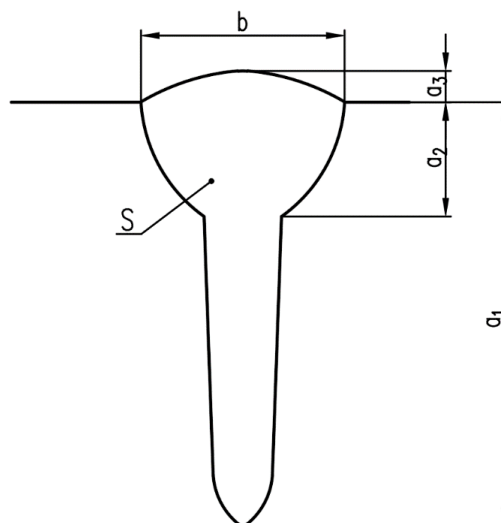


Obr. 36 Mikroskop ZEISS Axio Observer

### 7.3 Postup měření

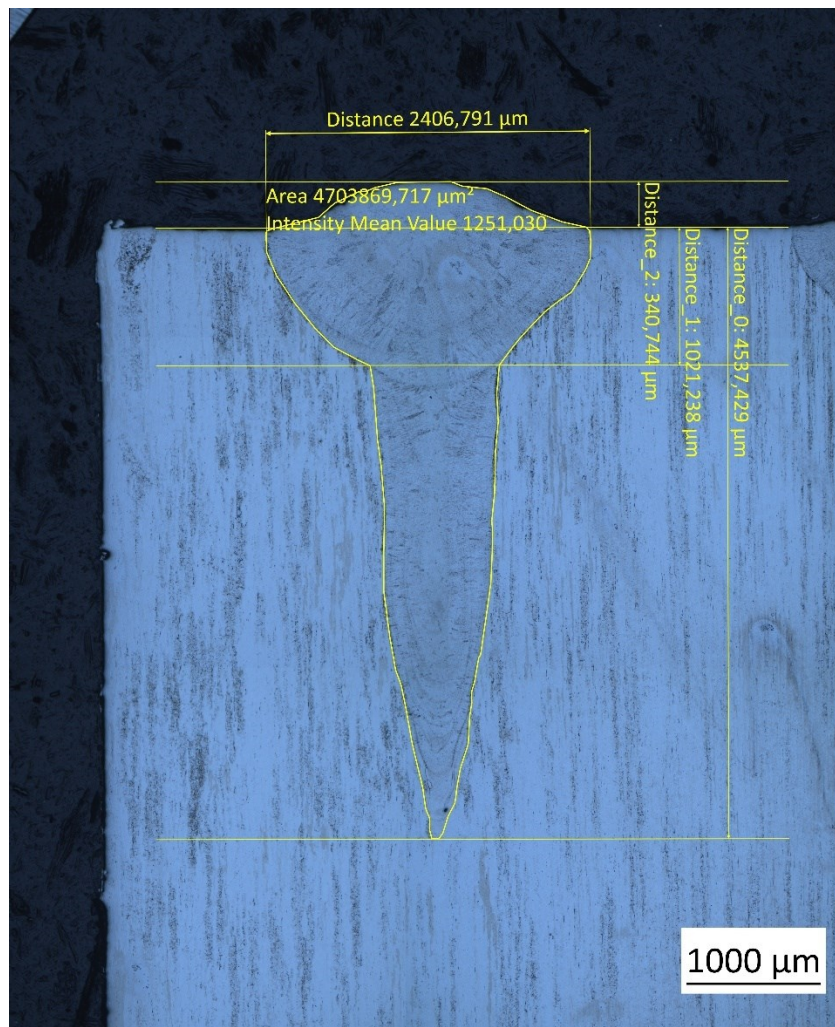
Pomocí softwaru ZEN lite byly u svarů měřeny rozměry znázorněné na obr. 37. Byly jimi:

- $a_1$  – hloubka kořene svaru od povrchu vzorku;
- $a_2$  – hloubka hlavy svaru, byla měřena u svarů s viditelnou hlavou, v případě nesymetrie byla měřena její hlubší část;
- $a_3$  – převýšení hlavy svaru, bylo měřeno jen pokud dosahovalo velikosti alespoň 0,1 mm;
- $b$  – největší šířka svaru;
- $S$  – celková svarová plocha.



Obr. 37 Měřené rozměry

Pro zjištění rozměrů  $a_1$ ,  $a_2$  a  $a_3$  byla použita funkce měření Multidistance umožňující měření více rozměrů od jedné společné přímky. Tou byl povrch vzorku. Šířka  $b$  byla měřena funkcí Length, která měří vzdálenost mezi dvěma body. Příkaz Contour (Polygon) byl použit pro zjištění velikosti plochy  $S$ . Příklad výsledného snímku je zobrazen na obr. 38.



Obr. 38 Příklad snímku se zaznamenanými rozměry

## 8 VÝSLEDKY A JEJICH DISKUSE

Kapitola seznamuje čtenáře s výsledky získanými analýzou snímků geometrie jednotlivých svarů. Získaná data jsou prezentována v tabulkové a grafické podobě doplněná komentářem.

### 8.1 Sada vzorků č.1

První sada vzorků byla zaměřena na nalezení závislosti geometrie svaru na fokusačním proudu  $I_F$ . Za optimální  $I_F$  byl považován ten, při jehož použití bylo dosaženo největší hloubky kořene svaru (označené  $a_1$ ).

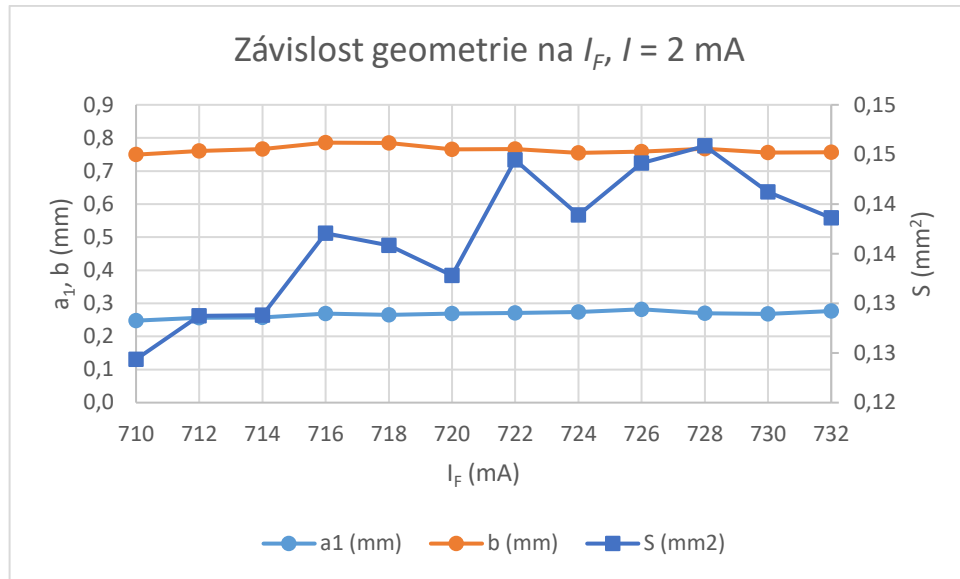
#### 8.1.1 Vliv fokusačního proudu při $I = 2$ mA

Tab. 7 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $I = 2$  mA

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
1	732	<b>0,28</b>	0,76			0,14
2	730	0,27	0,76			0,14
3	728	0,27	0,77			0,15
4	726	<b>0,28</b>	0,76			0,14
5	724	0,27	0,75			0,14
6	722	0,27	0,77			0,14
7	720	0,27	0,77			0,13
8	718	0,27	0,79			0,14
9	716	0,27	0,79			0,14
10	714	0,26	0,77			0,13
11	712	0,26	0,76			0,13
12	710	0,25	0,75			0,12

Parametry el. svazku:

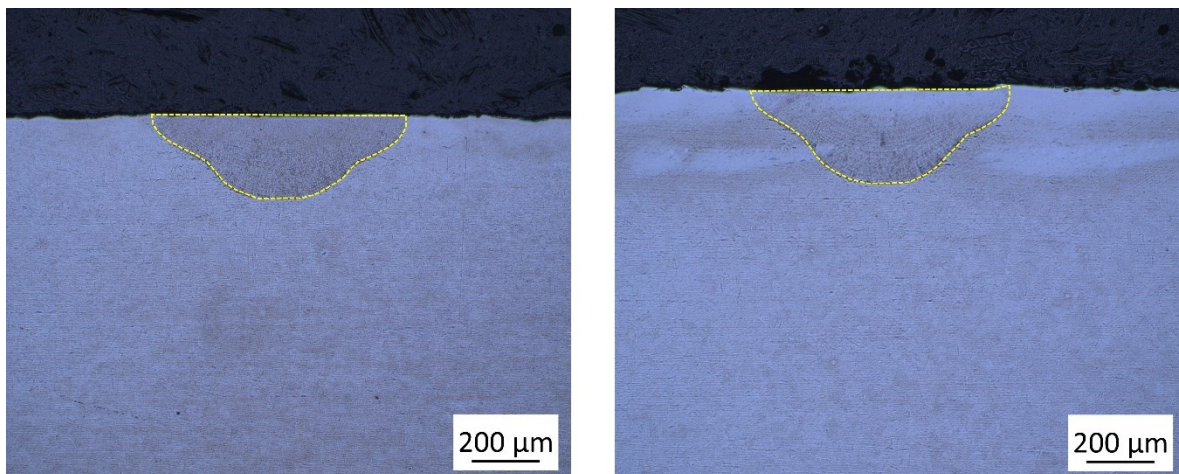
- $I = 2$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = 0$  mm (střed komory)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 742$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 693 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm



Obr. 39 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 2$  mA

Jak je patrné z tab. 7 a grafu na obr. 39, geometrie svaru se při proudu svazku o velikosti 2 mA změnou fokusačního proudu příliš neměnila. Situace je nejspíše zapříčiněna příliš malými rozměry svarů, při nichž nelze očekávat velké změny. Pro zvětšení rozdílu mezi jednotlivými svary by bylo vhodné např. snížit rychlost svařování. Největší naměřené hloubky 0,28 mm bylo dosaženo při  $I_F = 726$  mA a 732 mA.

Zároveň nebyla pozorována ani výraznější změna profilu svaru, viz obr. 40.



Obr. 40 Porovnání svarů při  $I = 2$  mA, vlevo  $I_F = 710$  mA, vpravo  $I_F = 732$  mA



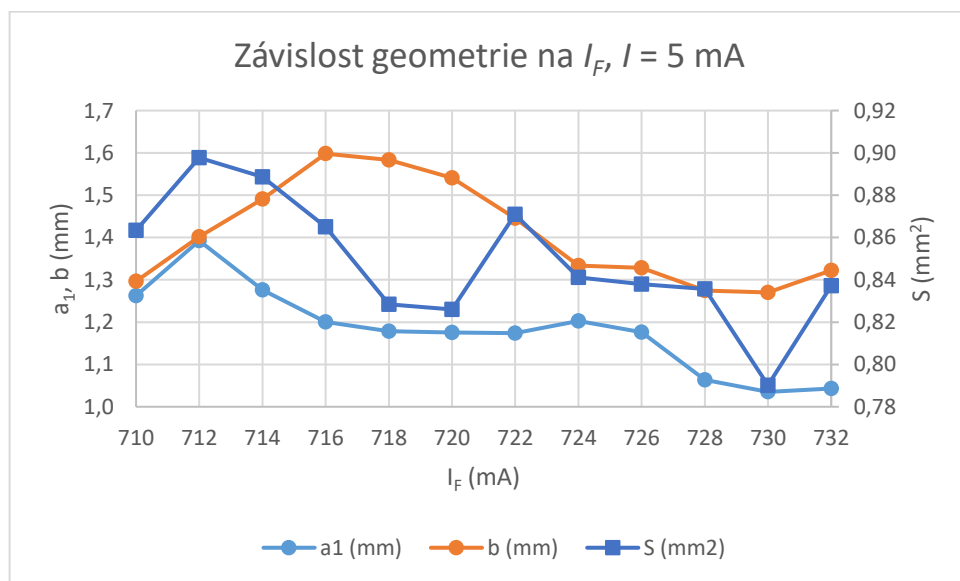
8.1.2 Vliv fokusačního proudu při  $I = 5 \text{ mA}$ 

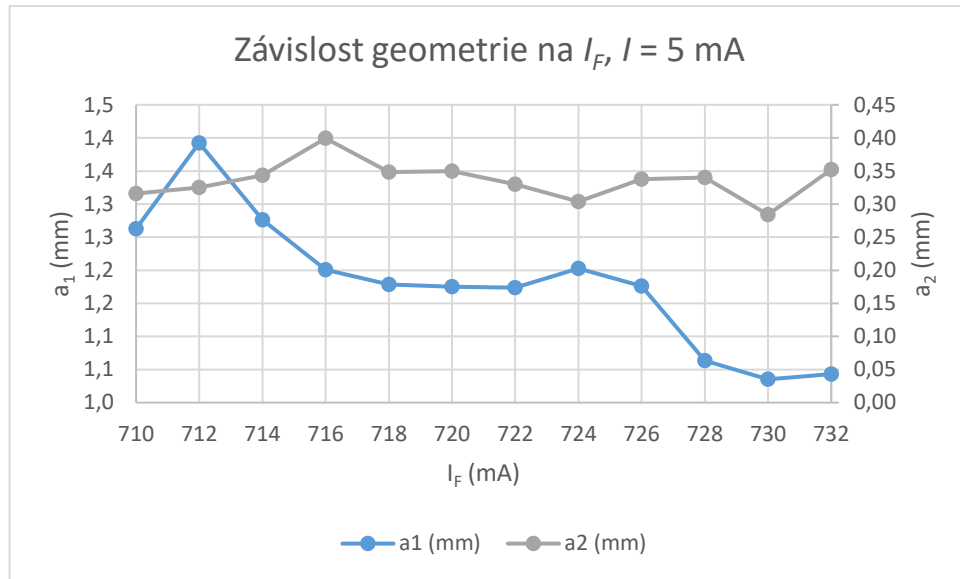
 Tab. 8 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $I = 5 \text{ mA}$ 

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
13	732	1,04	1,32	0,35		0,84
14	730	1,04	1,27	0,28		0,79
15	728	1,06	1,27	0,34		0,84
16	726	1,18	1,33	0,34		0,84
17	724	1,20	1,33	0,30		0,84
18	722	1,17	1,45	0,33		0,87
19	720	1,18	1,54	0,35		0,83
20	718	1,18	1,58	0,35		0,83
21	716	1,20	1,60	0,40		0,87
22	714	1,28	1,49	0,34		0,89
23	712	1,39	1,40	0,32		0,90
24	710	1,26	1,30	0,32		0,86

Parametry el. svazku:

- $I = 5 \text{ mA}$
- $WS = 10 \text{ mm/s}$
- $WD = 0 \text{ mm}$  (střed komory)
- $U = 55 \text{ kV}$
- $I_{FTV} = 742 \text{ mA}$
- předpětí Wehneltova válce: 693 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

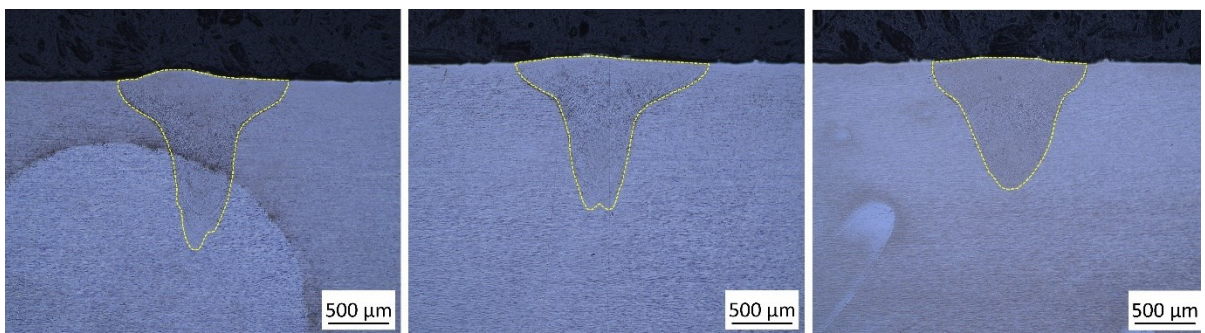

 Obr. 41 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 5 \text{ mA}$



Obr. 42 Graf závislosti velikosti  $a_1$  a  $a_2$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 5$  mA

Z tab. 8 a grafů na obr. 41 a obr. 42 je patrné, že při proudu svazku o velikosti 5 mA se již změna fokusačního proudu projevuje výrazněji, než tomu bylo v přechozím případě. Maximální hloubka  $a_1 = 1,39$  mm byla dosažena při  $I_F = 712$  mA. Při stejném fokusačním proudu bylo dosaženo také maximální plochy průřezu svaru  $S$ . To samé však neplatí pro hloubku hlavy  $a_2$  a šířku svaru  $b$ , jejichž maximum se v grafu nachází více vpravo, směrem k vyšším hodnotám  $I_F$ .

Se vzdalováním se od optimálního zaostření svazku lze pozorovat také změny ve tvaru svarové plochy (obr. 43). Svar provedený při fokusačním proudu velikosti 730 mA má oproti „optimálnímu“ svaru kromě menší dosažené hloubky viditelně širší kořen a tím méně výraznou hlavu svaru.



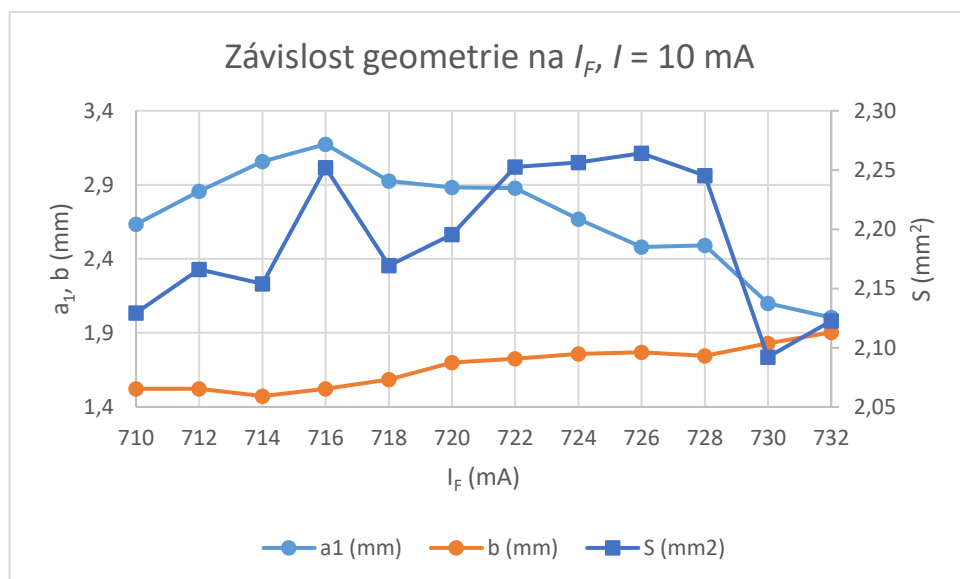
Obr. 43 Porovnání svarů při  $I = 5$  mA, zleva  $I_F = 712$  mA, 716 mA a 730 mA

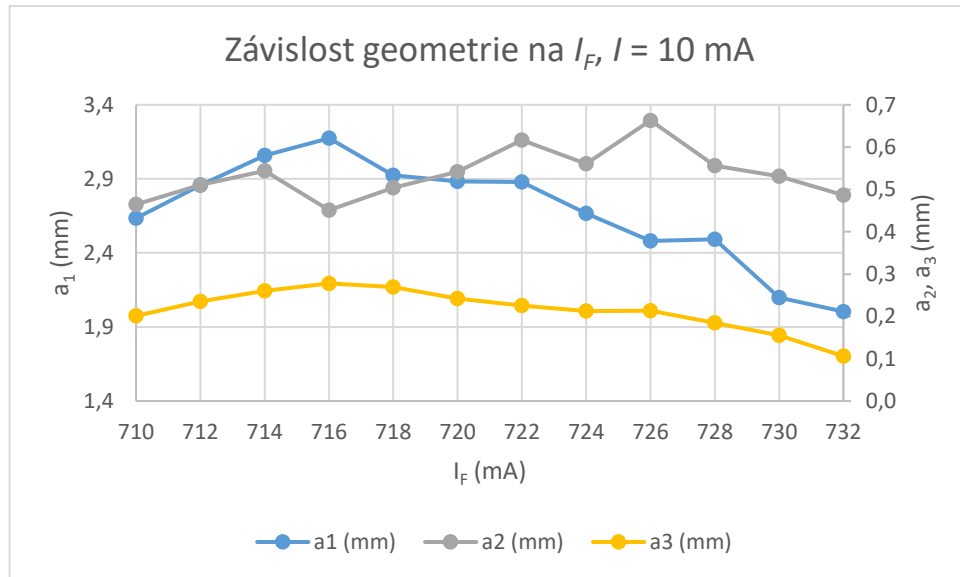
8.1.3 Vliv fokusačního proudu při  $I = 10$  mATab. 9 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $I = 10$  mA

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
25	732	2,00	1,90	0,49	0,11	2,12
26	730	2,10	1,83	0,53	0,15	2,09
27	728	2,49	1,75	0,56	0,18	2,25
28	726	2,48	1,77	0,66	0,21	2,26
29	724	2,67	1,76	0,56	0,21	2,26
30	722	2,88	1,73	0,62	0,23	2,25
31	720	2,88	1,70	0,54	0,24	2,20
32	718	2,92	1,59	0,50	0,27	2,17
33	716	<b>3,17</b>	1,52	0,45	0,28	2,25
34	714	3,06	1,47	0,54	0,26	2,15
35	712	2,86	1,52	0,51	0,24	2,17
36	710	2,63	1,52	0,46	0,20	2,13

Parametry el. svazku:

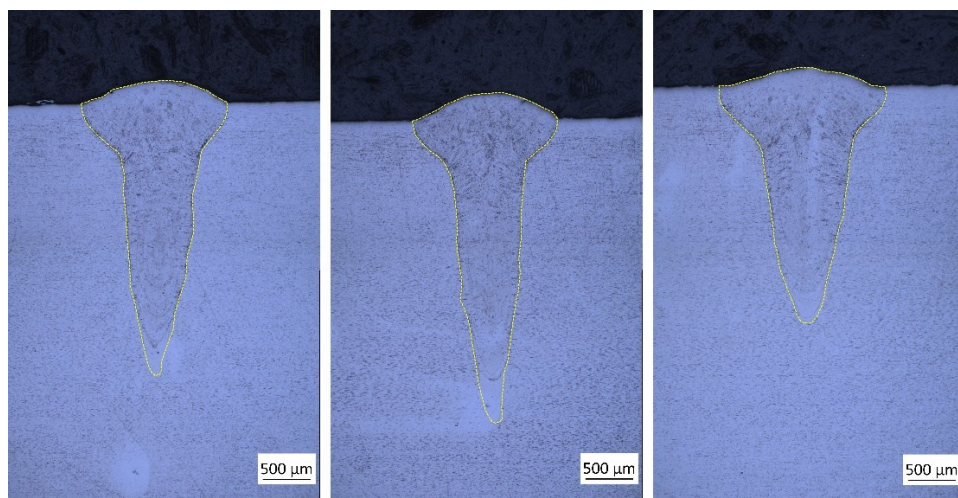
- $I = 10$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = 0$  mm (střed komory)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 742$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 742 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

Obr. 44 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 10$  mA



Obr. 45 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $a_2$  a  $a_3$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 10$  mA

Z tab. 9 je patrné, že při proudu svazku  $I = 10$  mA již dochází vlivem změny fokusace k patrným rozdílům v dosažené hloubce průvaru. Rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou dosahuje rozdílu většího než 1 mm. Maximální hodnoty  $a_1 = 3,17$  mm bylo dosaženo při  $I_F = 716$  mA. Také velikost plochy  $S$  se zde blíží ke svému maximu. Naopak šířka  $b$  při této konfiguraci nabývá jednu z nejnižších hodnot. Se zvyšováním  $I_F$  její hodnota roste (obr. 44 a obr. 46). Křivka znázorňující průběh závislosti převýšení  $a_3$  na  $I_F$  téměř kopíruje tvar křivky  $a_1$  a nabývá maxima při stejné hodnotě  $I_F$  (obr. 45). To samé se ale nedá prohlásit o hloubce hlavy  $a_2$ . Nutno ovšem podotknout, že její měření bylo u některých svarů obtížné, přechod mezi hlavou a kořenem byl u části svarů pozvolný bez jasné hranice.



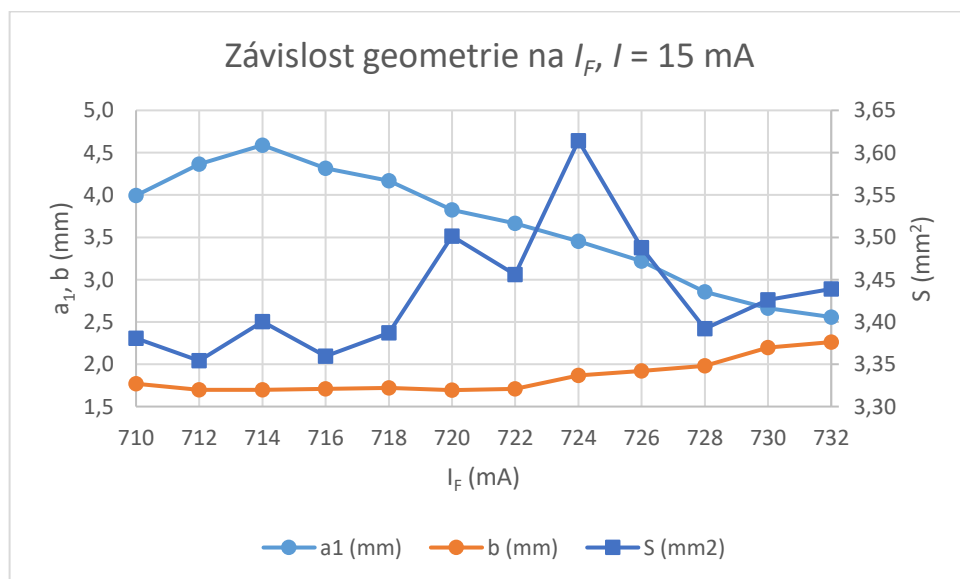
Obr. 46 Porovnání svarů při  $I = 10$  mA, zleva  $I_F = 712$  mA, 716 mA a 728 mA

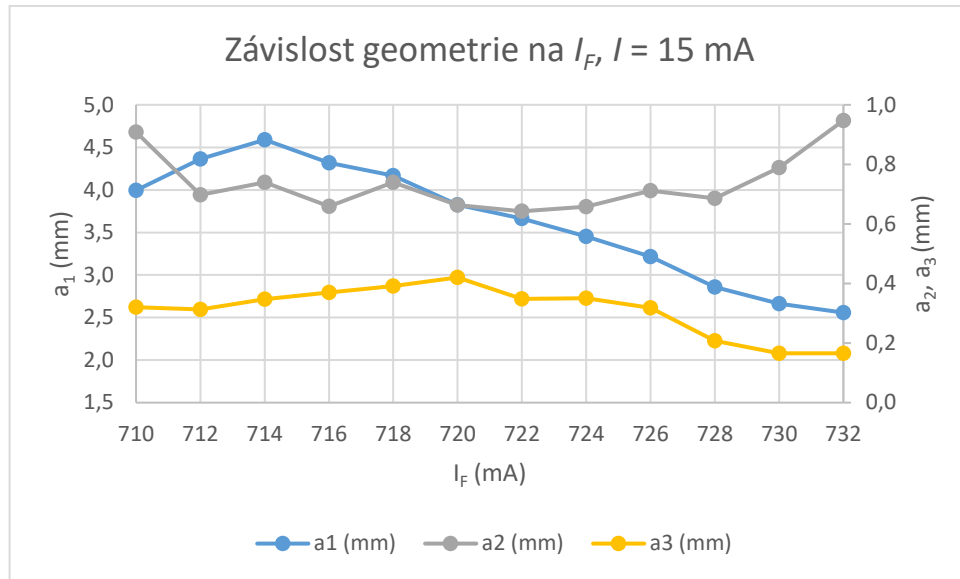
8.1.4 Vliv fokusačního proudu při  $I = 15$  mATab. 10 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $I = 15$  mA

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
37	732	2,56	2,26	0,95	0,17	3,44
38	730	2,66	2,20	0,79	0,17	3,43
39	728	2,86	1,98	0,69	0,21	3,39
40	726	3,22	1,92	0,71	0,32	3,49
41	724	3,45	1,87	0,66	0,35	3,61
42	722	3,67	1,71	0,64	0,35	3,46
43	720	3,82	1,69	0,66	0,42	3,50
44	718	4,17	1,72	0,74	0,39	3,39
45	716	4,32	1,71	0,66	0,37	3,36
46	714	<b>4,59</b>	1,70	0,74	0,35	3,40
47	712	4,36	1,70	0,70	0,31	3,35
48	710	4,00	1,77	0,91	0,32	3,38

Parametry el. svazku:

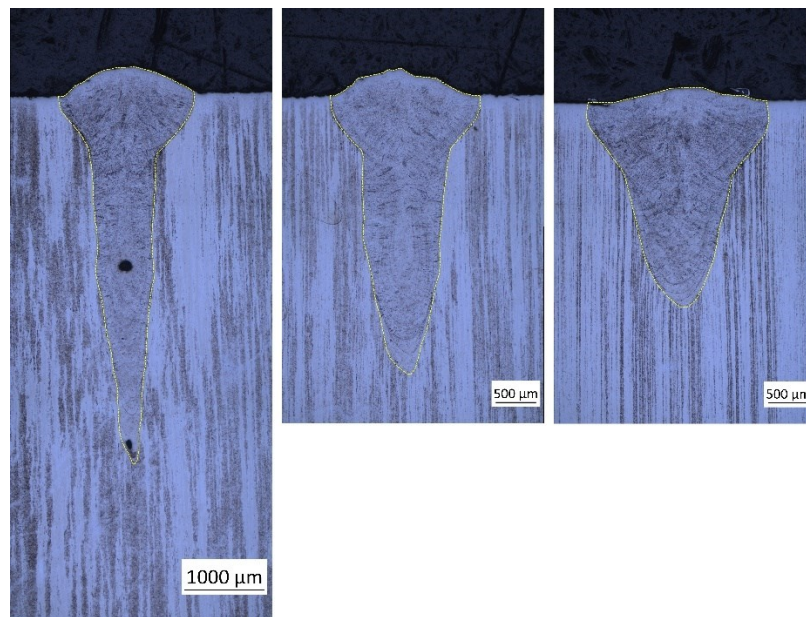
- $I = 15$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = 0$  mm (střed komory)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 742$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 780 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

Obr. 47 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 15$  mA



Obr. 48 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $a_2$  a  $a_3$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 15$  mA

Pro proud svazku  $I = 15$  mA byl nalezen optimální fokusační proud na hodnotě 714 mA, viz tab. 10. Hloubka kořene svaru  $a_1$  zde dosahuje 4,59 mm. Šířka  $b$  tohoto svaru nabývá jednu z nejmenších velikostí pro daný proud. Maximální velikost plochy svaru byla dosažena při  $I_F = 724$  mA. Průběh změn geometrie zobrazují grafy na obr. 47 a obr. 48. Na obr. 49 lze nalézt dva výše zmíněné svary, dále pak svar z okraje rozsahu  $I_F$ . Zmíněný obr. tak názorně ilustruje průběh změny tvaru s měnící se hodnotou fokusačního proudu.



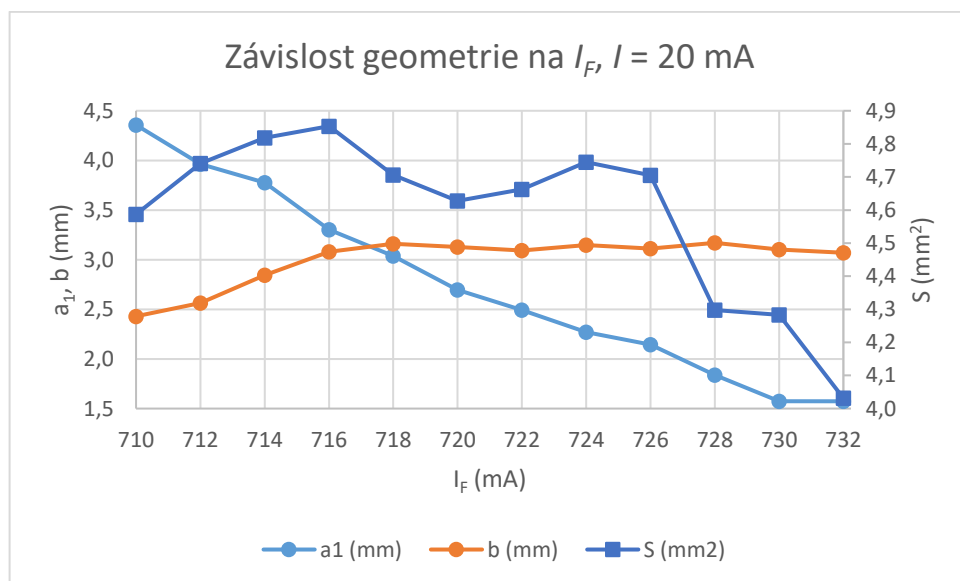
Obr. 49 Porovnání svarů při  $I = 15$  mA, zleva  $I_F = 714$  mA, 724 mA a 732 mA

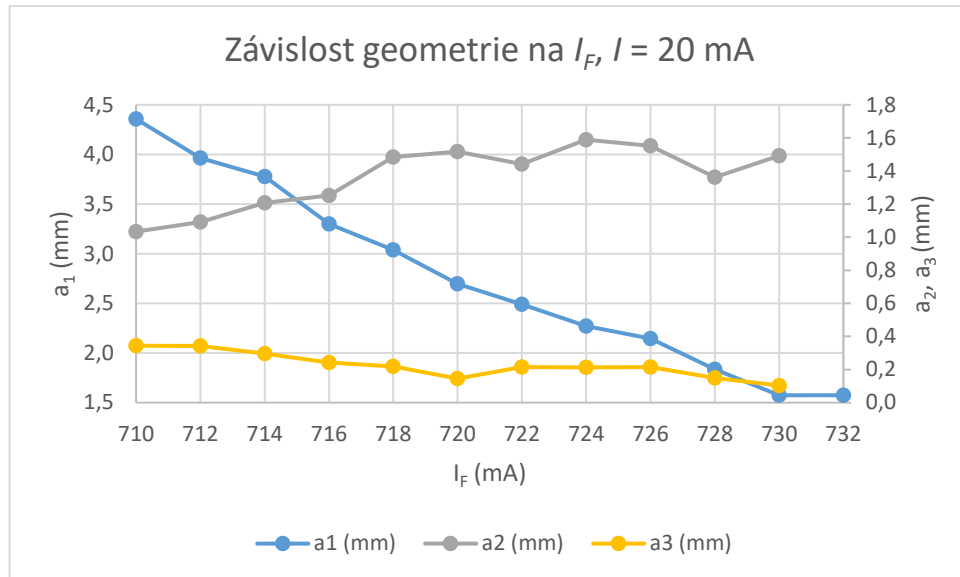
8.1.5 Vliv fokusačního proudu při  $I = 20$  mATab. 11 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $I = 20$  mA

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
49	732	1,57	3,07			4,03
50	730	1,57	3,10	1,49	0,10	4,28
51	728	1,84	3,17	1,36	0,15	4,30
52	726	2,14	3,11	1,55	0,22	4,71
53	724	2,27	3,15	1,59	0,21	4,75
54	722	2,49	3,09	1,44	0,21	4,66
55	720	2,70	3,13	1,52	0,14	4,63
56	718	3,04	3,16	1,48	0,22	4,71
57	716	3,30	3,08	1,25	0,24	4,85
58	714	3,78	2,85	1,21	0,30	4,82
59	712	3,96	2,56	1,09	0,34	4,74
60	710	<b>4,36</b>	2,43	1,03	0,34	4,59

Parametry el. svazku:

- $I = 20$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = 0$  mm (střed komory)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 742$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 678 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

Obr. 50 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 20$  mA



Obr. 51 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $a_2$  a  $a_3$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 20$  mA

Jak je patrné z tab. 11 a také z grafů na obr. 50 a obr. 51, největší hloubka  $a_1$  byla naměřena u svaru č. 60. Zároveň u něj byla naměřena nejmenší šířka  $b$  a hloubka hlavy  $a_2$ . Svar se však nachází na okraji zkoušeného rozsahu  $I_F$ . Proto není jisté, zda se jedná o optimální nastavení. Z tohoto důvodu bylo potřeba rozsah rozšířit. Rozšířená série svarů začíná fokusačním proudem  $I_F = 712$  mA a postupně pokračuje až k hodnotě  $I_F = 678$  mA.

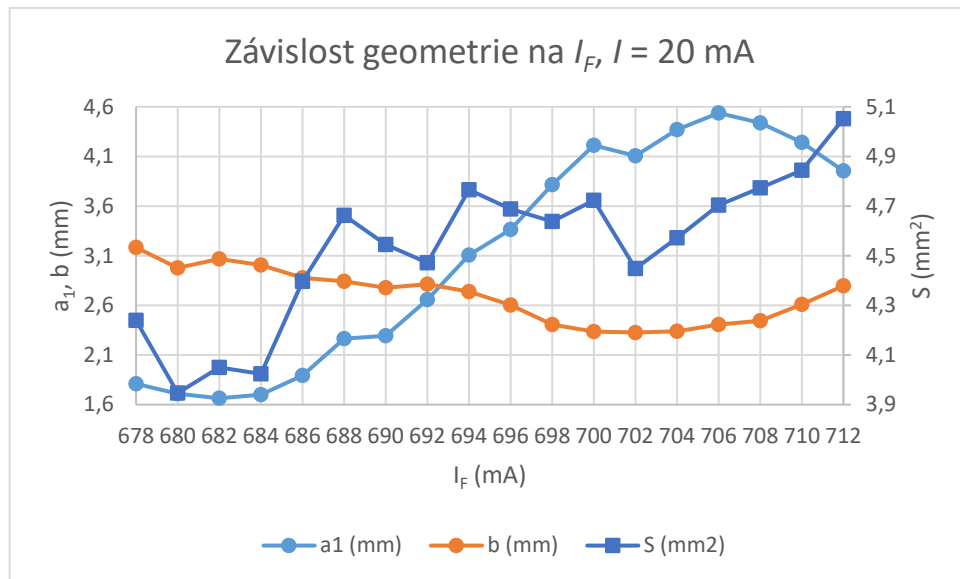


Tab. 12 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $I = 20$  mA, rozšířený rozsah  $I_F$ 

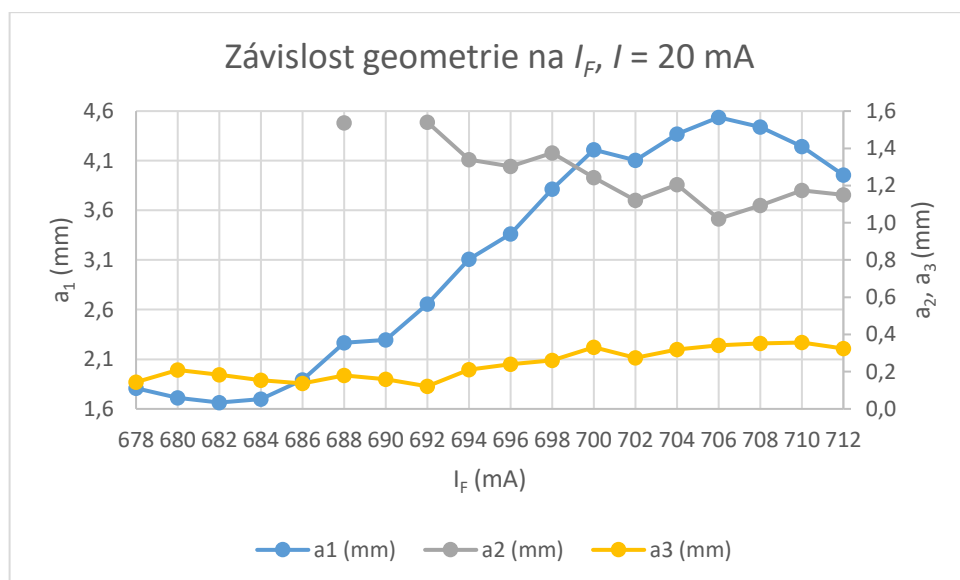
č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
61	712	3,95	2,80	1,15	0,32	5,05
62	710	4,24	2,61	1,17	0,36	4,84
63	708	4,44	2,45	1,09	0,35	4,77
64	706	<b>4,54</b>	2,41	1,02	0,34	4,70
65	704	4,37	2,34	1,20	0,32	4,57
66	702	4,11	2,33	1,12	0,27	4,45
67	700	4,21	2,34	1,24	0,33	4,72
68	698	3,81	2,41	1,38	0,26	4,64
69	696	3,36	2,60	1,30	0,24	4,69
70	694	3,11	2,74	1,34	0,21	4,77
71	692	2,66	2,81	1,54	0,12	4,47
72	690	2,29	2,78		0,16	4,54
73	688	2,27	2,84	1,54	0,18	4,66
74	686	1,89	2,88		0,14	4,40
75	684	1,70	3,01		0,15	4,02
76	682	1,66	3,07		0,18	4,05
77	680	1,71	2,98		0,21	3,95
78	678	1,81	3,18		0,14	4,24

Parametry el. svazku:

- $I = 20$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = 0$  mm (střed komory)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 742$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 724 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm



Obr. 52 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 20$  mA, rozšířený rozsah  $I_F$



Obr. 53 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $a_2$  a  $a_3$  na fokusačním proudu  $I_F$  při proudu svazku  $I = 20$  mA, rozšířený rozsah  $I_F$

Největší hloubka  $a_1 = 4,54$  mm byla naměřena u svaru č. 64 při  $I_F = 706$  mA. Tento svar se dále vyznačuje velikostí šířky  $b$  a hloubky hlavy  $a_2$  blíží se k minimálním hodnotám.

Oproti svarům zhotoveným při proudu svazku  $I = 15$  mA se již nepovedlo navýšit maximální hodnotu  $a_1$ . To bylo pravděpodobně zapříčiněno omezením žhavení katody na 75 %. Zároveň však dochází k znatelnému nárůstu šířky svaru  $b$ , hloubky hlavy  $a_2$  a celkové plochy svaru  $S$ .

Obr. 54 poskytuje bližší představu o průběhu změn geometrie svarů zaznamenaného v grafech na obr. 52 a obr. 53. Zobrazuje svar s nejmenší hodnotou dosažené hloubky  $a_1$  ( $I_F$

= 682 mA), svar zhruba ze středu rozsahu ( $I_F = 696$  mA) a svar získaný při „optimálním“ nastavení ( $I_F = 706$  mA).



Obr. 54 Porovnání svarů při  $I = 20$  mA, zleva  $I_F = 682$  mA, 696 mA a 706 mA

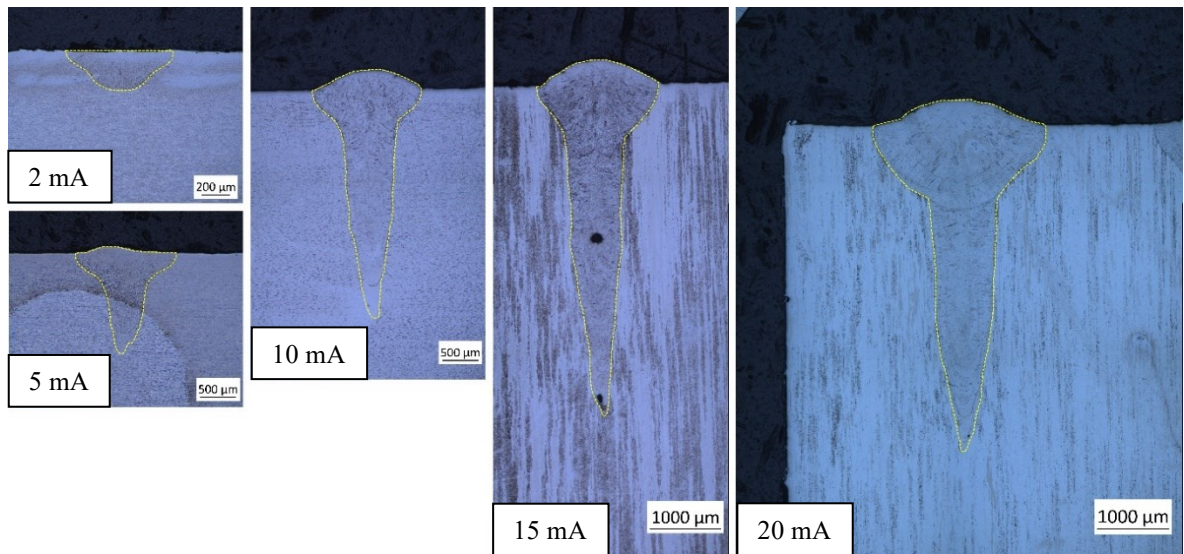
### 8.1.6 Shrnutí výsledků sady č. 1

První sada vzorků sloužila pro nalezení optimálního fokusačního proudu  $I_F$  k dosažení maximální hloubky kořene svaru. Z výše prezentovaných výsledků lze konstatovat, že hodnota fokusačního proudu je při svařování elektronovým svazkem zásadní parametr ovlivňující rozměry i profil svaru. Výjimkou je svařování při nízkém proudu svazku (2 mA), při němž jsou rozměry svarů tak malé, že nedochází k jejich zásadním změnám.

Přehled optimálních  $I_F$  pro jednotlivé proudy svazku  $I$  poskytuje tab. 13. Z tabulky lze vypočítat skokovou změnu optimálního  $I_F$  mezi 2 mA a 5 mA a poté mezi 15 mA a 20 mA. Dále je zde uvedena hodnota  $\Delta I_F$ , která představuje rozdíl mezi optimálním fokusačním proudem  $I_F$  a fokusačním proudem  $I_{FTV}$ , při němž byl pozorován nejostřejší obraz vzorku na obrazovce při přípravě svařování. Zároveň je možné porovnat maximální dosaženou hloubku pro jednotlivé velikosti proudu svazku. Z tabulky vyplývá, že maximální hodnota byla dosažena při 15 mA a dále se již nezvyšovala. Jak již bylo uvedeno výše, tato skutečnost je pravděpodobně dána konstantní hodnotou žhavení katody. Srovnání svarů připravených při optimální hodnotě  $I_F$  nabízí také obr. 55.

Tab. 13 Porovnání optimálních  $I_F$  pro jednotlivé proudy svazku

$I$ (mA)	$I_F$ (mA)	$\Delta I_F$ (mA)	$a_I$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
2	726	- 16	0,28	0,14
5	712	- 30	1,39	0,90
10	716	- 26	3,17	2,25
15	714	- 28	4,59	3,40
20	706	- 36	4,54	4,70

Obr. 55 Porovnání svarů při optimálním  $I_F$  při proudu svazku  $I = 2$  mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA a 20 mA

## 8.2 Sada vzorků č. 2

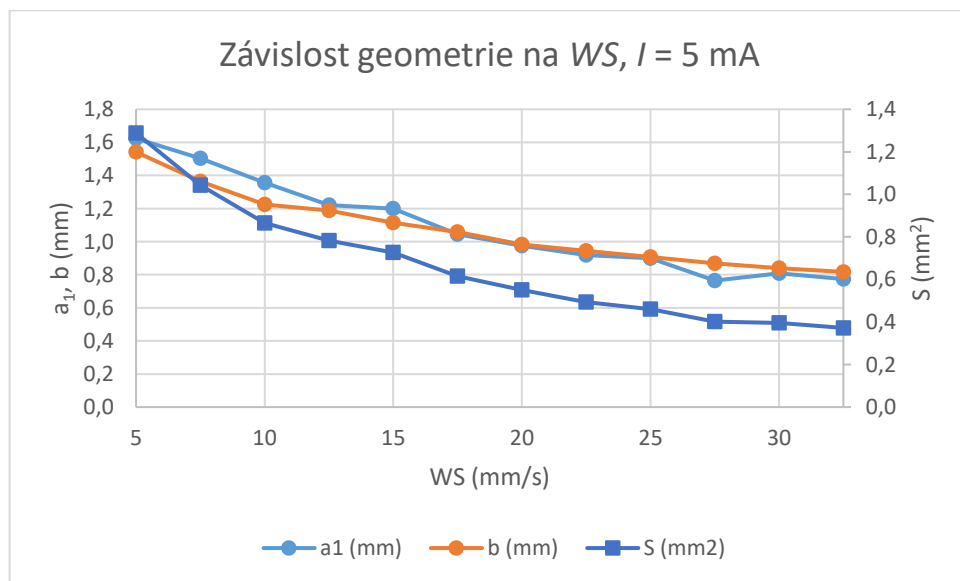
Druhá sada vzorků je zaměřena na sledování změny geometrie svaru při měnící se rychlosti svařování. Experimenty byly provedeny při proudu svazku  $I = 5$  mA a 15 mA. Pro zaostření svazku byly využity hodnoty  $I_F$  zjištěné u předchozí sady vzorků.

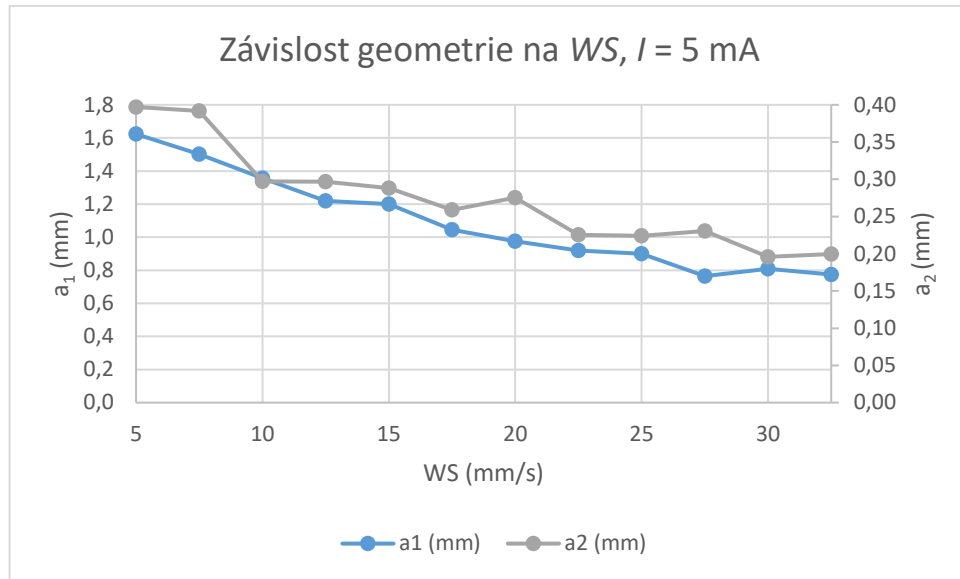
8.2.1 Vliv rychlosti svařování při  $I = 5 \text{ mA}$ Tab. 14 Naměřené rozměry svarů pro různé  $WS$  při  $I = 5 \text{ mA}$ 

č. svaru	$WS$ (mm/s)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
79	5	1,62	1,54	0,40		1,29
80	7,5	1,50	1,36	0,39		1,04
81	10	1,36	1,22	0,30		0,87
82	12,5	1,22	1,19	0,30		0,78
83	15	1,20	1,12	0,29		0,73
84	17,5	1,04	1,06	0,26		0,62
85	20	0,98	0,98	0,28		0,55
86	22,5	0,92	0,94	0,23		0,49
87	25	0,90	0,91	0,22		0,46
88	27,5	0,76	0,87	0,23		0,40
89	30	0,81	0,84	0,20		0,40
90	32,5	0,77	0,82	0,20		0,37

Parametry el. svazku:

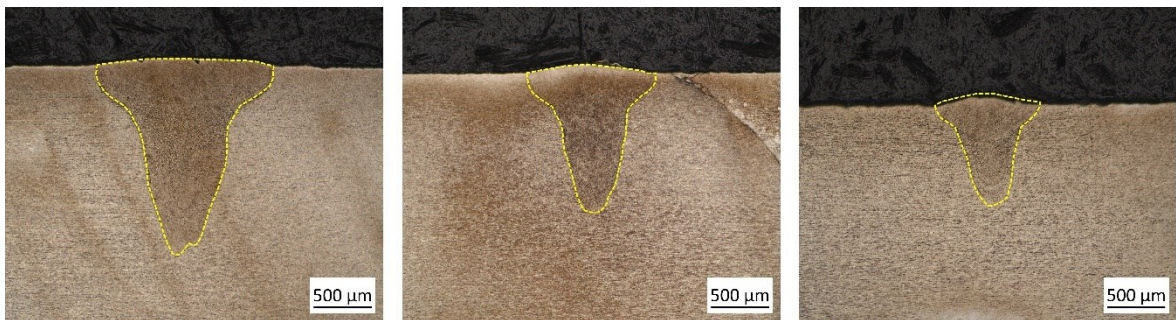
- $I = 5 \text{ mA}$
- $WS = 5\text{--}32,5 \text{ mm/s}$
- $WD = 0 \text{ mm}$  (střed komory)
- $U = 55 \text{ kV}$
- $I_F = 712 \text{ mA}$
- předpětí Wehneltova válce: 678 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

Obr. 56 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na rychlosti svařování  $WS$  při proudu svazku  $I = 5 \text{ mA}$



Obr. 57 Graf závislosti velikosti  $a_1$  a  $a_2$  na rychlosti svařování  $WS$  při proudu svazku  $I = 5$  mA

Z tab. 14 a následně z grafů na obr. 56 a obr. 57 je patrné, že s rostoucí rychlostí svařování  $WS$  klesá hloubka svaru  $a_1$ . Tento viditelný pokles se zastaví při rychlosti 27,5 mm/s. Důvodem, proč jej nelze dále pozorovat, může být jednak stabilita svařovacího procesu, dále také chyba měření. Zároveň s hloubkou klesají i všechny další měřené rozměry. Tuto změnu geometrie lze pozorovat i na obr. 58, kde jsou zobrazeny svary vzniklé při rychlosti 5 mm/s, 15 mm/s a 25 mm/s. Na rozdíl od předchozí sady vzorků, kdy změnou fokusačního proudu docházelo ke změně tvaru, zde zůstává profil svarové plochy zachován.



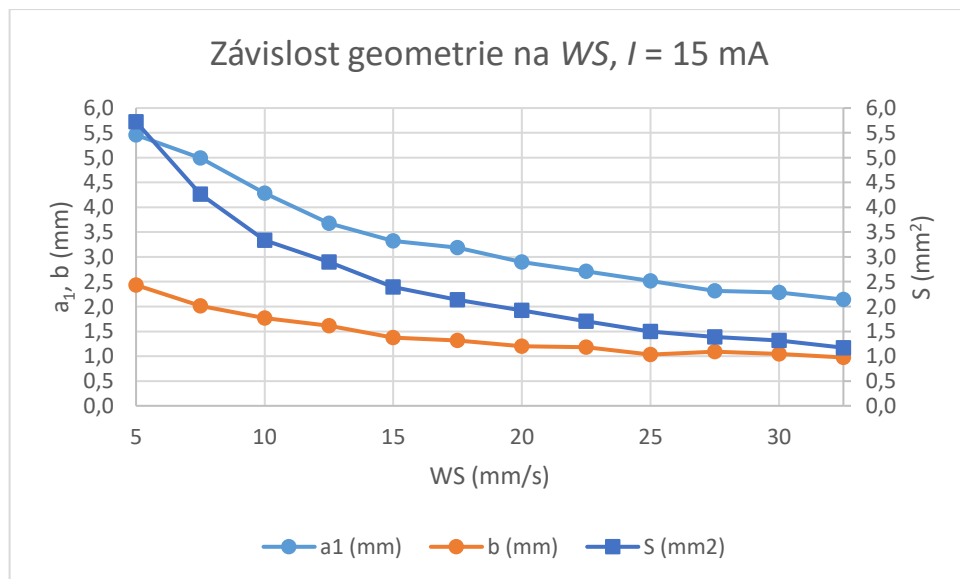
Obr. 58 Porovnání svarů při  $I = 5$  mA, zleva  $WS = 5$  mm/s, 15 mm/s a 25 mm/s

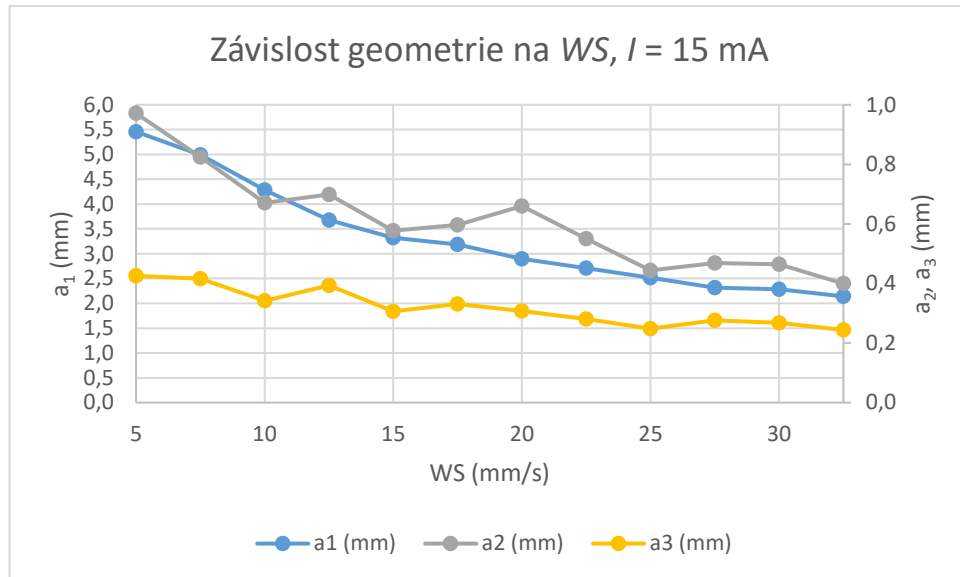
8.2.2 Vliv rychlosti svařování při  $I = 15 \text{ mA}$ Tab. 15 Naměřené rozměry svarů pro různé  $WS$  při  $I = 15 \text{ mA}$ 

č. svaru	$WS$ (mm/s)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
91	5	5,46	2,43	0,97	0,43	5,72
92	7,5	4,99	2,01	0,82	0,42	4,27
93	10	4,28	1,77	0,67	0,34	3,33
94	12,5	3,67	1,61	0,70	0,39	2,90
95	15	3,32	1,37	0,58	0,31	2,39
96	17,5	3,19	1,31	0,60	0,33	2,14
97	20	2,90	1,20	0,66	0,31	1,92
98	22,5	2,71	1,18	0,55	0,28	1,70
99	25	2,52	1,03	0,44	0,25	1,49
100	27,5	2,31	1,09	0,47	0,28	1,39
101	30	2,28	1,04	0,46	0,27	1,32
102	32,5	2,14	0,97	0,40	0,24	1,17

Parametry el. svazku:

- $I = 15 \text{ mA}$
- $WS = 5\text{--}32,5 \text{ mm/s}$
- $WD = 0 \text{ mm}$  (střed komory)
- $U = 55 \text{ kV}$
- $I_F = 714 \text{ mA}$
- předpětí Wehneltova válce: 658 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

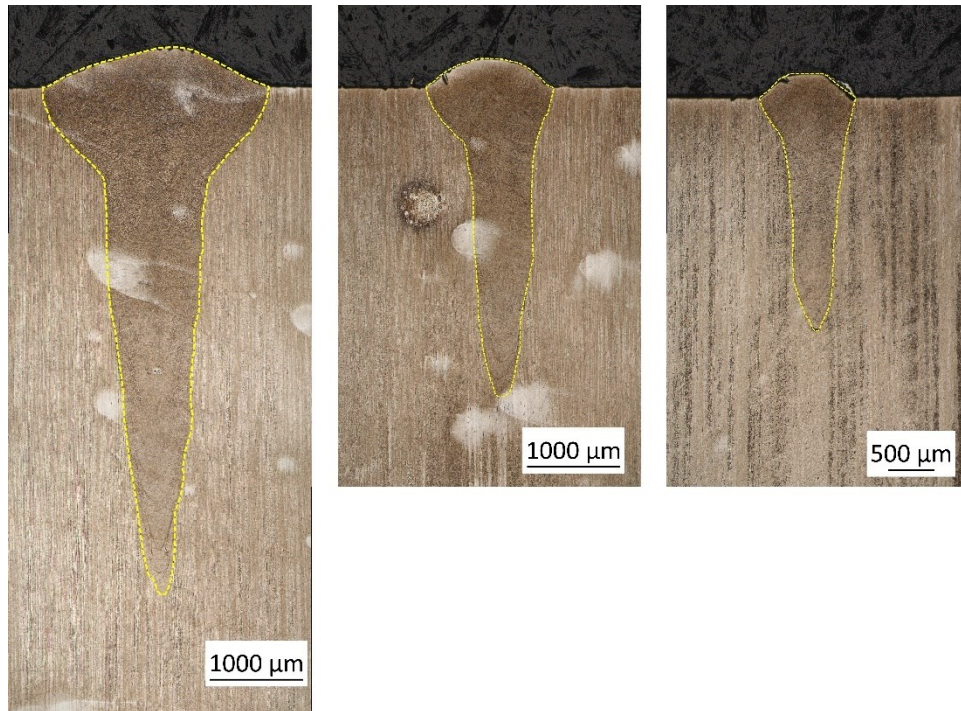
Obr. 59 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na rychlosti svařování  $WS$  při proudu svazku  $I = 15 \text{ mA}$



Obr. 60 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $a_2$  a  $a_3$  na rychlosti svařování  $WS$  při proudu svazku  $I = 15$  mA

Jak ukazuje tab. 15 a grafy na obr. 59 a obr. 60, při  $I = 15$  mA probíhá pokles dosažené hloubky  $a_1$  až do maximální zvolené rychlosti 32,5 mm/s. Při překročení rychlosti 15 mm/s se tento pokles stává pozvolnějším. Také všechny ostatní rozměry s rostoucí rychlostí  $WD$  s občasným kolísáním klesají. Jak zobrazuje z obr. 61, stejně jako v předchozím případě nedochází s rostoucí rychlostí k výrazné změně tvaru svarové plochy, nicméně u svarů provedených při  $WD = 15$  mm/s a 25 mm/s lze spatřit nesymetrii hlavy. Ta může být zapříčiněna použitím oscilace svazku.





Obr. 61 Porovnání svarů při  $I = 15$  mA, zleva  $WS = 5$  mm/s, 15 mm/s a 25 mm/s

### 8.2.3 Shrnutí výsledků sady č. 2

Ve druhé sadě vzorků byl zkoumán vliv svařovací rychlosti. Z naměřených dat bylo shledáno, že s nárůstem rychlosti dochází k poklesu všech rozměrů svaru, který se tak rovnoměrně zmenšuje. Díky tomu se svařovací rychlost jeví jako parametr, kterým lze celkem spolehlivě regulovat velikost svaru na požadovanou hodnotu.

### 8.3 Sada vzorků č. 3

Třetí sada vzorků byla připravena za účelem zjištění vlivu pracovní vzdálenosti na geometrii svaru. Jako pracovní vzdálenost  $WD = 0$  mm byla označena vzdálenost, kdy se vzorek nacházel ve středu pracovní komory. V této pracovní vzdálenosti byla zhotovena série svarů v okolí optimálního fokusačního proudu zjištěného v měření sady č. 1. Poté již byla změněna pracovní vzdálenost napřed na  $WD = -30$  mm, následně na  $WD = +30$  mm. Všechna měření probíhala při proudu svazku 5 mA. Výsledky měření jsou představeny níže.

8.3.1 Vliv fokusačního proudu při  $WD = 0$  mmTab. 16 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $WD = 0$  mm

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
103	718	1,32	1,43	0,36		0,93
104	716	1,27	1,48	0,35		0,92
105	714	1,32	1,37	0,34		0,92
106	712	<b>1,37</b>	1,31	0,35		0,93
107	710	1,28	1,30	0,30		0,91
108	708	1,24	1,28	0,29		0,89

Parametry el. svazku:

- $I = 5$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = 0$  mm (střed komory)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 742$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 693 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

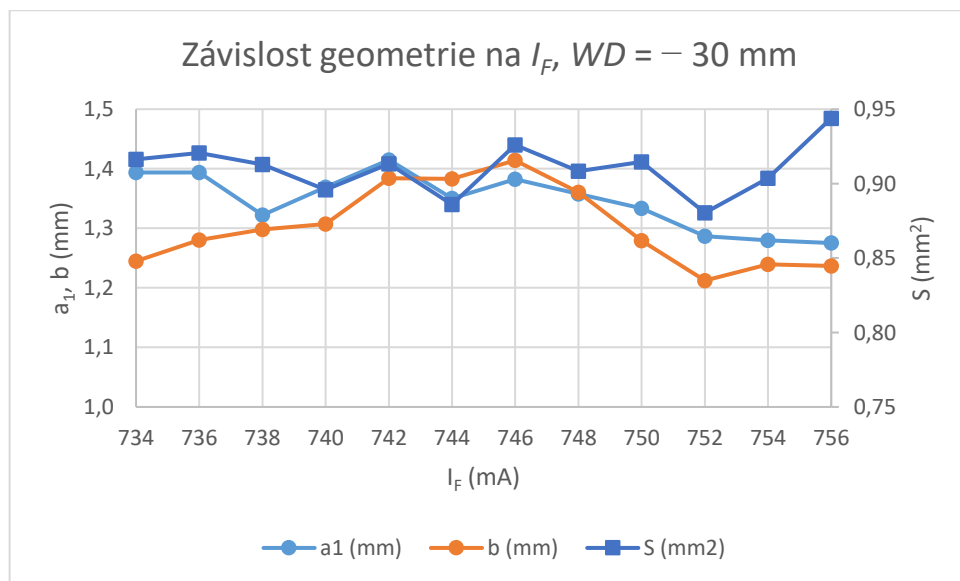
Příprava a měření svarů č. 103 až 108 proběhlo převážně pro ověření optimálního fokusačního proudu při proudu svazku  $I = 5$  mA u vzorku umístěného ve středu pracovní komory. Nalezený optimální proud  $I_F = 712$  mA souhlasí s hodnotou naměřenou v sadě vzorků č. 1. Rozdíl v dosažené hloubce  $a_1$  činí 0,02 mm.

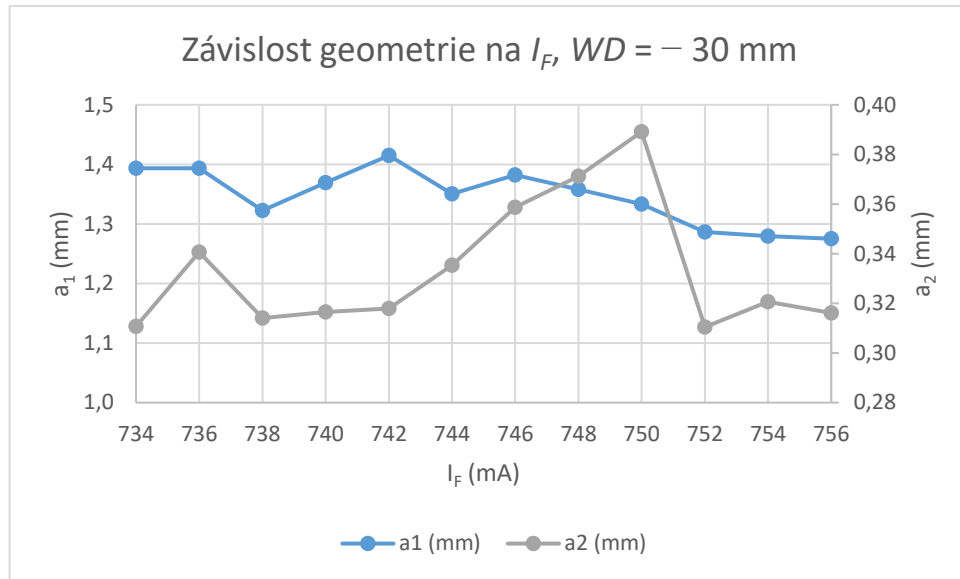
8.3.2 Vliv fokusačního proudu při  $WD = -30$  mmTab. 17 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $WD = -30$  mm

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
109	756	1,28	1,24	0,32		0,94
110	754	1,28	1,24	0,32		0,90
111	752	1,29	1,21	0,31		0,88
112	750	1,33	1,28	0,39		0,91
113	748	1,36	1,36	0,37		0,91
114	746	1,38	1,41	0,36		0,93
115	744	1,35	1,38	0,34		0,89
116	742	<b>1,41</b>	1,38	0,32		0,91
117	740	1,37	1,31	0,32		0,90
118	738	1,32	1,30	0,31		0,91
119	736	1,39	1,28	0,34		0,92
120	734	1,39	1,24	0,31		0,92

Parametry el. svazku:

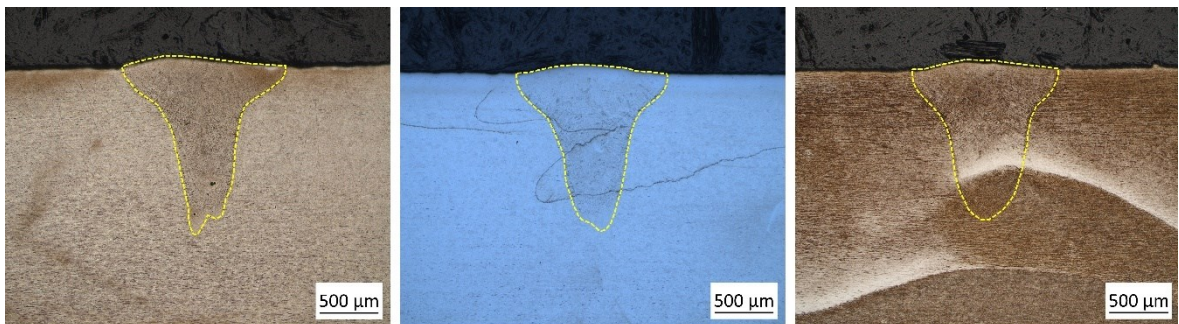
- $I = 5$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = -30$  mm (blíže k el. dělu)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 766$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 693 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

Obr. 62 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při pracovní vzdálenosti  $WD = -30$  mm



Obr. 63 Graf závislosti velikosti  $a_1$  a  $a_2$  na fokusačním proudu  $I_F$  při pracovní vzdálenosti  $WD = -30$  mm

Z tab. 17 a grafů na obr. 62 a obr. 63 lze odečíst největší dosaženou hloubku svaru  $a_1$  při fokusačním proudu  $I_F = 742$  mA. Maximum šířky  $b$  a hloubky hlavy  $a_2$  se nachází posunutě směrem k vyšším hodnotám  $I_F$ . Zajímavý je průběh velikosti svarové plochy  $S$ , který kolísá napříč celým rozsahem měření. Na obr. 64 lze spatřit znázornění průběhu změny svarové plochy při měnícím se  $I_F$ . Odlišné zbarvení prostředního snímku je dáno skutečností, že svar byl napoprvé špatně pozorovatelný a vzorek bylo nutné znova vyleštit, naleptat a pořídít nový snímek.



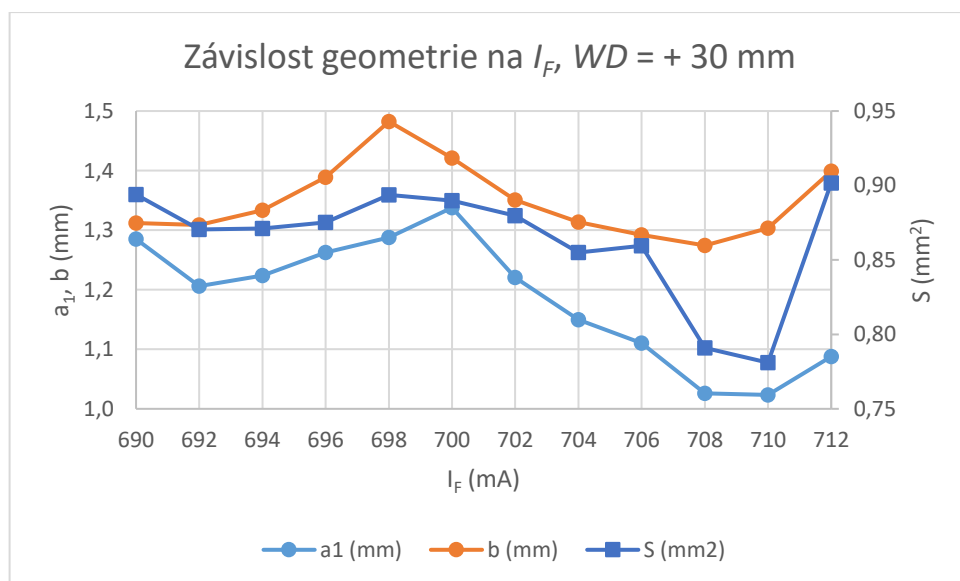
Obr. 64 Porovnání svarů při  $WD = -30$  mm, zleva  $I_F = 742$  mA, 750 mA a 756 mA

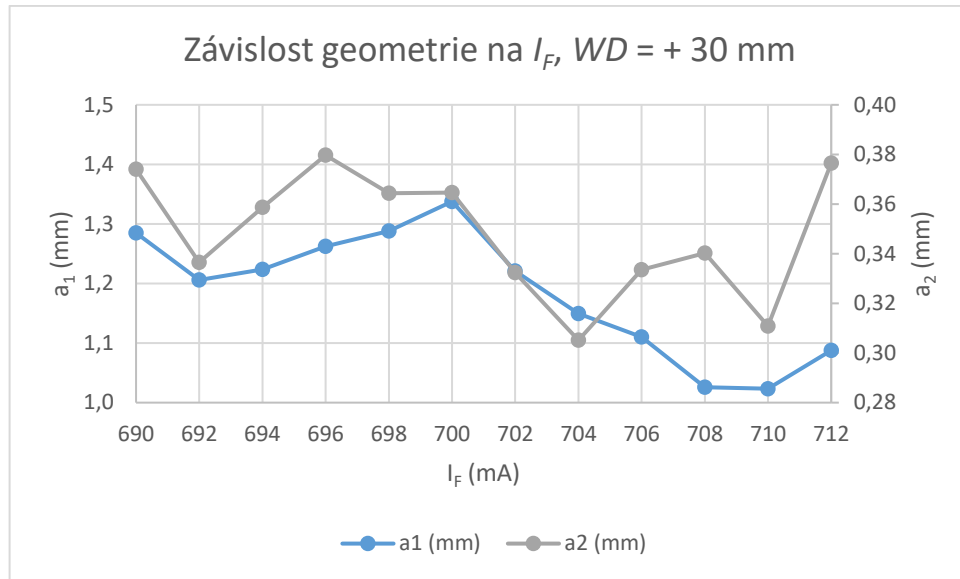
8.3.3 Vliv fokusačního proudu při  $WD = + 30$  mmTab. 18 Naměřené rozměry svarů pro různé  $I_F$  při  $WD = + 30$  mm

č. svaru	$I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
121	712	1,09	1,40	0,38		0,90
122	710	1,02	1,30	0,31		0,78
123	708	1,03	1,27	0,34		0,79
124	706	1,11	1,29	0,33		0,86
125	704	1,15	1,31	0,31		0,86
126	702	1,22	1,35	0,33		0,88
127	700	<b>1,34</b>	1,42	0,36		0,89
128	698	1,29	1,48	0,36		0,89
129	696	1,26	1,39	0,38		0,88
130	694	1,22	1,33	0,36		0,87
131	692	1,21	1,31	0,34		0,87
132	690	1,28	1,31	0,37		0,89

Parametry el. svazku:

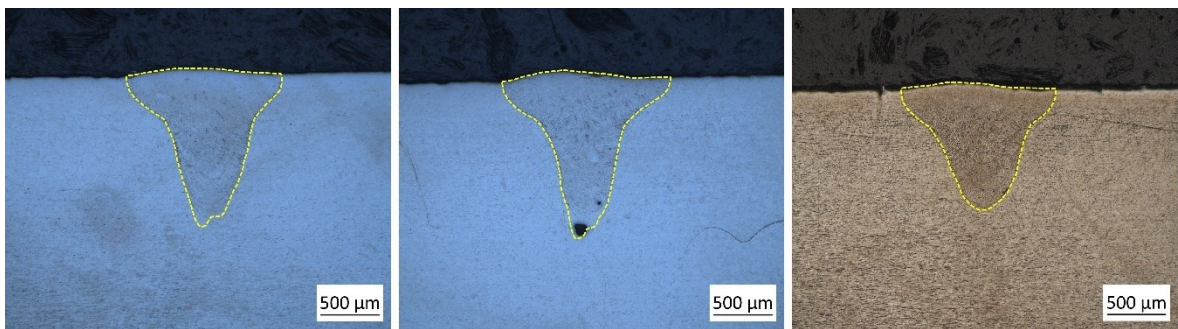
- $I = 5$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = + 30$  mm (dále od el. děla)
- $U = 55$  kV
- $I_{FTV} = 722$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 693 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0,1 mm; 500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

Obr. 65 Graf závislosti velikosti  $a_1$ ,  $b$  a  $S$  na fokusačním proudu  $I_F$  při pracovní vzdálenosti  $WD = + 30$  mm



Obr. 66 Graf závislosti velikosti  $a_1$  a  $a_2$  na fokusačním proudu  $I_F$  při pracovní vzdálenosti  $WD = + 30$  mm

Z výsledků měření uvedených v tab. 18 a graficky interpretovaných na obr. 65 a obr. 66 je patrné, že maximální velikost  $a_1$  byla pro pracovní vzdálenost  $WD = + 30$  mm dosažena při fokusačním proudu  $I_F = 700$  mA. Velikost  $a_1$  je tak o 0,03 mm menší než v situaci, kdy je vzorek umístěn ve středu komory. Rozdíl ve velikosti optimálního  $I_F$  je 12 mA. Maxima velikosti šířky  $b$  bylo dosaženo při  $I_F = 698$  mA. Na obr. 67 jsou zobrazeny svary zhotovené při fokusačním proudu  $I_F = 690$  mA, 700 mA a 710 mA. Stejně jako v předchozím případě si lze všimnout narůstající šířky kořenu u svaru umístěného vpravo. Jedná se o svar připravený při použití jednoho z nejvyšších fokusačních proudů použitých v daném rozsahu.



Obr. 67 Porovnání svarů při  $WD = + 30$  mm, zleva  $I_F = 690$  mA, 700 mA a 710 mA

### 8.3.4 Shrnutí výsledků sady č. 3

Třetí sada experimentů byla věnována sledování dopadu pracovní vzdálenosti svařovaného vzorku od elektronového děla svářečky na geometrii svaru. Zároveň lze sledovat změnu optimálního fokusačního proudu. Tyto výsledky shrnuje tab. 19. Z ní je patrné, že změnou  $WD$  v daném rozsahu dochází jen k malé změně rozměru  $a_1$ . Změna optimálního  $I_F$  pro zaostření svazku je však významná a není symetrická na obě strany. Při přiblížení vzorku o 30 mm k el. dělu bylo potřeba  $I_F$  snížit o 30 mA, opačným směrem bylo vyžadováno jeho snížení pouze o 12 mA. Dále lze předpokládat, že pro různé proudy svazku budou optimální hodnoty  $I_F$  nabývat různých hodnot. Pozorovat rozdíl lze i ve velikosti  $\Delta I_F$  pro různé vzdálenosti, která představuje rozdíl optimálního  $I_F$  pro danou vzdálenost oproti  $I_{FTV}$ .

Tab. 19 Srovnání optimálního  $I_F$  pro různé pracovní vzdálenosti

$WD$ (mm)	$I_F$ (mA)	$\Delta I_F$ (mA)	$a_1$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
- 30	742	- 24	1,41	0,91
0	712	- 30	1,37	0,93
+ 30	700	- 22	1,34	0,89

## 8.4 Sada vzorků č. 4

Čtvrtá sada vozků se zaměřuje na vliv oscilace svazku elektronů. Byly testovány 2 různé parametry – velikost (poloměr) a frekvence oscilace. Velikost poloměru se pohybovala v rozsahu 0–0,5 mm, frekvence nabývala hodnot 50 Hz, 250 Hz a 500 Hz. Výsledky měření jsou zobrazeny v tab. 20.

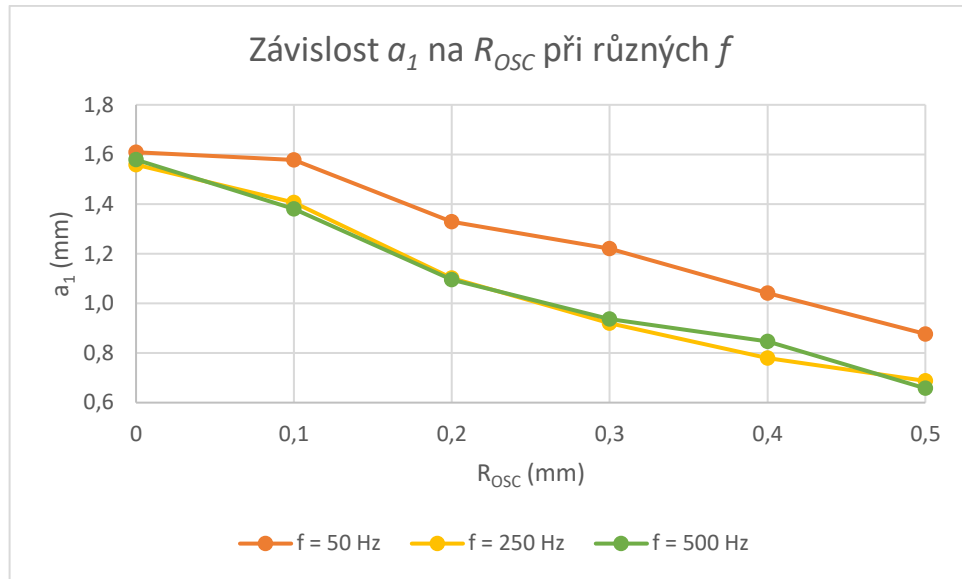
Tab. 20 Naměřené rozměry svarů pro různé  $R_{osc}$  při  $f = 50$  Hz, 250 Hz a 500 Hz

č. svaru	$f$ (Hz)	$R_{osc}$ (mm)	$a_1$ (mm)	$b$ (mm)	$a_2$ (mm)	$S$ (mm <sup>2</sup> )
133	50	0	1,61	1,32	0,34	0,90
134	50	0,1	1,58	1,32	0,32	1,00
135	50	0,2	1,33	1,34	0,30	1,06
136	50	0,3	1,22	1,41	0,30	1,11
137	50	0,4	1,04	1,45	0,24	1,13
138	50	0,5	0,88	1,50	0,18	1,07
139	250	0	1,56	1,31	0,30	0,82
140	250	0,1	1,41	1,31	0,31	0,91
141	250	0,2	1,10	1,36	0,27	0,93
142	250	0,3	0,92	1,41	0,27	0,89
143	250	0,4	0,78	1,41		0,80
144	250	0,5	0,69	1,36		0,74
145	500	0	1,58	1,30	0,30	0,81
146	500	0,1	1,38	1,27	0,33	0,90
147	500	0,2	1,10	1,21	0,29	0,88
148	500	0,3	0,94	1,20		0,79
149	500	0,4	0,85	1,10		0,77
150	500	0,5	0,66	1,28		0,68

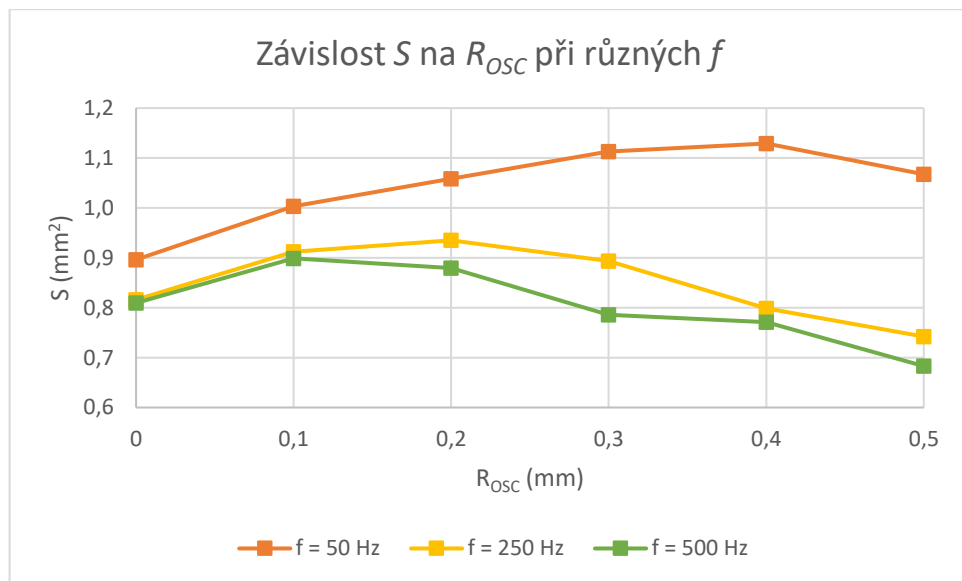
Parametry el. svazku:

- $I = 5$  mA
- $WS = 10$  mm/s
- $WD = 0$  mm (střed komory)
- $U = 55$  kV
- $I_F = 712$  mA
- předpětí Wehneltova válce: 659 V
- žhavení katody: 75 %
- oscilace: 0–0,5 mm; 50–500 Hz
- rampy: 2 + 2 mm

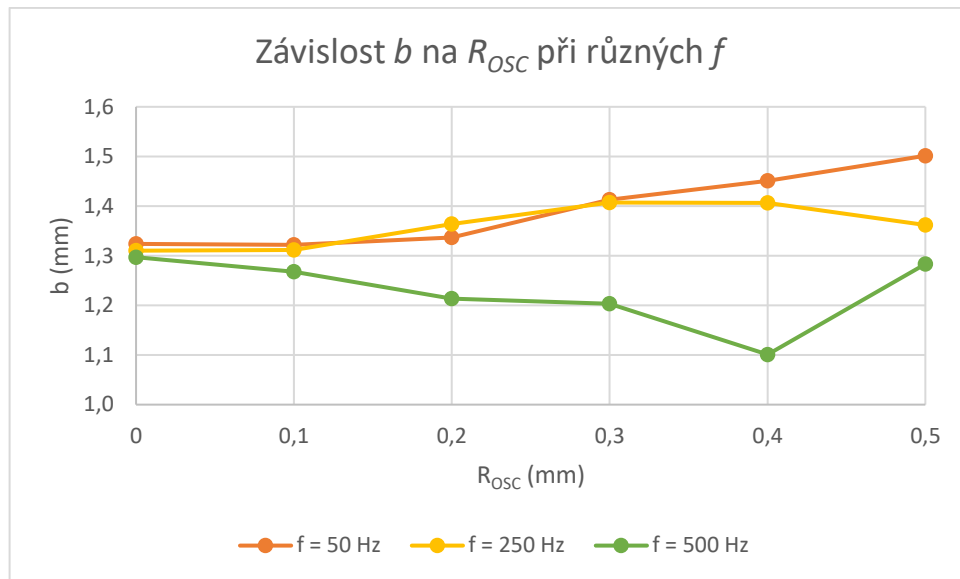




Obr. 68 Graf závislosti velikosti hloubky  $a_1$  na poloměru oscilace  $R_{OSC}$  při frekvenci  $f = 50$  Hz, 250 Hz a 500 Hz



Obr. 69 Graf závislosti velikosti plochy  $S$  na poloměru oscilace  $R_{OSC}$  při frekvenci  $f = 50$  Hz, 250 Hz a 500 Hz

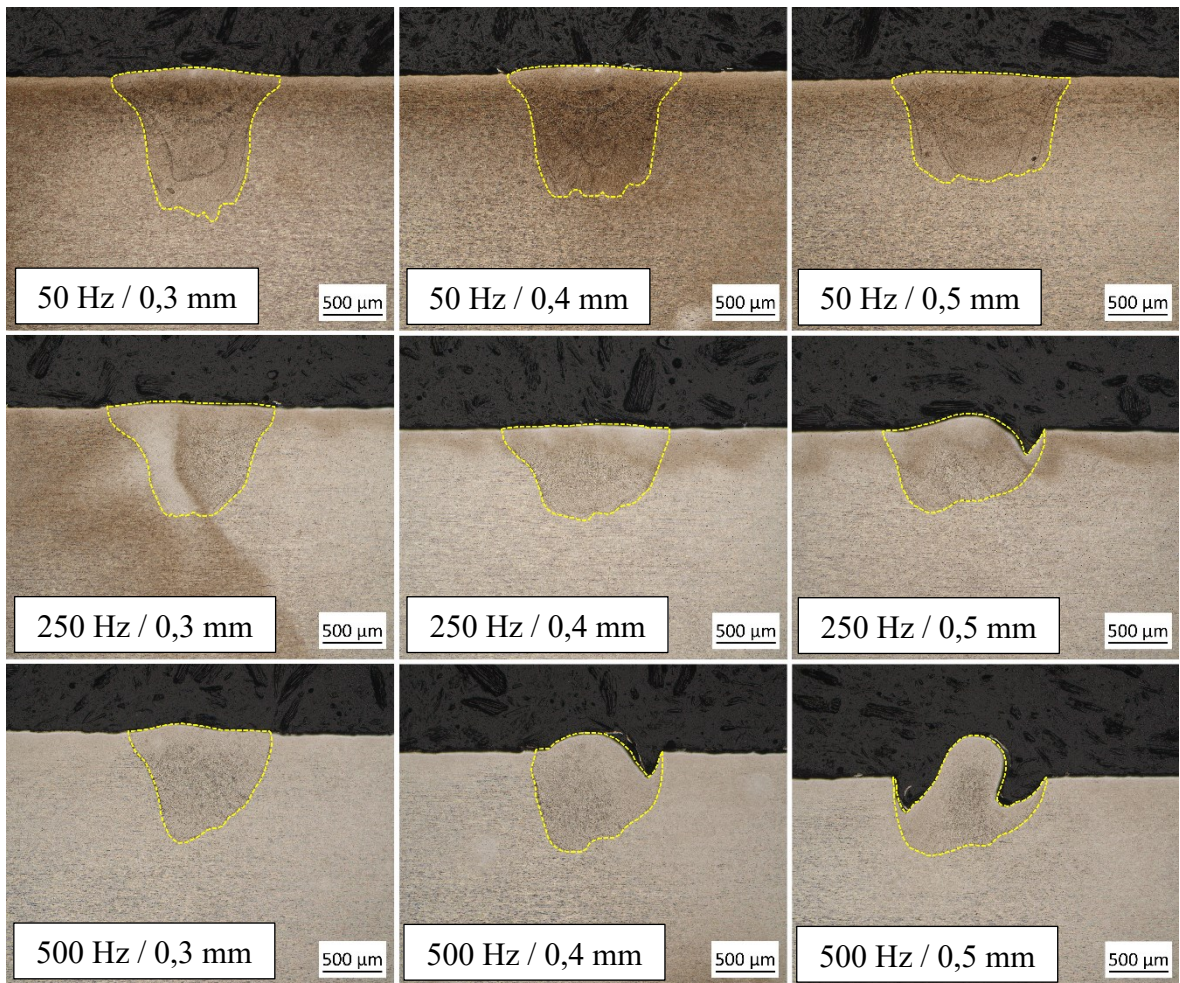


Obr. 70 Graf závislosti velikosti šířky  $b$  na poloměru oscilace  $R_{OSC}$  při frekvenci  $f = 50$  Hz, 250 Hz a 500 Hz

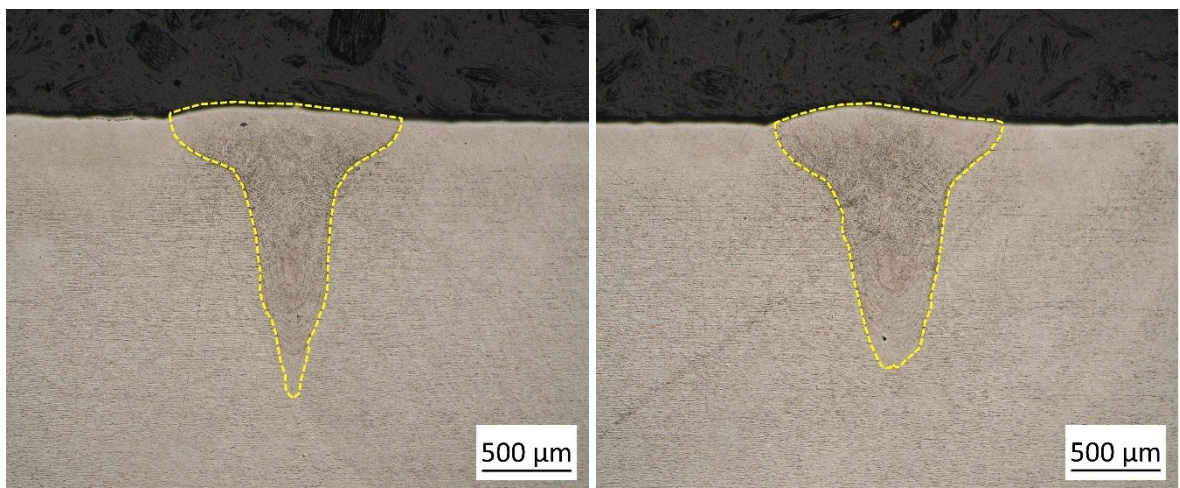
Graf na obr. 68 poskytuje porovnání hloubky  $a_1$  v závislosti na poloměru oscilace pro všechny 3 použité velikosti frekvencí. Ze zobrazených křivek je patrné, že při použití frekvence 50 Hz bylo dosaženo o zhruba 0,2 mm hlubšího průvaru než při frekvenci 250 a 500 Hz. Zároveň při této frekvenci došlo pouze k minimálnímu poklesu hloubky  $a_1$  mezi poloměrem  $R_{OSC} = 0$  mm (žádné oscilace) a 0,1 mm.

Svary připravené s frekvencí oscilace svazku 50 Hz také dosahují největší velikosti plochy  $S$  (viz obr. 69), dále také největší šířky  $b$ . Jak lze spatřit na obr. 71, dokáží si udržet charakteristický (byť značně rozšířený) profil svaru i při  $R_{OSC} = 0,3–0,5$  mm.

S nárůstem  $R_{OSC}$  docházelo obecně k poklesu hloubky svaru  $a_1$ . Plocha  $S$  nejdříve narůstala, poté došlo ke změně profilu svaru a poklesu její velikosti. Šířka  $b$  si podle grafu na obr. 70 nejprve zachovávala stabilní velikost a až při vyšších hodnotách  $R_{OSC}$  došlo k její změně. Zde je však nutné upozornit, že se jedná o největší šířku svaru, která se vyskytuje zpravidla velmi blízko povrchu vzorku. Šířka kořene svaru narůstala již při použití oscilace o poloměru  $R_{OSC} = 0,1$  mm, viz obr. 72.



Obr. 71 Porovnání svarů vyrobených při použití různé velikosti a frekvence oscilace svazku



Obr. 72 Porovnání profilu svarů – vlevo bez oscilace ( $R_{OSC} = 0$  mm), vpravo  $R_{OSC} = 0,1$  mm,  $f = 500$  Hz

## 8.5 Návrh obecného postupu optimalizace nastavení svařovacího procesu

Cílem práce je kromě analýzy vlivu jednotlivých parametrů elektronového svazku na geometrii svaru také navržení postupu nastavení svařovacího procesu. Na základě provedených experimentů předkládám následující návrh optimalizace nastavení:

- svařovací proces vedoucí k dosažení požadované hloubky průvaru (jakožto nejdůležitějšího rozměru svaru) řídit především změnami proudu svazku a svařovací rychlosti;
- k používaným hodnotám proudu svazku mít přiřazeny optimální velikosti fokusačního proudu a žhavení katody;
- pracovat (pokud je to v dané situaci možné) v jedné pracovní vzdálenosti;
- využívat oscilace svazku.

Nastavení procesu by začínalo volbou velikosti proudu svazku. K němu by již byla přiřazena příslušná hodnota fokusačního proudu a žhavení katody. Následovala by volba svařovací rychlosti. Jejím zvýšením je možné snadno regulovat očekávanou hloubku průvaru.

Pracovní vzdálenost se jeví jako parametr nevhodný k řízení procesu elektronového svařování. Její změna se v daném rozsahu v porovnání se změnami proudu svazku a rychlosti projeví téměř zanedbatelně. To se může změnit u svářeček s větší pracovní komorou a tím pádem větším rozsahem pohybu se svařencem. Při změně pracovní vzdálenosti je navíc nutné upravit hodnotu fokusačního proudu.

Použitím oscilace svazku dojde ke zvětšení šířky kořene svaru, čímž se snižuje požadavek na přesnost ploch součástí svařovaných elektronovým svazkem. Využití oscilace svazku doporučuje také literatura citovaná v kap. 3.1 v teoretické části práce. Mezi uváděné důvody pro používání oscilace svazku patří:

- snížení počtu, zmenšení velikosti a rovnoměrnější rozmístění porů projevující se zvýšením životnosti výrobku [29],
- zvýšení pevnosti v tahu [36],
- nižší tvrdost a nižší zbytková napětí [37].

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se věnuje zkoumání vlivu parametrů elektronového svazku na geometrii svaru. Práce začíná teoretickou částí, v jejíž první kapitole je přiblíženo široké spektrum metod používaných pro svařování. Druhá kapitola již více do detailu přibližuje technologii svařování elektronovým svazkem. Je zde popsán princip metody, potřebné vybavení a využití v praxi. V neposlední řadě jsou zde také rozebrány výhody a nevýhody dané technologie. Navazující a zároveň poslední kapitola teoretické části je věnována popisu aktuálního stavu výzkumu v oblasti elektronového svařování. Kapitola čerpá z aktuálních vědeckých článků.

Praktická část začíná přiblížením cílů této diplomové práce, kterými je (po patřičném seznámení se s technologií elektronového svařování) provedení série experimentů za účelem poznání vlivu zvolených parametrů svazku na geometrii svaru. Právě ve zjištění míry a podoby dopadu jednotlivých parametrů spočívá hlavní přínos této práce.

Další prostor je věnován samotným experimentům. To zahrnuje nejen popis pracovního postupu, ale také představení použitého materiálu, stolní elektronové svářečky a rozdělení experimentů do několika sad.

Navazující kapitola se zaměřuje na měření geometrie zhotovených svarů. Je zde popsán postup přípravy metalografického výbrusu včetně použitého vybavení, na nějž navazuje představení postupu měření, které probíhalo metodou světelné mikroskopie a následné analýzy pořízených snímků. Ty jsou k práci přiloženy v elektronické podobě.

Závěrečná kapitola je věnována představení výsledků a jejich diskusi. Postupně byl probrán vliv fokusačního proudu, proudu svazku, rychlosti svařování, pracovní vzdálenosti a oscilace paprsku. Kapitola je završena návrhem obecného postupu nastavení svařovacího procesu na základě zjištěných dat. Jako parametry vhodné k řízení svařovacího procesu byly vyhodnoceny proud svazku v kombinaci s optimálním fokusačním proudem a žhavením katody a svařovací rychlost. Dále bylo doporučeno používání oscilace svazku. Tímto byly všechny cíle práce splněny.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Edícia vysokoškolských učebníc. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [2] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2nd ed. Cambridge, UK: Woodhead Pub, 2012. ISBN 9780857095183.
- [3] ČSN EN ISO 4063. *Svařování, pájení na tvrdo, pájení na měkko a řezání – Přehled metod a jejich číslování*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [4] CONNOR, Leonard P. (ed.). *Welding Handbook Volume 1: Welding Technology*. 8th ed. American Welding Society, 2002. ISBN 0-87171-281-4.
- [5] PHILLIPS, David H. *Welding engineering: An introduction*. Chichester: Wiley, 2016. ISBN 9781118766422.
- [6] SCHINKMANN. *Technologie svařování MMA*. Online. Svářecí technika Schinkmann. C2024. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mma-rucne-obalenou-elektrodou>. [cit. 2024-02-15].
- [7] KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2003. ISBN 0471434027.
- [8] KUKA. *Svařování pod tavidlem*. Online. Industrial intelligence 4.0\_beyond automation | KUKA AG. C2024. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/procesn%C3%AD-technologie/sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-pod-tavidlem>. [cit. 2024-02-18].
- [9] SAHOO, A. a TRIPATHY, S. Development in plasma arc welding process: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021, roč. 41, s. 363-368. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.562>.
- [10] ARTWELD. *Odporové svařování*. Online. Artweld - vše pro svařování a svářečská škola. Dostupné z: <https://artweld.cz/odporove-svarovani/#>. [cit. 2024-02-15].
- [11] JEFFUS, Larry F. *Welding and metal fabrication*. Clifton Park, NY: Delmar, 2012. ISBN 9781621986904.
- [12] CHEHAÏBOU, Abdelkrim a GOUSSAIN, Jean-Claude. High Density Energy Beam Welding Processes: Electron Beam and Laser Beam: Electron Beam and Laser Beam. In: *Metallurgy and Mechanics of Welding*. 2008, s. 31-87. ISBN 9780470611272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9780470611272.ch2>.
- [13] PATTERSON, T.; HOCHANADEL, J.; SUTTON, S.; PANTON, B. a LIPPOLD, J. A review of high energy density beam processes for welding and additive manufacturing applications. *Welding in the World*. 2021, roč. 65, č. 7, s. 1235-1306. ISSN 1878-6669. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01116-0>.
- [14] LOYDA, Miloslav. *Svařování termoplastů*. 2., dopl. a rozš. vyd. Praha: UNO Praha, 2011. ISBN 978-809-0494-909.
- [15] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl; DUB, Petr a ČERNÝ, Miroslav. *Fyzika*. 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013. ISBN 9788021441231.
- [16] WĘGŁOWSKI, M.St.; BŁACHA, S. a PHILLIPS, A. Electron beam welding – Techniques and trends – Review. *Vacuum*. 2016, roč. 130, s. 72-92. ISSN 0042-207X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004>.

- [17] O'BRIEN, Annette a GUZMAN, Carlos (ed.). *Welding Handbook Volume 3: Welding Processes, Part 2*. 9th ed. Miami: American Welding Society, 2007. ISBN 978-0-87171-053-6.
- [18] LASERTHERM. *Laserové svařování*. Online. C2019-2023. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>. [cit. 2024-02-29].
- [19] SIDDHARTH, P a SATHIYA NARAYANAN, C. A review on Electron Beam Welding process. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, roč. 1706, č. 1, s. 012208. ISSN 1742-6596. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012208>.
- [20] WęGŁOWSKI, M.St.; DWORAK, J a BŁACHA, S. Electron beam welding – equipment and accessories. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*. 2014, roč. 584, s. 22-30.
- [21] VAKUUM BOHEMIA. *Mobilní difuzní olejové vývěvy*. Online. VAKUUM BOHEMIA - Průmyslové vakuové technologie. C2019. Dostupné z: <https://vakuum-bohemia.cz/difuzni-olejove-vyvevy>. [cit. 2024-02-29].
- [22] VAKUUM SERVIS. *Turbomolekulární vývěva*. Online. Vakuové technologie, servis vakuových zařízení | Vakuum servis, s.r.o. C2023. Dostupné z: <https://www.vakuum-servis.cz/novinky/turbomolekularni-vyveva>. [cit. 2024-02-29].
- [23] *FOCUS Welding*. Online. C2023. Dostupné z: <https://www.focus-welding.com/>. [cit. 2024-02-29].
- [24] PRO BEAM. *K6000 electron beam welding system*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.pro-beam.com/en/systems/weldingsystemsfordifferentcomponentsizes/k-6000/>. [cit. 2024-02-29].
- [25] SLOBODYAN, Mikhail. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021, roč. 53, č. 4, s. 1049-1078. ISSN 1738-5733. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>.
- [26] FARAONE, Kevin; MILLER, Roger a FENG, Zhili. *Review of Advanced Manufacturing Techniques and Qualification Processes for Light Water Reactors – Electron Beam Welding*. Online. Oak Ridge National Laboratory, 2022.
- [27] KIM, Jisoo; LEE, Woo a PARK, Hyung. The state of the art in the electron beam manufacturing processes. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2016, roč. 17, č. 11, s. 1575-1585. ISSN 2005-4602. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0184-8>.
- [28] VALKOV, Stefan; ORMANOVA, Maria a PETROV, Peter. Electron-Beam Surface Treatment of Metals and Alloys: Techniques and Trends: Techniques and Trends. online. *Metals*. 2020, roč. 10, č. 9. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met10091219>. [cit. 2024-02-29].
- [29] KAR, Jyotirmaya; CHAKRABARTI, Debalay; ROY, Sanat a ROY, Gour. Beam oscillation, porosity formation and fatigue properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, roč. 266, s. 165-172. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.040>.
- [30] HOSSEINI, S.A.; ABDOLLAH-ZADEH, A.; NAFFAKH-MOOSAVY, H. a MEHRI, A. Elimination of hot cracking in the electron beam welding of AA2024-T351 by controlling the welding speed and heat input. *Journal of Manufacturing Processes*.

- 2019, roč. 46, s. 147-158. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.003>.
- [31] SINGH, Rajveer; SINGH, Sachin; KANIGALPULA, P.K.C. a SAINI, J.S. Electron beam welding of precipitation hardened CuCrZr alloy: Modeling and experimentation: Modeling and experimentation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020, roč. 30, č. 8, s. 2156-2169. ISSN 1003-6326. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65368-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65368-7).
- [32] SANDHYA, Varimadugu; NAGA PHANI SASTRY, M. a HEMACHANDRA REDDY, K. Influence of Welding Speed, Voltage, and Beam current on the microstructure and mechanical properties of Electron Beam-Welded Titanium radial joints. *Materials Today: Proceedings*. 2022, roč. 64, s. 442-447. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.808>.
- [33] LI, Yan-jun; WU, Ai-ping; LI, Quan; ZHAO, Yue; ZHU, Rui-can et al. Effects of welding parameters on weld shape and residual stresses in electron beam welded Ti2AlNb alloy joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019, roč. 29, č. 1, s. 67-76. ISSN 1003-6326. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64916-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64916-7).
- [34] CHOUDHURY, Bishub a CHANDRASEKARAN, M. Electron beam welding of aerospace alloy (Inconel 825): A comparative study of RSM and ANN modeling to predict weld bead area. *Optik*. 2020, roč. 219, s. 165-206. ISSN 0030-4026. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165206>.
- [35] RAUTE, J.; JOKISCH, T.; MARKO, A.; BIEGLER, M. a RETHMEIER, M. Influence of electron beam welding parameters on the weld seam geometry of Inconel 718 at low feed rates. *Materialpruefung/Materials Testing*. 2020, roč. 62, č. 12, s. 1221-1227. Dostupné z: <https://doi.org/10.3139/120.111614>.
- [36] PAVLÍK, Marián; SAHUL, Miroslav; SAHUL, Martin; TREMBOŠOVÁ, Veronika; PAŠÁK, Matej et al. Influence of Electron Beam Welding Parameters on the Properties of Dissimilar Copper–Stainless Steel Overlapped Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023, roč. 32, č. 15, s. 6974-6994. ISSN 1544-1024. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07585-8>.
- [37] KOMERLA, Krishna; GACH, Stefan; VOSSEL, Thomas; SCHWEDT, Alexander; BÜHRIG-POLACZEK, Andreas et al. The effect of beam oscillations on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded steel joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, roč. 102, č. 9, s. 2919-2931. ISSN 1433-3015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03355-4>.
- [38] LIU, Xiaomeng; DONG, Quanlin; WANG, Pengfei a CHEN, He. Review of Electron Beam Welding Technology in Space Environment. *Optik*. 2021, roč. 225, s. 165720. ISSN 0030-4026. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165720>.
- [39] AGST DRAHT & BIEGETECHNIK. *1.4301 | AISI 304 | ČSN 17240 | X5CrNi18-10 | Nerezová ocel | AGST Drát*. online. In: . Dostupné z: <https://www.agst.de/4301?lang=cs>. [cit. 2024-04-28].
- [40] THESTEEL.COM. *Austenitická ušlechtilá ocel, nerez 1.4301, X5CrNi18-10*. online. In: . 2024. Dostupné z: <https://www.thesteel.com/cz/nerez/austeniticka-ocel/1-4301>. [cit. 2024-04-28].
- [41] ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY AV ČR. *Stolní elektronová svářečka MEBW 60/2-E – Elektronové technologie*. online. In: Elektronové technologie – Prezentace



aktivit skupiny ET. 2024. Dostupné z: <https://ebt.isibrno.cz/domu/svarovani-elektronovym-svazkem/vybaveni/mebw-60-2-e/>. [cit. 2024-04-28].

[42] *Micro electron beam welder Focus MEBW-60/2: Desktop EB Welder for prototyping and small-lot production.* Focus.

[43] STRUERS. *MultiFast Black, 25 kg* | Struers. online. In: Struers Webshop - Any consumable for your material | Struers.com. Dostupné z: <https://webshop.struers.com/en/product/40100066>. [cit. 2024-04-30].

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a_1$	(mm)	Maximální dosažená hloubka svaru
$a_2$	(mm)	Hloubka hlavy svaru
$a_3$	(mm)	Převýšení svaru nad povrch vzorku
$b$	(mm)	Šířka svaru
$e$	(C)	Elektrický náboj elektronu
ECM		Elektrochemické obrábění
EDM		Elektroerozivní obrábění
$E_k$	(J)	Kinetická energie elektronu
$f$	(Hz)	Frekvence oscilace elektronového svazku
$I$	(mA)	Proud svazku
$I_F$	(mA)	Fokusační proud
$I_{F1}$	(mA)	Fokusační proud při svařování prvního svaru
$I_{FTV}$	(mA)	Fokusační proud při nejostřejším obraze
LBM		Obrábění paprskem laseru
MAG		Svařování kovů v aktivním plynu
$m_e$	(kg)	Hmotnost elektronu
MIG		Svařování kovů v inertním plynu
PMMA		Polymethylmethakrylát
$R_{OSC}$	(mm)	Poloměr oscilace elektronového svazku
RPEBW		Svařování elektronovým svazkem za sníženého tlaku
$S$	(mm <sup>2</sup> )	Celková velikost svarové plochy
TIG		Svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
$U$	(V)	Velikost urychlovacího napětí
$v$	(m·s <sup>-1</sup> )	Rychlost elektronu
$WD$	(mm)	Pracovní vzdálenost

WIG		Svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
$WS$	(mm/s)	Rychlost svařování
$\Delta I_F$	(mA)	Rozdíl mezi hodnotami optimálního $I_F$ a $I_{FTV}$

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozdělení metod svařování podle ČSN EN ISO 4063 [3] .....	13
Obr. 2 Svařování obalenou elektrodou [6].....	14
Obr. 3 Svařování pod tavidlem [8] .....	15
Obr. 4 Porovnání metody TIG a svařování plazmou [5] .....	16
Obr. 5 Metody odporového svařování – vlevo bodové, vpravo švové svařování [10].....	17
Obr. 6 Srovnání vzhledu neutrálního, redukčního a oxidačního plamene [7] .....	18
Obr. 7 Průběh vzniku spoje při svařování třením [5] .....	19
Obr. 8 Schéma svařování laserem [4].....	21
Obr. 9 Svařování horkým tělesem a následné rozložení teplot – a) přímé, b) nepřímé [14]23	
Obr. 10 Schéma elektronového děla [17] .....	27
Obr. 11 Interakce elektronového svazku s povrchem materiálu [16], upraveno .....	28
Obr. 12 Postup vzniku hlubokého svaru – a), b), c) vytvoření kapiláry, natlačení roztaveného materiálu na stěny, d) vzniklý spoj [1] .....	29
Obr. 13 Tři možnosti zaostření paprsku elektronů – A) nad materiál, B) optimální případ, C) hluboko do materiálu [17].....	30
Obr. 14 Rozdílné vzory vychylování svazku a jejich vliv na geometrii svaru [13] .....	30
Obr. 15 Schématický řez elektronovou svářečkou [17].....	32
Obr. 16 Vliv tlaku na rozptýlení svazku elektronů [17] .....	33
Obr. 17 Stolní svářečka a největší svářečka s pracovní komorou o objemu 700 m <sup>3</sup> [23; 24] .....	34
Obr. 18 Svarový spoj hliníku a mědi [23] .....	35
Obr. 19 Svařitelnost materiálů elektronovým svazkem, 100 – svařitelné, pevná rozpustnost existuje ve všech kombinacích slitin; 75 – pevná rozpustnost existuje, silně odlišné body tání; 50 – nedostatek údajů pro vyhodnocení, svařitelnost možná; 25 – nedostatek údajů pro vyhodnocení, svařitelnost málo pravděpodobná; 0 – vznik intermetalických sloučenin, nesvařitelné [16] .....	35
Obr. 20 Geometrie tupého svaru vyrobeného různými metodami [16].....	37
Obr. 21 Postup vrtání elektronovým svazkem [27] .....	38
Obr. 22 Elektronová svářečka MEBW 60/2-E .....	49
Obr. 23 Rozmontovaný držák katody během její výměny .....	52
Obr. 24 Šrouby pro středění katody .....	52
Obr. 25 Vzorek umístěný v pracovní komoře svářečky .....	53
Obr. 26 Kalibrace rozměrů před svařováním.....	53
Obr. 27 Dráha svaru nakreslená v prostředí Draw a weld .....	54
Obr. 28 Nastavení parametrů el. svazku .....	55
Obr. 29 Nastavení ramp .....	56

Obr. 30 Nastavení oscilace svazku .....	56
Obr. 31 Sada tří vzorků opatřených svary .....	57
Obr. 32 Vlevo pila Struers Secotom-60, vpravo detail na upnutý vzorek před řezáním .....	58
Obr. 33 Lis Struers CitoPress-1 .....	59
Obr. 34 Metalografická leštička Struers Tegramin-20 .....	59
Obr. 35 Vyleštěné vzorky připravené na leptání .....	60
Obr. 36 Mikroskop ZEISS Axio Observer .....	61
Obr. 37 Měřené rozměry .....	61
Obr. 38 Příklad snímku se zaznamenanými rozměry .....	62
Obr. 39 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 2$ mA .....	64
Obr. 40 Porovnání svarů při $I = 2$ mA, vlevo $I_F = 710$ mA, vpravo $I_F = 732$ mA.....	64
Obr. 41 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 5$ mA .....	65
Obr. 42 Graf závislosti velikosti $a_1$ a $a_2$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 5$ mA .....	66
Obr. 43 Porovnání svarů při $I = 5$ mA, zleva $I_F = 712$ mA, 716 mA a 730 mA.....	66
Obr. 44 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 10$ mA .....	67
Obr. 45 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $a_2$ a $a_3$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 10$ mA .....	68
Obr. 46 Porovnání svarů při $I = 10$ mA, zleva $I_F = 712$ mA, 716 mA a 728 mA.....	68
Obr. 47 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 15$ mA .....	69
Obr. 48 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $a_2$ a $a_3$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 15$ mA .....	70
Obr. 49 Porovnání svarů při $I = 15$ mA, zleva $I_F = 714$ mA, 724 mA a 732 mA.....	70
Obr. 50 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 20$ mA .....	71
Obr. 51 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $a_2$ a $a_3$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 20$ mA .....	72
Obr. 52 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 20$ mA, rozšířený rozsah $I_F$ .....	74
Obr. 53 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $a_2$ a $a_3$ na fokusačním proudu $I_F$ při proudu svazku $I = 20$ mA, rozšířený rozsah $I_F$ .....	74
Obr. 54 Porovnání svarů při $I = 20$ mA, zleva $I_F = 682$ mA, 696 mA a 706 mA.....	75
Obr. 55 Porovnání svarů při optimálním $I_F$ při proudu svazku $I = 2$ mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA a 20 mA.....	76

Obr. 56 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na rychlosti svařování $WS$ při proudu svazku $I = 5$ mA .....	77
Obr. 57 Graf závislosti velikosti $a_1$ a $a_2$ na rychlosti svařování $WS$ při proudu svazku $I = 5$ mA .....	78
Obr. 58 Porovnání svarů při $I = 5$ mA, zleva $WS = 5$ mm/s, 15 mm/s a 25 mm/s.....	78
Obr. 59 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na rychlosti svařování $WS$ při proudu svazku $I = 15$ mA .....	79
Obr. 60 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $a_2$ a $a_3$ na rychlosti svařování $WS$ při proudu svazku $I = 15$ mA .....	80
Obr. 61 Porovnání svarů při $I = 15$ mA, zleva $WS = 5$ mm/s, 15 mm/s a 25 mm/s.....	81
Obr. 62 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při pracovní vzdálenosti $WD = -30$ mm .....	83
Obr. 63 Graf závislosti velikosti $a_1$ a $a_2$ na fokusačním proudu $I_F$ při pracovní vzdálenosti $WD = -30$ mm .....	84
Obr. 64 Porovnání svarů při $WD = -30$ mm, zleva $I_F = 742$ mA, 750 mA a 756 mA .....	84
Obr. 65 Graf závislosti velikosti $a_1$ , $b$ a $S$ na fokusačním proudu $I_F$ při pracovní vzdálenosti $WD = +30$ mm .....	85
Obr. 66 Graf závislosti velikosti $a_1$ a $a_2$ na fokusačním proudu $I_F$ při pracovní vzdálenosti $WD = +30$ mm .....	86
Obr. 67 Porovnání svarů při $WD = +30$ mm, zleva $I_F = 690$ mA, 700 mA a 710 mA .....	86
Obr. 68 Graf závislosti velikosti hloubky $a_1$ na poloměru oscilace $R_{OSC}$ při frekvenci $f = 50$ Hz, 250 Hz a 500 Hz.....	89
Obr. 69 Graf závislosti velikosti plochy $S$ na poloměru oscilace $R_{OSC}$ při frekvenci $f = 50$ Hz, 250 Hz a 500 Hz .....	89
Obr. 70 Graf závislosti velikosti šířky $b$ na poloměru oscilace $R_{OSC}$ při frekvenci $f = 50$ Hz, 250 Hz a 500 Hz .....	90
Obr. 71 Porovnání svarů vyrobených při použití různé velikosti a frekvence oscilace svazku .....	91
Obr. 72 Porovnání profilu svarů – vlevo bez oscilace ( $R_{OSC} = 0$ mm), vpravo $R_{OSC} = 0,1$ mm, $f = 500$ Hz .....	91

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Počátky vývoje elektronového svařování ve světě [16] .....	24
Tab. 2 Oblasti průmyslu využívající svařování elektronovým svazkem [16; 25] .....	36
Tab. 3 Přehled aktuálního výzkumu .....	42
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.4301 (hmotnostní podíl v %) [39] .....	48
Tab. 5 Parametry elektronové svářečky MEBW 60/2-E [41; 42].....	50
Tab. 6 Složení použitého leptadla .....	60
Tab. 7 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $I = 2$ mA.....	63
Tab. 8 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $I = 5$ mA.....	65
Tab. 9 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $I = 10$ mA.....	67
Tab. 10 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $I = 15$ mA.....	69
Tab. 11 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $I = 20$ mA.....	71
Tab. 12 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $I = 20$ mA, rozšířený rozsah $I_F$ .....	73
Tab. 13 Porovnání optimálních $I_F$ pro jednotlivé proudy svazku .....	76
Tab. 14 Naměřené rozměry svarů pro různé $WS$ při $I = 5$ mA .....	77
Tab. 15 Naměřené rozměry svarů pro různé $WS$ při $I = 15$ mA .....	79
Tab. 16 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $WD = 0$ mm .....	82
Tab. 17 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $WD = - 30$ mm .....	83
Tab. 18 Naměřené rozměry svarů pro různé $I_F$ při $WD = + 30$ mm .....	85
Tab. 19 Srovnání optimálního $I_F$ pro různé pracovní vzdálenosti .....	87
Tab. 20 Naměřené rozměry svarů pro různé $R_{OSC}$ při $f = 50$ Hz, 250 Hz a 500 Hz.....	88

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Snímky svarů s naměřenými rozměry