

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# KOMORA PRO ELEKTRONOVÉ SVAŘOVÁNÍ

WORKING CHAMBER OF ELECTRON BEAM WELDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR

Bc. PETR ČERVINKA

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie Akademický rok: 2014/15

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Červinka

který/která studuje v magisterském studijním programu

obor: Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)

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

#### Komora pro elektronové svařování

v anglickém jazyce:

#### Working chamber of electron beam welder

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh pracovní komory elektronové svářečky. Vakuová komora krychlového tvaru o objemu cca 100 litrů. Komora bude využita v ÚPT AV ČR v.v.i. při budování experimentální svářečky s elektronovou tryskou o výkonu 2 kW s urychlovacím napětím 60 kV.

Cíle diplomové práce:

1. Provést základní rešerši v těchto oblastech: svařování elektronovým svazkem, pracovní komory svářeček, vakuová technika, technologie svařování tlakových nádob.

2. Navrhnout vhodné uspořádání pracovní komory.

3. Zkonstruovat pracovní komoru (nakreslení sestavy + část výrobních výkresů).

4. Navrhnout vhodnou technologii svařování pro výrobu komory.

Seznam odborné literatury:

TURŇA, Milan. Špeciálne metódy zvárania. 1.vyd. Bratislava: ALFA. 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9

AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0

ČSN EN 13445-3 Netopené tlakové nádoby - Část 3: Konstrukce a výpočet. Stránky výrobců elektronových svářeček: www.pro-beam.de, www.steigerwald-eb.de, www.sciaky.com apod.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně dne 21. 11. 2014



VZ. Che

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan

VZ

# ABSTRAKT

Předložená práce se zabývá problematikou návrhu pracovní komory elektronové svářečky. Tato vakuová komora krychlového tvaru o objemu cca 100 litrů bude využita v ÚPT AV ČR v.v.i. při budování experimentální svářečky s elektronovou tryskou o výkonu 2 kW s urychlovacím napětí 60 kV. V teoretické části je pojednáváno o teorii elektronového svařování, zákládních částech zařízení elektronových svářeček a o možnostech technologie svařování pracovních komor. V praktické části práce se řeší návrh pracovní komory (konstrukce komory v kreslícím softwaru), pevnostní kontrola navržené komory v softwaru ANSYS a návrh vhodné metody svaření. Na vzorku materiálu korozivzdorné oceli 17240, ze kterého bude komora vyrobena, byly použity metody svařování TIG a MAG, aby byla ověřena vhodnost zvolené metody svařování.

### Klíčová slova

elektronové svařování, vakuová komora, korozivzdorná ocel, TIG, MAG

# ABSTRACT

The submitted work deals with the design of the working chamber of the electron beam welders. This vacuum chamber of the cubic shape, with a volume of approx. 100 litres will be used in the ÚPT of the AV ČR v.v.i. during building an experimental welding with electron gun performance 2 kW with accelerating voltage 60 kV. The theoretical part is about the theory of electron welding, electron beam welders of basic sections of the facility, and about possibilities of the technology for welding working chambers. In the practical part of the thesis is being thought out the design of the working chamber (construction chamber in design software), the strength test of construction chamber in the software ANSYS and the design of appropriate methods of welding. The sample of the material which is the stainless steel 17240, from which the chamber will be made, have been used in methods of welding TIG and MAG that was verified by the suitability of the chosen methods of welding.

### Key words

electron welding, vacuum chamber, stainless steel, TIG, MAG

# **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČERVINKA, Petr. *Komora pro elektronové svařování*. Brno, 2015, 108 s., CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

7

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Komora pro elektronové svařování** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27.5.2015

Datum

Bc. Petr Červinka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Ivanu Vlčkovi, Ph.D. za informace, vstřícnost, ochotu a čas věnovaný společným konzultacím a také Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. za možnost vypracovat dané téma diplomové práce. Dále společnosti AB KOMPONENTY s.r.o. za pomoc a ochotu při svaření zkušebního vzorku a společnosti Královopolská SAG s.r.o. za možnost konzultací a využití výpočtového softwaru pro pevnostní kontrolu navržené pracovní komory. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům a své přítelkyni Nikole Šindelářové za podporu během celého studia.

Petr Červinka

<b>OD</b> SA <b>II</b>	
ABSTRAKT	5
PROHLÁŠENÍ	7
PODĚKOVÁNÍ	9
OBSAH	11
ÚVOD	14
1 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM SVAZKEM	
1.1 Historie	
1.2 Historie a současnost elektronového svařování u nás	
1.3 Princip svařování elektronovým svazkem	17
2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO ELEKTRONOVÉ SVAŘOVÁNÍ	
2.1 Elektronová tryska	20
2.1.1 Termoemisní katoda	
2.1.2 Elektronová optika	21
2.2 Pracovní vakuová komora	
2.3 Manipulace s polotovarem	23
2.4 Vakuový systém	
2.4.1 Typy vývěv	
2.4.2 Rotační vývěvy	
2.4.3 Turbomolekulární vývěvy	27
2.4.4 Difúzní vývěvy	
2.4.5 Měření nízkých tlaků	
2.4.5.1 Tepelné vakuometry	
2.4.5.2 Ionizační vakuometry se studenou katodou	
2.4.5.3 Kombinovaná vakuová měrka Pirani/Penning	
2.5 Elektronická část	
2.5.1 Zdroj vysokého napětí	
2.5.2 Jednotka řízení vakua	
2.5.3 Jednotka řízení manipulátoru	
2.5.4 Jednotka řízení elektronově optické části trysky	
2.5.5 Zobrazovací a vychylovací jednotka	
2.5.6 Ovládací panel	
3 PRACOVNÍ KOMORA ELEKTRONOVÉ SVÁŘEČKY	
3.1 Velikost pracovní komory	
3.2 Tvar pracovní komory	

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

	3.3 Umístění elektronové trysky	39
	3.4 Dveře pracovní komory	40
	3.4.1 Umístění dveří	41
	3.4.2 Tvar dveří	41
	3.4.3 Způsob otevírání/zavírání dveří	41
	3.5 Umístění vakuového systému	42
4	TECHNOLIGIE SVAŘOVÁNÍ PRACOVNÍCH KOMOR	44
	4.1 Úvod	44
	4.2 Elektronové svařování	44
	4.2.1 Princip svařování elektronovým svazkem	46
	4.2.2 Zařízení pro svařování elektronovým svazkem	46
	4.3 Laserové svařování	47
	4.3.1 Princip svařování laserem	48
	4.3.2 Zařízení pro svařování laserem	49
	4.3.2.1 Plynové lasery	49
	4.3.2.2 Pevnolátkové lasery	51
	4.3.2.3 Vláknové lasery	52
	4.3.2.4 Polovodičové (diodové) lasery	53
	4.4 Svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu – WIG (Wolfra Inert Gas) = TIG (Tungsten Inert Gas)	m 54
	4.4.1 Princip svařování metodou TIG	54
	4.4.2 Základní parametry TIG svařování	55
	4.4.3 Základní sestava zařízení pro svařování metodou TIG	55
	4.4.4 Moderní vývoj metody TIG	56
	4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)	letal 56
	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> </ul>	letal 56 57
	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> </ul>	letal 56 57 58
	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> </ul>	letal 56 57 58 58
	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> <li>4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG</li> </ul>	letal 56 57 58 58 59
5	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> <li>4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG</li> <li>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</li> </ul>	letal 56 57 58 58 59 60
5 6	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> <li>4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG</li> <li>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</li> <li>NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ PRACOVNÍ KOMORY</li> </ul>	letal 56 57 58 58 59 60 61
5 6 7	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> <li>4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG</li> <li>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</li> <li>NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ PRACOVNÍ KOMORY</li> <li>KONSTRUKCE PRACOVNÍ KOMORY</li> </ul>	letal 56 57 58 58 59 60 61 62
5 6 7 8	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> <li>4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG</li> <li>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</li> <li>NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ PRACOVNÍ KOMORY</li> <li>KONSTRUKCE PRACOVNÍ KOMORY</li> <li>PEVNOSTNÍ KONTROLA PRACOVNÍ KOMORY – dle EN 13445-3.</li> </ul>	letal 56 57 58 58 59 60 61 62 63
5 6 7 8	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> <li>4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG</li> <li>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</li> <li>NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ PRACOVNÍ KOMORY</li> <li>KONSTRUKCE PRACOVNÍ KOMORY</li> <li>PEVNOSTNÍ KONTROLA PRACOVNÍ KOMORY – dle EN 13445-3</li> <li>8.1 Model</li> </ul>	letal 56 57 58 58 59 60 61 62 63 63
5 6 7 8	<ul> <li>4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (M Active Gas)</li> <li>4.5.1 Princip svařování metodou MAG</li> <li>4.5.2 Základní parametry MAG svařování</li> <li>4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG</li> <li>4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG</li> <li>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</li> <li>NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ PRACOVNÍ KOMORY</li> <li>KONSTRUKCE PRACOVNÍ KOMORY</li> <li>PEVNOSTNÍ KONTROLA PRACOVNÍ KOMORY – dle EN 13445-3</li> <li>8.1 Model</li> <li>8.2 Základní parametry propočtu</li> </ul>	letal 56 57 58 58 59 60 61 62 63 63 64

	8.3 Vyhodnocení	66
	8.4 Posouzení napjatosti dle normy ČSN EN 13445-3	68
9	NÁVRH TECHNOLOGIE SVAŘENÍ PRACOVNÍ KOMORY	69
	9.1 Úvod	69
	9.2 Posouzení konstrukce	69
	9.3 Příprava materiálu	69
	9.4 Popis materiálu	75
	9.4.1 Mechanické vlastnosti	75
	9.4.2 Technologické údaje	75
	9.5 Přídavný materiál	75
	9.5.1 Technologie svařování TIG	75
	9.5.2 Technologie svařování MAG	76
	9.6 Plynová ochrana	77
	9.6.1 Pro metodu svařování TIG	77
	9.6.2 Pro metodu svařování MAG	77
	9.7 Výběr netavící se elektrody	78
	9.8 Popis svařování	79
	9.9 Schematický technologický postup	79
	9.10 Svařování vzorku	80
Z	ÁVĚR	83
S	EZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	84
S	EZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	93
S	EZNAM OBRÁZKŮ	95
S	EZNAM TABULEK	98
S	EZNAM PŘÍLOH	99

# ÚVOD

Tématem diplomové práce je návrh pracovní vakuové komory pro elektronové svařování, která bude využita v ÚPT AV ČR v.v.i. při budování experimentální elektronové svářečky s elektronovou tryskou o výkonu 2 kW s urychlovacím napětím 60 kV.

Svařování ve vakuu je proces, při kterém rychle letící elektrony naráží na materiál. Při nárazu se až 70 % od materiálu odrazí, zbývající elektrony (cca 30 %) pronikají do hloubky několika desítek mikrometrů. Tímto procesem se přemění kinetická energie elektronů na energii tepelnou a vzniká svár [1].

K pohybu elektronů je zapotřebí vysoké vakuum, aby se zamezilo srážkám elektronů s molekulami vzduchu, které způsobují zbrždění elektronů a jejich vychýlení z přímého směru. Vysoké vakuum v pracovní komoře zajišťuje čerpací systém, který nejčastěji sestává z rotační olejové vývěvy a turbomolekulární vývěvy. Zdroj elektronů se nazývá elektronová tryska nebo elektronové dělo. K pohybu svařované součásti v pracovní komoře slouží manipulátor, který bývá v podobě x-y stolu, případně pro rotační součásti manipulátor s rotací a z-posuvem [1].

Úvodní část práce pojednává o historii elektronového svařování a vysvětluje základní princip svařování elektronovým svazkem.

V kapitole 2 a 3 jsou popsány hlavní části zařízení pro elektronové svařování (elektronová tryska, manipulátory, vakuový systém, elektronické a řídící prvky zařízení a základní druhy a rozdělení pracovních komor).

Kapitola 4 popisuje možné metody svařování pracovních komor.

Cíli diplomové práce, kterými je zkonstruovat pracovní komoru o objemu cca 100 litrů a navrhnout vhodnou technologii svaření pracovní komory se zabývá kapitola 6 až 9 a dále přiložená výkresová dokumentace.

# 1 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM SVAZKEM

#### 1.1 Historie

Před více než sto lety (v roce 1869) prováděli fyzikové Johann Wilhelm Hittorf a William Crookes pokusy s katodovými paprsky v plynech a následně tyto paprsky použili k tavení kovů. V roce 1895 přivedl tento fyzikální jev Wilhelma Conrada Röntgena k objevu zvláštního druhu záření. Díky objevu elektronu anglickým fyzikem Josephem Johnem Thomsonem v roce 1897<sup>1</sup> bylo toto záření popsáno jako proud elektronů [55].

Při pokusech probíhajících u procesů zpracování materiálu vznikalo velké teplo, které bylo chápáno jako nevýhoda pro nutnost chlazení anody, aby se neroztavila. Tento jev byl poprvé využit německým fyzikem Marcello von Piranim ke konstrukci pece (viz obr. 1.1), ve které tavil práškový tantal a jiné kovy [55]. "*Pirani si princip patentoval v roce 1905 v Německu a o dva roky později v USA"* [83].



Obr. 1.1 Zařízení pro tavení kovů elektronovým svazkem [55].

Významný posun ve zpracování materiálů pomocí svazku elektronů nastal v roce 1948, kdy německý fyzik Karl-Heinz Steigerwald, který se zabýval vývojem výkonnějších zdrojů elektronů pro elektronové mikroskopy, ukázal, že elektronový svazek může být využit jako tepelný nástroj, zvláště pak pro přesné vrtání, pájení a svařování kovů ve vakuu [55].

První aplikace svařování elektronovým svazkem uskutečnil J. A. Stohr v CEA v roce 1954–1957. Skutečný technický význam byl ale nejrychleji vnímán v USA, až poté došlo k postupnému zavedení této metody do Evropy. Technologie sváření elektronovým svazkem se rychle rozšířila v jaderné technice, raketovém a leteckém průmyslu. Dnes je tato metoda svařování rozsířená ve všech průmyslově vyspělých státech včetně ČR [55, 66].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Za tento objev obdržel v roce 1906 Nobelovu cenu [64].

16

#### 1.2 Historie a současnost elektronového svařování u nás

V tehdejším Československu se s vývojem svářecích zařízení začalo v roce 1962 ve Výzkumném ústavu zváračském v Bratislavě a v roce 1965 také v Ústavu přístrojové techniky ČSAV v Brně (dnešní AV ČR). V Bratislavě se vývoji věnovala početná skupina výzkumníku, naproti tomu v Brně byl vývoj okrajovou záležitostí. V ÚPT prováděl Ing. Ladislav Zobač první pokusy se svařováním elektronovým svazkem na experimentálním víceúčelovém zařízení na přelomu let 1965–1966. V letech 1969–1970 bylo v Československu vyrobeno 7 elektronových svářeček o výkonech 1,5 kW (viz obr. 1.2). Tato svářečka je po zmodernizování dosud v ÚPT intenzivně využívána [80].



Obr. 1.2 Elektronová svářečka ES-2 v ÚPT v původní podobě [15].

Po odchodu Ing. Ladislava Zobače z ÚPT (koncem roku 1990) pokračuje ve vývoji a využití elektronových svářeček Ing. Jan Dupák s týmem spolupracovníků, který provedl modernizaci svářečky ES-2 a vyvinul stolní elektronovou svářečku pro svařování drobných rotačních součástek (viz obr. 1.3), kterou používají i ve firmě VAKUUM Praha. Další elektronové svářečky, které se v ČR používají si nechal vyrobit Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s. ve spolupráci s Ing. Ladislavem Zobačem. Svářečky jsou umístěné v tzv. horké komoře<sup>2</sup>. Firma DELONG INSTRUMENTS, a. s. si vyrobila podle dokumentace dodané Ing. Ladislavem Zobačem také jeden exemplář elektronové svářečky [80].

Několik dalších firem působících na našem území si pořídilo elektronové svářečky vyrobené v zahraničí [80].

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Horké komory jsou určeny pro práci s radioaktivními konstrukčními materiály komponent jaderných elektráren [68].



## 1.3 Princip svařování elektronovým svazkem

"Podstata procesu svařování elektronovým svazkem ve vakuu spočívá ve využití kinetické energie elektronů rychle se pohybujících ve vakuu" [66, s. 167]. Při jejich dopadu na povrch svařovaného materiálu se velká část kinetické energie elektronů mění na energii tepelnou a spotřebuje se na tavení svařovaného materiálu [66, 31].



Obr. 1.4 Uspořádání elektronové trysky se základními elektronově-optickými prvky:

- I-vysokonapěťový izolátor,
- K katoda,
- W-Wehneltův válec,
- A anoda,
- S elektronový svazek,
- C centrovací systém,
- O fokusační čočka,
- V vychylovací systém [72].

Zdrojem tepla je úzký svazek elektronů s velkou hustotou energie, který se vytváří v elektronové trysce. Elektrony jsou emitovány katodou a soustředěny elektrickým polem vytvářeným řídící elektrodou nazývanou Wehneltův válec (viz obr. 1.5). Množství elektronů opouštějících katodu lze ovlivňovat změnou předpětí vůči katodě na Wehneltově válci. Kinetickou energii získávají elektrony v elektrickém poli mezi katodou a anodou, na které je přivedeno urychlovací napětí v rozmezí 30 až 200 kV (nejčastěji je to 60 kV nebo 120 kV). Urychlené elektrony proletí otvorem anody a jsou znovu soustředěny elektronovou optikou do místa svaru. Vychylovací cívky zavádějí příčná magnetická pole umožňující vychylování svazku (např. kývání nebo rotaci) [1, 32, 84].



Obr. 1.5 Tvorba svazku urychlovací čočkou [67].

Prostor elektronové trysky je čerpán na vysoké vakuum  $(10^{-2} \text{ až } 10^{-3} \text{ Pa})$  soustavou rotační a difúzní vývěvy. Pro rychlejší získání vakua se používá turbomolekulární vývěva. Pracovní komora je čerpána na stejné vysoké vakuum jako elektronová tryska nebo na nižší [1, 32]. "Vakuum je nezbytné z důvodu zajištění termoemise elektronů, tepelné a chemické izolace katody, zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami a zamezení srážkám elektronů s molekulami vzduchu, které způsobují zbrždění elektronů a jejich vychýlení z přímého směru" [1, s. 261].

Svařovací rychlost je zajišťována pohybem svařence, který je v přípravku na programovatelném polohovadle s několika stupni volnosti, nebo pohybem elektronové trysky [1, 32].

19

# 2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO ELEKTRONOVÉ SVAŘOVÁNÍ

"Zařízení, které generuje, ovlivňuje a přivádí svazek elektronů k svařovanému nebo obráběnému materiálu se nazývá elektronová svářečka" [52, s. 28]. Existuje velké množství typů elektronových svářeček, od malých a jednoduchých, po velké a konstrukčně velice komplikované [55]. Svařování elektronovým svazkem se uplatňuje v nejrůznějších oblastech průmyslové výroby i výzkumu, proto jsou požadavky kladené na tato zařízení velmi různorodá. Nejvíce se liší tvary a rozměry pracovního prostoru v podobě vakuové komory [63]. Z tohoto důvodu není jednoduché vytvořit univerzální zařízení.

Elektronová svářečka (viz obr. 2.1) je tvořená těmito hlavními částmi [84]:

- elektronová tryska,
- pracovní vakuová komora,
- manipulátor,
- vakuový systém,
- elektronická část,
- další pomocné a bezpečnostní prvky.

Jednotlivé části jsou uspořádány kolem pracovní komory, která je centrálním prvkem každé elektronové svářečky. Je zde také ovládací panel, kde jsou soustředěny řídicí prvky spolu se vstupem dat a monitorovacím zařízením, které může být doplněno vizuálním displejem. Za zadní stěnou pracovní komory bývají umístněna vakuová čerpadla. Elektronová tryska, která může být dle typu zařízení umístěna vodorovně nebo svisle, je speciálním kabelem spojena se zdrojem vysokého napětí [52].

Univerzální svářečky jsou zpravidla vybaveny polohovacím zařízením, které je v případě potřeby možné přesunout mimo pracovní komoru a usnadnit tak upnutí svařovaného materiálu [52].



20

#### 2.1 Elektronová tryska

Zdroje pro tvorbu elektronových svazků – elektronové trysky byly v prvopočátku vyvinuty pro jiné, než technologické operace, a to pro elektronové mikroskopy. První pokusy s využitím tepelných účinků svazku elektronů byly provedeny právě v elektronových mikroskopech jejich konstruktéry (K. H. Steigerwald, viz kap. 1.1) [52].

Celková sestava generátoru elektronového paprsku je komplikovaný celek mnoha komponent, jež jsou na vysoké technické úrovni. Elektronová tryska sestává z těchto základních prvků [34]:

- systém termoemisního zdroje elektronů,
- centrovací systém elektronového svazku,
- fokusační (zaostřovací) magnetická čočka,
- vychylovací systém.

Tyto základní prvky potřebné k vytvoření a řízení elektronového svazku jsou konstrukčně umístěny do válcové kovové konstrukce zajišťující neměnnost jejich vzájemné polohy. Pracovní prostor, kde jsou elektrony urychlovány vysokým napětím je vyčerpán na vysoké vakuum (je nutné udržovat tlak 10<sup>-2</sup> až 10<sup>-3</sup> Pa). Katoda je spojena se záporným pólem zdroje vysokého napětí. Anoda je spojena s uzemněným kladným pólem zdroje VN. Konstrukce trysky musí také zaručit dostatečné zamezení úniku rentgenového záření, které vzniká při změně rychlosti elektronů, tedy hlavně v místě dopadu elektronů na povrch svařovaného materiálu [63].

#### 2.1.1 Termoemisní katoda

Volné elektrony pohybující se v krystalické mřížce kovů získáme jejich emisí do vysokého vakua. Kinetická energie potřebná k jejich emisi, tj. k překonání tzv. potenciálové bariéry existující při povrchu kovu, je dodána ohřevem emitoru na vysokou teplotu. Emitor, který je na záporném pólu zdroje energie, je označován jako katoda [24]. Množství emitovaných a využitelných elektronů, tj. emisní proud, závisí na vlastnostech materiálu katody, velikosti jejího povrchu, teplotě a výstupní práci elektronů. Hustota emisního proudu elektronů z kovu je popsána Richardsonovým zákonem [66]:

$$J_e = A \cdot T^2 \cdot exp\left(\frac{-e \cdot \varphi_0}{k \cdot T}\right),\tag{2.1}$$

kde: $J_e [A \cdot cm^{-2}]$ – hustota emisního proudu, $A [A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}]$ – konstanta emise, závisí na emitujícím povrchu,T [K]– absolutní teplota katody,e– základ přirozeného logaritmu, $e \cdot \varphi_0 [eV]$ – výstupní práce elektronu z kovu, $k [J \cdot K^{-1}]$ – Boltzmannova konstanta.

List

Vhodný materiál má tedy nízkou výstupní práci a vysokou teplotu tání [10]. Nejčastěji se využívá wolfram, buď čistý nebo dotovaný thoriem, a jen výjimečně tantal nebo hexaborid lanthanu [24].

Životnost katody závisí hlavně na nejvyšší použitelné teplotě. Za podmínek běžných v elektronových svářečkách to bývají jen hodiny nebo nejvýš desítky hodin. Musí být proto snadno vyměnitelná [24].

Potřebné rozměry katody v elektronové svářečce závisí především na nejvyšším požadovaném výkonu, tj. součinu urychlovacího napětí a proudu svazku. Pro menší výkony (několik kW) se používá katoda ve tvaru "V" z wolframového drátu o průměru kolem 0,2 mm (viz obr. 2.2 a 2.3), kde se využívá emise z malé plošky jejího vrcholu. Pro větší výkony (výkon svazku až 30 kW) je nutné využitelnou emisní plochu zvětšit. Většinou se pak zhotovuje katoda z wolframového pásku širokého 0,5 až 2 mm, ohnutého do tvaru "V" se skosenou špičkou (viz obr. 2.2) [24].



Obr. 2.2 Katody pro trysky elektronových svářeček [24].



Obr. 2.3 Mikroskopický snímek wolframové katody [76].

#### 2.1.2 Elektronová optika

Úkolem elektronové optiky je zaostření a navedení elektronového svazku do místa svařování [10].

Elektronový svazek se od tzv. křižiště u anody (viz obr. 1.5) pohybuje bez magnetického pole, a proto jsou jeho trajektorie mírně rozbíhavé. Fokusační čočka, která vytváří magnetické pole (viz obr. 2.4) změní rozbíhavé trajektorie elektronů na sbíhavé a zaostří je na velmi malou plochu, čímž se dosáhne vysoké plošné hustoty energie (asi  $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) [84, 34, 10, 54].

Magnetickou čočku tvoří válcová budicí cívka obklopená pláštěm z feromagnetického materiálu. Pomocí změny proudu v budicí cívce můžeme měnit magnetické pole uvnitř čočky, a tím její ohniskovou vzdálenost, která ovlivňuje směr pohybu elektronů. Tímto dochází k protínání trajektorií v určitém bodě na ose rotační symetrie svazku. Účinky magnetické čočky na svazek elektronů se podobají účinkům skleněné čočky používané v optice [84, 34, 10].

FSI VUT DIPLOMOVÁ PRÁCE List 22

"Magnetická čočka bývá doplněna centrovacím systémem, který koriguje chod elektronového svazku čočkou tak, aby se minimalizovaly její optické vady a potlačil se nežádoucí efekt posunu svazku při změně zaostření" [84, s. 6]. Princip funkce opět spočívá ve vytváření homogenního magnetického pole [34].

V další části elektronové trysky se obvykle nachází vychylovací systém, který slouží k odklonění svazku elektronů od přímé dráhy a umožňuje změnit místo dopadu na povrchu materiálu [10, 83]. "*Nejčastěji je tvořen dvěma páry cívek navinutých na magnetických jádrech či toroidu"* [10, s. 6]. "*Většinou je vychylovací systém magnetický, protože elektromagnetické vychylování se stává nevýhodné při velkých energiích svazku z důvodu neprakticky velkých napěťových rozkmitů na vychylovacích deskách"* [84, s. 6]. Další vlastnost magnetického vychylování ve srovnání s mechanickým způsobem je v absenci setrvačnosti polohování. To umožňuje přesouvat svazek obrovskými rychlostmi (až tisíce metrů za sekundu) a v požadovaném bodě jej prakticky okamžitě zastavit [83].



Obr. 2.5 Vychylovací systém [10].

#### 2.2 Pracovní vakuová komora

Tomuto tématu je věnována samostatná kapitola 3.

Obr. 2.4 Magnetická čočka. Vektory Br a Bz – složky magnetického pole [13].

#### 2.3 Manipulace s polotovarem

Při svařování elektronovým svazkem často dochází k potřebě svařovat komplikované tvary. Proto je potřeba nasměrovat elektronový svazek na konkrétní požadované místo, někdy i pod úhlem. Z toho důvodu se provádí vzájemné vychylování svazku s polohováním svařované součásti [84].

Elektronová tryska je umístěna na vnější straně vakuové komory ve stálé poloze a při provádění svaru se pohybuje svařovaná součást. Někdy je elektronová tryska pohyblivá uvnitř vakuové komory. Nejčastěji má polohovací zařízení podobu X-Y křížového stolu (viz obr. 2.6 a 2.7a), v případě potřeby i ve směru osy Z. Pro svařování kruhových axiálních spojů slouží polohovací zařízení umístěné na křížovém stole, umožňující rotační pohyb kolem svislé nebo vodorovné osy, případně kolem osy libovolně nakloněné a je dimenzováno podle hmotnosti svařované součásti (viz obr. 2.7b a 2.7c) [55].



Obr. 2.6 X-Y manipulátor poháněný krokovými motory [84].



Obr. 2.7 Typy polohovacích mechanismů: a) X-Y křížový stůl, b) polohovací zařízení pro rotační pohyb kolem svislé osy, c) polohovací zařízení pro rotační pohyb kolem vodorovné osy [55].

Stůl je opatřený drážkami pro upnutí součásti a je poháněný stejnosměrnými motory s permanentními magnety nebo krokovými motory. Vhodné umístění motorů je mimo pracovní komoru s ohledem na jejich chlazení, zároveň se tímto eliminuje ovlivnění elektronového svazku magnetickým polem motorů. K odměřování polohy se používájí

optická inkrementální čidla, indukční snímače apod. Tato čidla a snímače polohy měří s přesností mikrometrů. Výhodou je to, že nejsou vystavena žádným silám, jako např. u obrábění [55, 84]. "Konstrukce manipulátoru musí brát ohled na vakuová hlediska, musí být dostatečně tepelně odolná a nesmí obsahovat nevodivé části, které by mohly nabíjet, a zmagnetizované části, které by mohly ovlivňovat trajektorii svazku" [84, s. 7].

#### 2.4 Vakuový systém

Vnitřní prostor elektronové trysky a pracovní komory musí být vyčerpán na vysoké vakuum  $(10^{-2} \text{ až } 10^{-3} \text{ Pa})$  [32]. "Vakuum je nezbytné z důvodu zajištění termoemise elektronů, tepelné a chemické izolace katody, zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami a zamezení srážkám elektronů s molekulami vzduchu, které způsobují zbrždění elektronů a jejich vychýlení z přímého směru" [1, s. 261]. Dle ČSN rozdělujeme vakuum na jemné  $(10^{2} \text{ až } 10^{-1} \text{ Pa})$ , vysoké  $(10^{-1} \text{ až } 10^{-6} \text{ Pa})$  a ultravakuum (pod  $10^{-6} \text{ Pa})$  [7].

Prostředkem k získávání vakua je vývěva, kterou lze v zásadě považovat za otvor o ploše S do prostoru s nižším tlakem [16]. Veličinou charakterizující vývěvu je čerpací rychlost s, která je definována jako objem plynu, který projde uvažovaným průřezem za jednotku času [82]:

$$s = \frac{dV}{dt'},\tag{2.2}$$

kde:  $s [m^3 \cdot s^{-1}]$ – čerpací rychlost,  $V[m^3]$ – objem plynu, *t* [s] – čas.

Pro vývěvu s čerpací rychlostí s, která čerpá objem V po dobu t, platí [82]:

$$s \cdot t = V \cdot ln \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0},\tag{2.3}$$

kde:  $s [m^3 \cdot s^{-1}]$ – čerpací rychlost,

> *t* [s] – čas,

 $V[m^3]$ – objem plynu,

- $P_1$  [Pa] – počáteční tlak v čerpaném prostoru,
- $P_2$  [Pa] konečný tlak v čerpaném prostoru,
- $P_0$  [Pa] – mezní tlak u dokonale těsné soustavy.

#### 2.4.1 Typy vývěv

Vývěvy rozdělujeme podle způsobu jakým dosahují snížení tlaku na vývěvy transportní a adsorpční. Transportní vývěvy odčerpávají z evakuovaného prostoru molekuly plynu, které procházejí vývěvou, zatímco vývěvy adsorpční tyto molekuly zachycují uvnitř vývěvy. Z tohoto rozdělení je patrné, že vývěvy transportní mohou pracovat kontinuálně na rozdíl od

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

vývěv adsorpčních, které obvykle pracují v cyklech. Transportní vývěvy se dále dělí na mechanické a hybnostní. Mechanické vývěvy dosahují snižování tlaku cyklickou změnou objemu ve vývěvě, hybnostní vývěvy předávají molekulám čerpaného plynu rychlostní impuls ve směru čerpání plynu [16].

Tab. 2.1 Rozdělení vývěv podle způsobu jakým snižují tlak [16].

	adsorpční	kryokondenzační, kryosorpční, getrová		
	transportní	mechanické	pístové	membránová, Sprenglerova, Toeplerova
vyvevy			rotační	rotační olejová, rotační rtuťová, Rootsova
		hybnostní	vodní, d	lifúzní, molekulární, iontová

Pro vyčerpání prostoru elektronové trysky a pracovní komory na vysoké vakuum se nejčastěji používá jednoduchý vakuový systém, který obsahuje rotační vývěvu, která slouží k vytvoření předvakua. K hlavnímu čerpání využíváme turbomolekulární, případně difúzní vývěvu, pomocí kterých získáme vakuum vyšší [84, 23].

Přehled typů vývěv a jejich využití podle tlaku znázorňuje obr. 2.8.



Obr. 2.8 Zdroje, měření a využití vakua podle tlaku [16].

#### 2.4.2 Rotační vývěvy

Ve vakuové technice jsou nejvíce používané rotační olejové vývěvy, které pracují na základě excentricky uloženého rotoru s lopatkami [16].

Princip činnosti rotačních olejových vývěv (viz obr. 2.9) spočívá v opakovaném mechanickém zvětšování a zmenšování pracovního prostoru vývěvy rotujícím tělesem. Po

List

26

dobu zvětšování je pracovní prostor spojen s čerpaným objemem, při následujícím zmenšování se plyn v něm obsažený stlačuje na tlak vyšší než 760 torr a výstupním ventilem se vytlačuje do atmosféry [82]. vstup výstup Obr. 2.9 Schéma rotační olejové vývěvy: 1 – válcový stator, hladina oleje 2 - rotor, 3 - lopatky,5 6 4 – pružina, 3 5 – vstupní část statorové komory, 3 6 – výstupní část statorové komory, 7 – mezilopatková část statorové komory [19].

Aby se utěsnily malé mezery mezi pevnými a pohyblivými částmi vývěvy, je zařízení ponořeno do oleje, který zároveň slouží jako mazivo a částečně zajišťuje i přenos tepla uvolňovaného při stlačování plynu. Nejčastěji se používají oleje automobilové nebo turbínové [16, 82].

Mezní tlak běžných rotačních olejových vývěv se pohybuje v rozmezí 3 až 0,02 Pa, maximální čerpací rychlost je v rozmezí jednotek až stovek litrů plynu za sekundu. K dosažení větší čerpací účinnosti (nižších tlaků) bývají vývěvy spojeny paralelně či sériově. Některé rotační vývěvy jsou konstruovány jako dvojstupňové (viz obr. 2.10 a 2.11), což v podstatě představuje dvě vývěvy vzájemně sériově propojené a konstrukčně uspořádané v jednom bloku na společné hřídeli. Jedna vývěva pracuje jako předčerpávací stupeň pro druhý, vysokovakuovaný stupeň [16, 82].



Obr. 2.10 Schéma dvoustupňové rotační olejové vývěvy [73].



Obr. 2.11 Dvoustupňová rotační olejová vývěva [12].

Příklad vývěvy starší robustní konstrukce vhodné především k nepřetržitému čerpání v průmyslových provozech je na obr. 2.12. K pohonu dochází pomocí klínového převodu třífázovými elektromotory [49].



Obr. 2.12 Rotační olejová vývěva pomaloběžná [50].

Účinnost rotační olejové vývěvy především ovlivňuje [82, 65]:

- tlak nasycených par použitého oleje, případně příměsí, které se do oleje mohou dostat při provozu vývěvy (např. v podobě par z čerpaného prostoru)
- dokonalost utěsnění škodlivých mezer mezi pevnými a pohyblivými částmi vývěvy,
- rozpustnost vzduchu a vývěvou odčerpávaných plynů v oleji,
- velikost škodlivého prostoru, který vzniká mezi rotorem a statorem při výstupu plynu z vývěvy.

Výhodou rotačních olejových vývěv je poměrně vysoká čerpací rychlost, kontinuita čerpacího procesu a možnost práce proti atmosférickému tlaku [78].

Nevýhodou rotačních olejových vývěv je možnost vniknutí oleje do čerpaného prostoru. To je způsobeno tehdy, zůstane li rotační olejová vývěva po zastavení spojena s vyčerpaným prostorem a přetlak vnějšího vzduchu olej z vývěvy vytlačuje do prostoru o nízkém tlaku. Některé rotační vývěvy jsou vybaveny zařízením, které vytlačení většího množství oleje z vývěvy zabraňují. Vývěvy, které toto zařízení nemají, musíme po zastavení naplnit vzduchem nebo je doplnit vnějším ochranným zařízením [16, 82].

### 2.4.3 Turbomolekulární vývěvy

Turbomolekulární vývěva je svou konstrukcí podobná vícestupňové parní turbíně nebo turbokompresoru [65]. Schéma této vývěvy je znázorněno na obr. 2.13.





Obr. 2.13 Schéma turbomolekulární vývěvy [16]. Obr. 2.14 Řez turbomolekulární vývěvou [16].

Uvnitř statoru, obsahující statorové lopatky se velkou rychlostí (16 až 20 000 min<sup>-1</sup>) otáčí rotor s rotorovými lopatkami, na které naráží molekuly čerpaného plynu, vstupující přes vstupní otvor do vývěvy. Tyto srážky molekul plynu s rychle se otáčejícím kolem rotoru dodávají molekulám dodatečnou složku rychlosti ve směru pohybu rotoru a vedou k proudění molekul plynu od vstupu k výstupu. Pro správnou funkci vývěvy je důležité, aby byly statorové i rotorové lopatky vhodně nakloněny [65].

Turbomolekulární vývěvy dosahují mezního tlaku až  $10^{-11}$  Pa. Čerpací rychlost turbomolekulárních vývěv je řádově až  $10^4 \, l \cdot s^{-1}$  [65].

Turbomolekulární vývěva nemůže pracovat při atmosférickém tlaku, protože lopatky rotoru by se silným třením o čerpaný plyn zahřály a zničily. Proto je používána v kombinaci s primární vývěvou (např. rotační olejovou vývěvou) [16].

"Podstatnou výhodou těchto vývěv je eliminování zpětných proudů na minimální hodnotu, neboť je zde velká pravděpodobnost, že molekula, která se pohybuje směrem ke vstupu (zpětný proud) narazí do lopatek a bude jí dodána opačně orientovaná složka rychlosti" [65, s. 23]. Dále není potřeba použítí oleje jako těsnícího materiálu, tzn. vzniklé vakuum není znečištěno [78].

Nevýhodou turbomolekulárních vývěv je jejich vysoká pořizovací cena, z důvodu vysokých nároků na výrobu jejich součástí [78].

Turbomolekulární vývěvy se i přes vysokou pořizovací cenu velice rozšířily a jsou dnes součástí celé řady zařízení [16].

#### 2.4.4 Difúzní vývěvy

Difúzní vývěvy nemají žádné pohyblivé části a pracují na principu, kdy hnací pára předává molekulám plynu složku rychlosti ve směru čerpání, nebo je unášejí v proudu páry. Dosažitelné vakuum je omezeno povrchovým napětím čerpací kapaliny nebo par. Jako hnací médium se nejčastěji používají páry rtuti nebo oleje. Vzhledem k velké jedovatosti rtuti se dnes používají téměř výhradně olejové náplně, které jsou tvořeny silikonovými oleji [16, 65].

Difúzní vývěva obsahuje varnou část (viz obr. 2.15 (1)), ve které se zahřívá k varu hnací médium (olej nebo rtuť) a jeho páry jsou vedeny tryskou do prostoru vývěvy (3). Směr proudění těchto par je shodný se směrem proudění čerpaného plynu. Čerpaný plyn difunduje do par hnacího média a tato směs je pak vedena do prostoru, kde zkondenzuje pouze hnací médium (stéká zpět do varné části) a čerpaný plyn je odveden primární vývěvou ze systému. Pro správnou funkci je nutno plášť vývěvy, po jehož vnitřní straně stéká zkondenzovaná pracovní kapalina účinně chladit, obvykle vodou (2) [16].

Mezní tlak olejových difúzních vývěv se pohybuje v rozmezí  $10^{-2}$  až  $10^{-7}$  Pa, u rtuťových vývěv je to přibližně  $10^{-5}$  Pa. Mezní tlak je závislý na počtu stupňů vývěvy, způsobu chlazení lapače olejových par a na kvalitě a typu oleje. Čerpací rychlost difúzních vývěv se pohybuje od několika jednotek  $1 \cdot s^{-1}$  do desítek tisíc  $1 \cdot s^{-1}$  [16, 74].

Difúzní vývěvy vyžadují pro svůj provoz předvakuum v řádech jednotek až desítek Pa (tj. jejich výstup je připojen na vstup primární vývěvy, většinou rotační olejové) [65].

Výhodou difúzních vývěv je konstrukční jednoduchost a z toho vyplývající relativně nízká cena. Dále vysoká mechanická odolnost (absence pohyblivých součástí), dlouhá

životnost a schopnost čerpat jakýkoliv plyn. Difúzní vývěvy se dále vyznačují největším kompresním poměrem [16, 65, 78].

Nevýhodou difúzních vývěv je možnost zpětného toku olejových par do čerpaného objemu. Zabraňuje se tomu nasazením chlazeného lapače olejových par mezi vstup vývěvy a evakuovaný prostor. Tyto lapače ale snižují efektivní čerpací rychlost vývěv. Další nevýhoda difúzních vývěv je poměrně dlouhá doba náběhu (nutnost zahřát náplň na pracovní teplotu cca 200 °C, což trvá 30 až 60 min.) a stejně dlouhá doba ochlazování [3, 78].

"Difúzní vývěvy musejí být vždy umístěny vertikálně a je nutno zamezit vniknutí vzduchu do vývěvy během čerpání, protože hrozí znehodnocení pracovní tekutiny účinkem kyslíku za vysoké teploty" [16, s. 11].



Obr. 2.15 Schéma difúzní vývěvy [16].



Obr. 2.16 Difúzní vývěva [71].

### 2.4.5 Měření nízkých tlaků

Pro měření tlaku vakuových systémů byly vyvinuty přístroje, které nazýváme vakuometry. Z důvodu širokého rozsahu hodnot vakua je potřeba použít různé přístroje pro různé rozsahy tlaků. Důležitými vlastnostmi vakuometrů jsou zejména rozsah měřitelných tlaků, závislost údaje vakuometru na druhu plynu, stálost a přesnost údaje vakuometru [82, 78].

Metody měření nízkých tlaků zpravidla dělíme do dvou základních kategorií [79]:

- 1. absolutní metody měření měří se silový účinek vyvolaný tlakem plynu obvykle srovnávací metodou (porovnání známého a měřeného tlaku),
- 2. nepřímé metody měření ze změn těch fyzikálních vlastností plynů, které závisí na tlaku (tepelná vodivost, ionizační schopnost apod.).

Dále vakuometry dělíme podle principu do těchto skupin [16]:

- 1. tlakové standardy (definují tlak na základě fundamentálních veličin),
- 2. tlakové převodníky (využívají změny tlaku k mechanické deformaci měřícího prvku),
- 3. vakuometry založené na měření vlastností plynu (tepelná vodivost, viskozita aj.),

30

4. ionizační vakuometry (měří elektrický proud procházející evakuovaným prostorem).

K měření tlaku ve vakuových systémech se používají nejčastěji vakuometry založené na třech odlišných principech senzoru (Pirani, Penning, membrána s kapacitním senzorem). Jejich použití je dáno jejich omezeným měřicím rozsahem. Výstup ze senzoru vakuometru je realizován analogově nebo digitálně [85].

#### 2.4.5.1 Tepelné vakuometry

#### Odporový (Pirani) vakuometr

Pro měření tlaku nižšího vakua se využívá Pirani vakuometr, který pracuje na principu změny tepelné vodivosti plynů v závislosti na jejich absolutním tlaku [16]. "*Tlak se měří pomocí vlákna žhaveného průchodem elektrického proudu na konstantní teplotu mezi 110 °C a 130 °C, které je z materiálu s vysokým teplotním koeficientem elektrického odporu"* [3, s. 18]. Toto vlákno je umístěno uprostřed baňky. Vzniklé teplo je odváděno molekulami plynu do stěn této baňky. Množství přeneseného tepla závisí na koncentraci plynu, tzn. i na jeho tlaku. Čím je tlak nižší, tím méně molekul plynu se vyskytuje v evakuovaném prostoru a tím méně tepla je tímto prostorem přenášeno. To zvýší teplotu vlákna a tedy i velikost jeho elektrického odporu R<sub>T</sub> [16, 3]. "*Je-li teplota vlákna na teplotě vyplývá, že nejvhodnější je použít kovy, které mají teplotní koeficient elektrického odporu co nejvyšší. Proto se používají zejména vodiče z platiny, wolframu, niklu či molybdenu"* [3, s. 18].

Tyto vakuometry se používají pro rozsah tlaků  $10^{-1}$  až  $10^{5}$  Pa [16].



Obr. 2.17 Schéma Pirani vakuometru [16].



Obr. 2.18 Pirani vakuometr od společnosti LAVAT [70].

#### List

#### 2.4.5.2 Ionizační vakuometry se studenou katodou

#### Penningův (magnetronový) vakuometr

Pro měření tlaku vyššího vakua se využívá ionizační vakuometr se studenou katodou (Penning nebo inverzní magnetron). Jeho princip spočívá v měření koncentrace plynu (a tedy i tlaku) prováděném pomocí ionizace molekul plynu. Vakuometr využívá jako zdroj elektronů výboj v elektrickém poli vytvořeném stejnosměrným napětím cca 2 kV, které je přivedeno na katodu. Z katody jsou emitovány elektrony, které se prostorem pohybují k anodě. Emitované elektrony naráží během putování prostorem na molekuly plynu a vytváří v plynu ionizovaný proud. Ten přímo souvisí s koncentrací molekul plynu a jeho hodnota je měřena. Pro zvýšení pravděpodobnosti srážek elektronů s velmi zředěnými molekulami plynu jsou elektrody umístěny do silného magnetického pole, které nutí elektrony kroužit po spirálních drahách. Na dráhu vzniklých iontů vzhledem k jejich relativně velké hmotnosti nemá magnetické pole téměř vliv, tyto ionty dopadají na anodu a vytvářejí měřitelný proud [16, 82, 9].

Rozdíl v konstrukci měrky Penning a inverzního magnetronu je především ve vzájemném uspořádání elektrod. Inverzní magnetron navíc obsahuje stínící elektrodu ve tvaru krychle, která má za úkol zabránit vyražení fotoelektronů z katody (měkkým RTG zářením, které vzniká při výboji) a tím výrazně zvyšuje citlivost měrky [16].

Vakuometr Penning je vhodný pro měření tlaků v rozmezí  $10^{-1}$  až  $10^{-7}$  Pa, inverzní magnetron až do  $10^{-11}$  Pa [16].



Obr. 2.19 Schéma Penningova vakuometru [79].



Obr. 2.20 Ionizační vakuometr se studenou katodou v provedení inverzní magnetron od společnosti Pfeiffer Vacuum [69].

#### 2.4.5.3 Kombinovaná vakuová měrka Pirani/Penning

Pro měření tlaku u inovované elektronové svářečky MEBW-60/2 vyvinuté v ÚPT AV ČR se používá kombinovaná vakuová měrka PKR 251 od firmy Pfeiffer Vacuum, namontovaná na elektronové trysce v blízkosti katody.

32

Využívá kombinace dvou separátních měřících metod pro zajištění velkého měřícího rozsahu, a to konkrétně měření pomocí Piraniho termočlánku a ionizačního vakuometru se studenou katodou (v provedení inverzní magnetron). Oba měřící systémy jsou spojeny tak, že na výstupu je jeden jednotný signál. Chovají se tedy jako jeden měřící systém. Měřící obvod Piraniho termočlánku je vždy aktivní. Měřící obvod se studenou katodou je kontrolován obvodem Piraniho termočlánku a aktivuje se při tlaku menším než 1 Pa. Kombinovaná vakuová měrka PKR 251 je schopna měřit tlaky v rozsahu od  $5 \cdot 10^{-7}$  do  $1 \cdot 10^5$  Pa [3].



Obr. 2.21 Kombinovaná vakuová měrka PKR 251 od společnosti Pfeiffer Vacuum [38].

#### 2.5 Elektronická část

Základní prvky elektronické části elektronových svářeček jsou uvedeny na konkrétním příkladu inovované elektronové svářečky MEBW-60/2 (viz obr. 2.22) vyvinuté v ÚPT AV ČR, která svou konstrukcí vychází z elektronové svářečky SES-1.

Elektronika MEBW-60/2 je rozdělena do několika jednotek podle funkce [84]:

- zdroj vysokého napětí (VN),
- jednotka řízení vakua,
- jednotka řízení manipulátoru,
- řízení elektronově optické části trysky,
- zobrazovací a vychylovací jednotka,
- ovládací pult.



Obr. 2.22 Schéma řízení elektronové svářečky MEBW-60/2 [84].

# 2.5.1 Zdroj vysokého napětí

Zdroj vysokého napětí (viz obr. 2.23) musí být schopen vytvořit dostatečné napětí k dosažení požadované energie elektronů a dodat dostatečný výkon k zajištění intenzivního svazku. Zdroj VN generuje urychlovací napětí pro elektronovou trysku, napětí pro žhavení katody a předpětí Wehneltova válce. Je rozdělen na dvě hlavní části: část spojenou se zemí (kostrou přístroje) a část plovoucí na vysokém potenciálu. S ohledem na uspořádání elektronové trysky s uzemněnou anodou je třeba na katodu přivádět vysoký záporný potenciál [84, 10].

Vlastní zdroj VN svářečky MEBW-60/2 je bezolejový o maximálním výkonu 2 kW. Zdroj je spojitě regulovatelný od nuly do maximálního napětí 60 kV. Maximální výstupní proud je 40 mA, který je při napětí vyšším než 50 kV postupně omezován na 33,3 mA při 60 kV (viz obr. 2.24) [84, 10].



Obr. 2.23 Zdroj vysokého napětí [84].



Obr. 2.24 Zatěžovací charakteristika zdroje vysokého napětí elektronové svářečky MEBW-60/2 [84].

### 2.5.2 Jednotka řízení vakua

Jednotka řízení vakua slouží k ovládání částí vakuového systému a dále měří a vyhodnocuje tlak v elektronové trysce a pracovní komoře. Jednotka spouští a vypíná jednotlivé vakuové komponenty ve správném pořadí a ve vhodný okamžik tak, aby čerpací (nebo zavzdušňovací) proces probíhal rychle a bezpečně. Pokud by vakuové podmínky neumožňovaly provoz elektronové svářečky, je nutné, aby jednotka řízení vakua zablokovala činnost dalších jednotek elektronické části svářečky [84].

# 2.5.3 Jednotka řízení manipulátoru

Jednotka řízení manipulátoru je víceosá pohybová kontrolní jednotka určená k řízení stejnosměrných a krokových motorů s možností připojení až osmi nezávislých os [84]. "*Stejnosměrné motory jsou řízeny v servo-smyčce s odměřováním polohy pomocí optických enkodérů namontovaných na hřídeli motoru"* [84, s. 27].

# 2.5.4 Jednotka řízení elektronově optické části trysky

"Zdroj pro elektronovou optiku napájí magnetickou čočku a centrovací systém. Za tímto účelem je vybaven numericky řízenými proudovými zdroji. Pro magnetickou čočku byl navržen unipolární spínaný zdroj s vysokou účinností (cca 85 %), který se obejde bez rozměrného chladiče či nuceného chlazení ventilátorem. Zdroj pro centrovací systém je navržen jako dvojitý bipolární lineární proudový zdroj" [84, s. 26–27].

# 2.5.5 Zobrazovací a vychylovací jednotka

Zobrazovací a vychylovací jednotka je centrum vychylování svazku a zpracování signálů z detektorů zpětně odražených a sekundárně emitovaných elektronů. Zobrazovací systém využívá principu rastrovacího elektronového mikroskopu (REM). Pomocí vychylovacích cívek se rastruje svazkem po povrchu svařované součástky a signál z detektoru zpětně odražených elektronů je zpracován a vytváří obraz součástky na monitoru. Rozlišení

obrazu je omezeno velikostí průměru stopy elektronového svazku, která je při nízkých hodnotách proudu (asi 1 mA) ve svazku cca 0,1 mm [84, 10].

Mimoosový detektor, umístěný na malé přírubě ve vakuové komoře, snímá svařovanou součástku přibližně pod úhlem 45°. Jeho konstrukce je na rozdíl od detektorů používaných v elektronových mikroskopech jednoduchá, tvoří ho pouze snímací elektroda [10].

Příklad zobrazení s použitím bočního detektoru je na obr. 2.25.

Osový detektor, umístěný na ose elektronové trysky, snímá elektrony, které se odrážejí od svařované součásti přibližně proti směru primárního svazku. Výhodou osového detektoru je, že umožňuje zobrazit i oblasti součásti uvnitř dutiny, která je v ose elektronového svazku. V porovnání s mimoosovým detektorem má ale horší zvýraznění tvaru součásti a reliéfu povrchu [10].

Příklad zobrazení s použitím axiálního detektoru je na obr. 2.26.



Obr. 2.25 Zobrazení v REM režimu pomocí bočního detektoru [58].



Obr. 2.26 Zobrazení v REM režimu pomocí axiálního detektoru [84].

### 2.5.6 Ovládací panel

Ovládací panel (viz obr. 2.27) je základním uživatelským rozhraním zařízení. Jeho prostřednictvím se dají snadno nastavovat různé parametry svazku. Ovládací panel zajišťuje koordinaci celého systému a zprostředkovává uživatelský vstup. Hlavní částí panelu je grafický displej (viz obr. 2.28), který zobrazuje provozní hodnoty jako velikost urychlovacího napětí, proud ve svazku, proud fokusační cívkou, stav vakuového systému apod. Po stranách displeje jsou umístěna tlačítka a otočné voliče, jejichž funkce je zobrazena na přilehlém místě na displeji a mění se podle potřeby. Otočné voliče jsou doplněny čtyřmístnými displeji, které zobrazují hodnotu ovládané veličiny [10].

List



Obr. 2.27 Ovládací panel elektronové svářečky MEBW-60/2 [10].

14:25:26	🔫 Manual welding 🛛	Chrnb light
<i>P</i> 816.2 mA × 1.0 ⊻ -0.4 mA	(Vacuum ready)	8 <b>8</b>
(∰) 0T 49° ∯‡ 0.00 mm 0.00 rpm ∯‡ 0.00 mm/s	3.50 A 993.6 V 993.6 V 993.6 V 993.6 V 993.6 V 993.6 V 993.6 V 993.6 V	ocus (±wob) 65.76% n lapipul (±0)
VACUUM PUMPS Main Aux Backing	OTHER VACUUM DEVICES	0.0 Man.
1001 Hz 1502 Hz	<b>Е́</b> А 	Emission :: 0.68 mA :: 0.00 mA
VENTING VALVES		flection(±0) * x: 0.00%
Preparation Beam ctrl	Scan&View Welding	n y: 0.00%

Obr. 2.28 Zobrazení údajů na displeji elektronové svářečky MEBW-60/2 [84].
### 3 PRACOVNÍ KOMORA ELEKTRONOVÉ SVÁŘEČKY

Pracovní vakuová komora je centrálním prvkem každé elektronové svářečky. Její velikost je úměrná rozměrům svařované součásti [52, 23].

Vznik elektronového paprsku a práce s ním vyžaduje přiměřené vakuum uvnitř pracovní komory z důvodu zamezení střetů elektronů s molekulami vzduchu. Nedostatečně vysoké vakuum, popř. atmosférický tlak vzduchu, je příčinou oslabení a pohlcení elektronového svazku. Potřeba vakua je proto částečně omezujícím faktorem, protože zařízení vyžaduje poměrně drahou vakuovou komoru a svařovací proces se prodlužuje o dobu čerpání komory. V pracovní komoře není nezbytně nutné vytvoření tak vysokého vakua, jako v elektronové trysce (zbrždění a vychýlení elektronů srážkami s molekulami zbytkových plynů je do tlaku cca 1 Pa zanedbatelný) [52, 34].

Existují i elektronové svářečky využívající k přivedení svazku elektronů do místa svaru mobilní komoru s lokálním vakuem. Tato zařízení se využívají pro svařování velkých celků, dlouhých hřídelí, rovných plechů, válcových komor nebo potrubí. Elektronová tryska s mobilní komorou se pohybují po povrchu svařované součásti a jejich čerpací soustava musí být schopna udržet vysoké vakuum i za značně nepříznivých podmínek (viz obr. 3.1) [55, 11].



Obr. 3.1 Elektronová svářečka s mobilní komorou [55].

Pracovní komory jsou také navrhovány s ohledem na zamezení úniku rentgenového záření [84]. "K odstínění zdraví škodlivého RTG záření u zařízení s urychlovacím napětím nižším než 60 kV stačí obvykle stínící účinek samotných stěn vakuové pracovní komory. Při vyšším urychlovacím napětí jsou však nutná další opatření (stínění olověným plechem apod.)" [81].

#### 3.1 Velikost pracovní komory

Pracovní komory zařízení pro elektronové svařování se pohybují v širokém rozsahu velikostí a volí se dle rozměrů svařované součásti. Dnešní komerční elektronové svářečky disponují pracovními komorami od nejmenších o vnitřním objemu několika litrů (např. elektronová svářečka MEBW-60/2 využívaná v ÚPT disponuje komorou o objemu přibližně 7 l) až po obří zařízení s objemem 630 m<sup>3</sup> [10].



Obr. 3.2 Elektronová svářečka Pro Beam s pracovní komorou o objemu 630 m<sup>3</sup> [14].

#### 3.2 Tvar pracovní komory

Základní tvar pracovních komor bývá obvykle válcový nebo krychlový, případně kvádrový. Vzhled komory je navrhován podle budoucí predikce tvarů a velikostí svařovaných součástí, které by se měly v dáné vakuové komoře svařovat.



Obr. 3.3 Modifikovaná elektronová svářečka ES-2 [15].



Obr. 3.4 Válcová pracovní komora elektronové svářečky MEBW-60/2 [15].



Obr. 3.5 Válcová pracovní komora elektronové svářečky MEBW-60/2 – vnitřní pohled [15].



Obr. 3.6 Krychlová komora elektronové svářečky EVOBEAM cube 250 společnosti Sciaky [57].



Obr. 3.7 Elektronová svářečka společnosti Sciaky kvádrového tvaru [57].

### 3.3 Umístění elektronové trysky

U většiny elektronových svářeček může být poloha elektronové trysky na komoře volena tak, že její osa je buď kolmá na osu rotačního manipulátoru (či X-Y manipulátoru) nebo s ní rovnoběžná a je tedy možné provádět radiální nebo axiální svary [48].

40



Obr. 3.8 Elektronová tryska umístěná na boku pracovní komory [37].



Obr.3.9 Elektronová tryska umístěná pracovní komory [18].

#### 3.4 Dveře pracovní komory

V předním odklopném víku (někdy i na dalších stěnách komory, pokud je tvar krychlový či kvádrový) je umístěn průzor pro pozorování procesu svařování. Při dopadu elektronů na svařovaný povrch dochází k jejich částečnému odrazu (až 70 %). Interakcí elektronů s atomy kovu je emitováno z místa dopadu rentgenové záření (RTG), tepelné záření, dále se uvolňují sekundární elektrony, molekuly kovu a kladné ionty. Z důvodu vyzařování RTG je průzor opatřen olovnatým sklem kvůli ochraně obsluhy [1, 10].

Olovnaté sklo bývá umístěno z vnější strany komory (na straně bez vaku) a bývá doplněno floatovým pevnostním sklem, které je umístěno na vnitřní straně komory.

Skla musí být utěsněna těsnícími prvky (nejčastěji těsnícími gumovými kroužky), aby nedocházelo k vnikání vzduchu do komory a tím ke snižování dosaženého stupně vakua [82].



Obr. 3.10 Kruhový průzor pracovní komory [33].

#### List

#### 3.4.1 Umístění dveří

Dveře pracovních komor jsou umísťovány s ohledem na co nejlepší dostupnost pro manipulaci a dostatečný prostor pro otevření dvěří. Proto jsou prakticky vždy umístěny na čelní straně komory.

#### 3.4.2 Tvar dveří

Tvar dveří se odvíjí od základního tvaru komory. V drážce po obvodu dveří, případně na čele pracovní komory, kde dveře doléhají na stěnu komory bývá použito těsnění pro zamezení vnikání vzduchu do komory a tím ke snižování dosaženého stupně vakua.

#### 3.4.3 Způsob otevírání/zavírání dveří

Výrobci elektronových svářeček používají různé druhy mechanismů pro otevírání nebo zavírání vstupních dveří pracovních komor. Základním druhem je dvojitý pant, který slouží k doražení dveří po celé ploše čela pracovní komory.



Obr. 3.11 Dvojité panty dveří pracovní komory [17].



Obr. 3.12 Dvojité panty dveří pracovní komory [33].



Obr. 3.13 Výklopné víko pracovní komory se spodním uchycením [44].

Dalším typem bývají pojezdové dveře. Jejich využití je zpravidla u robustních pracovních komor.



Obr. 3.14 Pracovní komora s pojezdovými dveřmi společnosti Sciaky [43].

#### 3.5 Umístění vakuového systému

Vakuový systém čerpací soustavy býva zpravidla umístěn na zadní straně vakuové komory (viz obr. 3.15), případně z boku komory (viz obr. 3.16), aby systém vývěv, čerpacích hadic, elektrických kabelů a vakuových měřidel nepřekážel obsluze elektronové svářečky při manipulaci (vkládání, upínání, vyjímání) se svařovanou součástí v pracovní komoře.



Obr. 3.15 Vakuový systém elektronové svářečky MEBW-60/2 umístěný na zadní straně komory [84].



Obr. 3.16 Vakuový systém elektronové svářečky umístěný na boční straně komory [59].

### 4 TECHNOLIGIE SVAŘOVÁNÍ PRACOVNÍCH KOMOR

#### 4.1 Úvod

Svařováním vznikají nerozebiratelná spojení částí povrchů dvou nebo více dílů. Cílem svařování je vyrobit vyhovující spojení těchto povrchů, kdy vzniklý spoj musí vykazovat požadované vlastnosti, nebo vyhovovat podmínkám provozování spojených dílů [55].

Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. Z důvodu obtížného dosažení spojení na úrovni meziatomových vazeb za běžné teploty a tlaku, kdy je termodynamický stav materiálů stabilní resp. metastabilní, je potřeba tento termodynamický stav změnit. Proto je při svařování nutné působit množstvím energie (buď tlakem, teplem nebo oběma faktory najednou) s použitím nebo bez použití přídavného materiálu stejného nebo podobného chemického složení jako je spojovaný materiál. Obecně platí závislost, že čím vyšší působí tlak, tím méně je potřeba vnést teplo a obráceně. Při svařování dojde vždy ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností základního (spojovaného) materiálu v okolí spoje [63]. "*Při samotném svařování dochází k interakci mnoha vlivů, např. difúze, deformace, rekrystalizace, precipitace, rozpouštění a vznik nových fází, atd., jejichž existence a vývoj závisí na dané použité metodě. Po ukončení procesu svařování vzniká takový spoj, který nelze bez vložení další energie nedestruktivně rozebrat, to vše za předpokladu kvalitně provedeného svaru" [63, s. 19].* 

Svařovat lze kovové i nekovové materiály, dále materiály podobných i různých vlastností. Pro různé typy spojů a materiálů jsou vhodné jiné metody svařování [63].

Svařování má velmi rozsáhlé uplatnění v oblastech elektrotechniky i elektroniky, strojírenské výrobě, stavbě strojů, budov, mostů, dále u tlakových nádob pro chemii a energetiku, v letectví a kosmickém průmyslu [11].

Pro svařování tlakových nádob, u kterých je potřeba svaření tlustších dílů a zároveň je potřeba zabezpečit dosažení kvalitního provaření spojovaného materiálu, je vhodné použít tyto metody svařování:

- elektronové svařování,
- laserové svařování,
- svařování metodou WIG (TIG),
- svařování metodou MIG/MAG.

#### 4.2 Elektronové svařování

Je to tavné svařování, které pro natavení stykových ploch využívá energie z vysoké rychlosti koncentrovaného paprsku elektronů, který dopadá na základní materiál. Vysokou energií svazku (koncentrace energie až  $5 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) se tvoří svar s minimální oblastí natavení bez nutnosti použití přídavného materiálu. Svar se tedy tvoří metalurgickým natavením obou polovin svařované součásti. Pro svařování svazkem elektronů je charakteristická minimální mezera (optimálně cca 0,1 mm) mezi spojovanými materiály. Průměr paprsku při dopadu na materiál se řídí šířkou spáry a bývá přibližně čtyřnásobný, aby bylo zajištěno dokonalé překrytí. Zařízení mohou svařovat úzkým svazkem s průměrem až 0,05 mm. Svařování vyžaduje vysokou čistotu svaru s dokonalým

odmaštěním, protože zbytky tuků na povrchu svarových ploch se při ohřevu odpařují a vytváří vady ve svaru (bubliny a póry). Svary mohou vznikat při rychlosti až 20 m $\cdot$ min<sup>-1</sup> s velmi malou (několik desetin mm) tepelně ovlivněnou oblastí [60, 1].

Elektronové svařování může vytvářet hluboké a tenké svary. Poměr štíhlosti svaru  $\psi$  dosahuje hodnot 20 až 50 v závislosti na fokusaci paprsku [1].

$$\psi' = \frac{h}{b''} \tag{4.1}$$

kde:  $\psi'[-]$  – poměr štíhlosti svaru,

h [mm] — hloubka svaru,

b' [mm] — šířka svaru.



Obr. 4.1 Tvar svaru [1].

Svary vznikají ve vakuu, které eliminuje kontaminaci svarové lázně plyny. Vakuum nejen chrání před kontaminací, ale vytváří i stabilní svazek. Koncentrovaná povaha tepelného zdroje dělá proces velmi vhodným pro korozivzdorné oceli. Dosažitelný výkon může být snadno řízen a stejný svařovací stroj může být použit pro jednovrstvé svařování materiálu o tloušť ce od 0,1 do 50 mm, při vodorovné poloze svaru lze svařovat až 400 mm [60, 1].



Obr. 4.2 Svarový spoj vytvořený elektronovým svazkem [47].

List

Metoda spojování materiálu elektronovým svařováním se dříve využívala především v oblasti vesmírné techniky, letecké techniky a jaderné energetiky. Dnes se využívá teměř ve všech oblastech strojírenství, jako např. v energetice (potrubí u vyměníků tepla, kontrolní sondy, rotory turbín apod.), v automobilovém průmyslu, ve speciální strojírenské technice i v elektrotechnice [45, 1].

Elektronovým svařováním lze velmi dobře svařovat vysokolegované austenitické korozivzdorné oceli. Při svařování nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí je nutná vysoká čistota materiálu, především obsah fosforu a síry nesmí překročit 0,015 % (způsobují výrazný pokles plasticity s možností vzniku trhlin) [1].

Tato metoda umožňuje spojovat i chemicky velmi aktivní kovy – Ti, Zr, Mo, Nb, Hf, W aj., které mají vysokou afinitu ke kyslíku, dusíku a vodíku (tyto plyny při reakci s kovem zhoršují jeho mechanické vlastnosti). Je možné svařovat i vysokotavitené a žárupevné slitiny typu Inconel, Nimonic. Elektronovým svařováním lze spojovat i kombinace materiálů: Ti – Al, CrNi ocel – Al, Cu – Al, Cu – ocel, Al – Ni, atd., které jsou tavným způsobem nesvařitelné z důvodu vzniku křehkých intermetalických fází, které způsobují výrazné snížení plastických a pevnostních vlastností svarového kovu a způsobují praskání spoje. Vysoká koncentrace energie při svařování elektronovým svazkem vytváří svar s minimální oblastí natavení a omezuje tvorbu těchto křehkých fází. Tím se získá svar s vhodnými plastickými vlastnostmi [1].

Dle ČSN EN ISO 4063 je číselné označení metody elektronového svařování – 51 [36].

Výhody elektronového svařování:

- velmi dobrý vzhled svaru s jemnou povrchovou kresbou,
- možnost svařovat tl. 0,1 až 400 mm,
- úzká natavená a tepelně ovlivněná oblast svaru,
- minimální deformace,
- možnost svařování v nepřístupných místech pro klasické technologie,
- dokonalá ochrana svaru před vlivem vzdušné atmosféry,
- možnost přenosu energie i na vzdálenost větší jak 500 mm,
- velice snadná a programovatelná regulace výkonu paprsku,
- svařování na jeden průchod paprsku,
- svařitelnost širokého sortimentu materiálů a jejich kombinací [1].

#### 4.2.1 Princip svařování elektronovým svazkem

Podstata procesu svařování elektronovým svazkem ve vakuu je popsána v kapitole 1.3.

#### 4.2.2 Zařízení pro svařování elektronovým svazkem

Základní části zařízení pro elektronové svařování jsou popsány v kapitole 2. Velikosti a tvary pracovních komor jsou zobrazeny v kapitole 3.

#### 4.3 Laserové svařování

Název LASER vznikl složením počátečních písmen anglických slov popisující princip jeho činnosti – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření [1].

"Celý proces zesílení začíná excitací iontů nebo molekul na horní vibrační hladinu. Vyzáření fotonu je realizováno při přechodu iontů nebo molekul z vyšší metastabilní hladiny zpět na hladinu základní. Přechod je stimulován fotonem o stejných vlastnostech. Proces zesílení má charakter řetězové reakce a je dále zvyšován průchody rezonátorem – aktivním prostředím laseru, které je uzavřeno dvěma zrcadly se vzdáleností rovnající se násobku vlnové délky emitovaného záření. Zrcadlo se 100% odrazivostí vrací všechny fotony do aktivního prostředí, ale polopropustné zrcadlo s 80% až 90% odrazivostí propustí po dosažení kritického množství fotonů část záření ve formě krátkého vysokoenergetického pulsu" [1, s. 31].



Obr. 4.3 Základní schéma laseru [29].

Technologie svařování materiálů laserem je vhodná tam, kde je nutné zrealizovat velmi náročné svary z hlediska kvalitativního a z hlediska sériové a hromadné výroby při požadavku automatizace tohoto procesu. Metoda laserového svařování je nejčastěji využívána ve strojírenské výrobě, zvláště pak v automobilovém průmyslu, zbrojní výrobě, výrobě svařovaných profilů a trubek, tepelných výměníků, hřídelí, ozubených kol apod. Dále se s laserovým svařováním setkáme tam, kde jsou plně využity jeho technologické přednosti a kde by jiná metoda spojování nebyla technicky možná (výroba chirurgických nástrojů a medicínských komponent, elektronické prvky atd.). Lasery lze aplikovat vedle výrobních operací také v opravárenství (renovace forem apod.) [77, 51].

Vhodným materiálem pro svařování laserem jsou vysokolegované oceli, nikl, molibden aj. Dále lasery umožňují svařovat materiály s vysokou tepelnou vodivostí (měď, stříbro, hliník) i materiály s vysokou teplotou tavení (wolfram, tantal, zirkonium, titan atd.) [1].

Dle ČSN EN ISO 4063 je číselné označení metody laserového svařování – 52 [36].

Výhody laserového svařování:

- vysoká produktivita,
- vysoká kvalita a pevnost svaru,
- lehce dosažitelný úzký a hluboký svar u širokého spektra materiálů,
- setrvačnost laserového paprsku je velmi malá, laserové svařování je proto vhodné pro automatizaci,
- svařování probíhá na vzduchu bez použití vakua pouze se speciální inertní přídavnou atmosférou

48

- laserový paprsek může lokálně svařovat i na místech těžko dostupných, kde by to bylo jinými způsoby svařování obtížné,
- svařování probíhá s velmi malým vstupem energie na jednotku délky, výsledkem čehož jsou malé deformace, malé zbytkové vnitřní pnutí vzniklé svařováním a malé tepelně ovlivněné pásmo,
- metoda je vhodná pro svařování velmi tenkých materiálů řádově několik mikrometrů [77, 28, 53].

#### 4.3.1 Princip svařování laserem

Na obr. 4.4 jsou znázorněny dva základní principy laserového svařování.

Při svařování vedením tepla (obr. 4.4a) se materiál taví absorpcí a vedením tepla dopadajícím laserovým svazkem. To umožňuje svařování jen do relativně malých hloubek průvaru. Rychlost svařování může být proto vyšší a pro některé aplikace (kde je rychlost svařování důležitější než úzký a hluboký průvar) vyhovující [28].

Zvyšováním plošné hustoty výkonu na kritickou hodnotu  $(10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$  dochází k tvorbě par kovů nad povrchem svařovaného materiálu. Společně s působením vysoké plošné energie fokusovaného laserového paprsku se tvoří plasma a začíná docházet k hlubokému provařování (viz obr. 4.4b a 4.5). Laserový paprsek vytvoří kapiláru a tlak plynů vystupujících z kapiláry pak brání jejímu uzavření. Plasma nad povrchem materiálu ovlivňuje tvar kapiláry (brání pronikání fotonů do svarové spáry, pohlcuje velkou část záření svazku a snižuje hloubku průniku fotonů). Ze stěn kapiláry se následně dostává vložená energie laserového paprsku do taveniny a dále do tuhého materiálu. Tímto procesem může laserový paprsek pronikat hluboko do materiálu a vytváří tzv. keyhole. Při pohybu samotného svařovaného materiálu nebo fokusovaného laserového svazku vzniká svarový šev [28, 1].

Působení energie laserového paprsku příznivě ovlivňuje ochranný plyn. Všeobecně používané ochranné plyny (Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> a nejlepší výsledky vykazuje He) zvyšují a stabilizují stupeň absorpce plazmatu indukovaného laserem. Tak může energie laserového paprsku po vzniku plazmatu skoro zcela vniknout do materiálu a zvýšit tak efekt hloubkového provaření – keyhole. Ochranný plyn současně chrání chladnoucí taveninu před oxidací. Některé materiály můžeme svařovat i bez ochranné atmosféry, pokud to dovoluje vytvoření plasmy a povrchová oxidace je přijatelná [28].



Obr. 4.4 Porovnání laserového svařování: a) vedením tepla, b) hlubokého svaru (keyhole) [28].



Obr. 4.5 Princip laserového svařování [51].

#### 4.3.2 Zařízení pro svařování laserem

Jednotlivé typy laserových zařízení se dělí podle typu výstupního paprsku na tzv. pulzní a kontinuální [45].

Pulzní lasery jsou menší zařízení, které generují laserový paprsek ve formě krátkodobých pulzů. Jsou vhodné pro bodové svařování v elektrotechnice i v automobilovém průmyslu. Tato zařízení dodávají výkon cca 20 až 500 W [45].

Druhým typem jsou lasery schopné generovat souvislý laserový paprsek. Ty jsou vhodné pro svařování tupých i přeplátovaných spojů, dále pro řezání nebo kalení. Výkony těchto zařízení jsou běžně od 0,5 do 20 kW, některé typy dosahují až 40 kW. Tato zařízení jsou schopna svařovat i v pulzním režimu [45, 40].

Dále lasery dělíme podle typu aktivního prostředí. Hlavními představiteli jsou lasery:

- plynové (CO<sub>2</sub> laser),
- pevnolátkové (Nd:YAG laser, diskový laser),
- vláknové,
- polovodičové (diodové) [29, 27].

### 4.3.2.1 Plynové lasery

### CO<sub>2</sub> laser

Aktivní prostředí  $CO_2$  laserů je tvořeno směsí plynů He +  $N_2$  +  $CO_2$  uzavřených ve skleněné trubici. Vysokonapěťovým nebo vysokofrekvenčním elektrickým výbojem se vybudí molekuly dusíku do vyššího energetického stavu. Nepružnými srážkami předají svoji energii molekulám oxidu uhličitého, čímž dojde k jejich excitaci, a při následném sestupu vyzařují na vlnové délce 10,6 µm. Helium přitom urychluje návrat molekul  $CO_2$  do základního stavu (odebírá oxidu uhličitému excitační energii), aby se celý proces excitace a následné emise záření mohl opakovat a díky vysoké tepelné vodivosti ochlazuje aktivní prostředí laseru [62, 1].

50



Obr. 4.6 Princip plynového laseru [1].

Směs plynů proudící v trubici musí být neustále doplňována. Podle způsobu proudění rozlišujeme  $CO_2$  lasery s podélným nebo příčným prouděním pracovní látky [62].

Typy s podélným prouděním jsou buzeny elektrickým výbojem v ose trubice, ve které rychlost směsi plynů dosahuje až 500 m $\cdot$ s<sup>-1</sup>. Výstupní svazek má vysokou kvalitu, a proto se používá převážně pro řezání materiálů [62].

Typy s příčným prouděním poskytují méně kvalitní svazek, který je vhodný spíše pro svařování. Je to dáno nízkou rychlostí proudění plynů kolmo k ose rezonátoru. U těchto typů je výrazně menší spotřeba plynů, a proto jsou i náklady na jejich provoz nižší [62].

Plynové  $CO_2$  lasery mohou pracovat v kontinuálním nebo pulsním režimu. Účinnost klasických  $CO_2$  laserů dosahuje 10 až 20 %. Výkon závisí na rozměrech rezonátoru, typu buzení i způsobu výměny pracovní látky a může dosahovat několika mW až 20 kW [62, 1].

Nejnovějším typem  $CO_2$  laseru je difúzně chlazený deskový SLAB laser (viz obr. 4.7). Nepotřebuje souvisle vnější zdroj plynové směsi, jelikož obsahuje zásobník pro přibližně rok nepřetržitého provozu. Díky tomu se značně snižují náklady na údržbu i servis [62].

K odvodu tepla u SLAB laseru dochází jeho rozptylem na vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrodách. Díky nové konstrukci rezonátoru jde o systém s vysokou kvalitou svazku, nízkou spotřebou plynů i energie a vysokou spolehlivostí z důvodu absence pohyblivých částí. Výstupní výkony SLAB laserů jsou v rozmezí 0,5 až 2,5 kW [62, 1].



List

"Na rozdíl od laserů s vlnovou délkou cca 1µm, nelze záření  $CO_2$  laseru (10,6µm) vést optickým vláknem a je nutné pro vedení svazku používat zrcadla, což je velká nevýhoda – optická dráha je složitější, je nutná její pravidelná kalibrace, jsou zde nároky na čistotu a údržbu zrcadel atd." [27].

#### 4.3.2.2 Pevnolátkové lasery

#### Nd:YAG laser

Z uvedených typů laserů je to historicky nejstarší typ využívaný v průmyslu. Aktivní prostředí tvoří matrice umělého YAG krystalu dopovaného ionty neodymu (Nd) nebo ytterbia (Yb). Používají se Nd:YAG lasery buzené výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state, viz obr. 4.8) nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state) [27].

LPSS Nd:YAG lasery mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, neboť velká část energie výbojky se nevyužije a přemění se na teplo (je nutné chlazení vodou) [27].

LPSS Nd:YAG lasery se používají zejména v pulsním režimu pro laserové svařování a vrtání. Výhodou je vysoká energie v pulsu (až 600 W), kterou tyto aplikace vyžadují. Nevýhodou je nízká účinnost (do 5 %), velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost výbojek (~1 000 h) [27].



Obr. 4.8 Nd:YAG laser buzený výbojkami [27].

U DPSS Nd:YAG laserů se rozlišují dva hlavní typy buzení dle uspořádání rezonátoru – boční buzení a zadní buzení. U zadního buzení (viz obr. 4.9) se budící záření z laserových diod vede do YAG krystalu optickým vláknem – diody tak mohou být umístěny mimo rezonátor. Zadní buzení dosahuje lepší kvality svazku, ale nižších výkonů, boční buzení naopak dosahuje vyšších výkonů, ale kvalita svazku je nižší [27].

DPSS Nd:YAG lasery se používají hlavně v tzv. Q-spínaném pulsním režimu, kdy laser generuje velmi krátké pulsy v řádech ns a výkon se pohybuje do 100 W. Hlavní použití je pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. DPSS Nd:YAG lasery v kontinuálním režimu poskytují výkon až 5 kW a využívají se ke svařování a řezání. V porovnání s LPSS Nd:YAG lasery mají vyšší účinnost, delší životnost (~10 000 h) a menší nároky na chlazení [27, 1].



Obr. 4.9 Nd:YAG laser buzený laserovými diodami se zadním buzením [27].

#### Diskový laser

Princip je podobný jako u Nd:YAG laseru, aktivní prostředí ale tvoří malý disk s výhodnějším principem čerpání pomocí pole laserových diod. Výhodou je rovný teplotní profil po celém disku, který umožňuje dosáhnout vysokých výkonů (až 16 kW) s dobrou kvalitou výstupního svazku, což byl problém u Nd:YAG laserů. Tento princip laseru je však poměrně náročný na mechanickou výrobu a jeho účinnost oproti Nd:YAG laserům není výrazně vyšší [27, 28].

Diskové lasery se používají zejména pro výkonově náročné operace jako svařování a řezání kovů. Nevýhodou je menší účinnost (15 až 20 %) a nižší životnost než u laserů vláknových [27].



Obr. 4.10 Diskový laser [27].

#### 4.3.2.3 Vláknové lasery

Vláknový laser je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Aktivní prostředí tvoří dlouhé optické vlákno dopované ionty erbia (Er) nebo ytterbia (Yb) (viz obr. 4.11). Buzení z laserových diod je vedeno optickými vlákny přes optickou spojku do aktivního vlákna. Jedná se o tzv. vlákno-vlákno architekturu a laser díky tomu neobsahuje žádné optomechanické prvky jako zrcadla apod. [27,40].



Obr. 4.11 Princip vláknového laseru [30].

Velkou výhodou vláknového laseru je jeho jednoduchost (celý laser tvoří optické vlákno), robustnost a modularita, která je u těchto laserů unikátní – laser je tvořen tzv. laserovými moduly, jejichž spojováním se může postupně navyšovat výkon (dnes až 80 kW). Další výhody jsou vysoká účinnost (30 až 35 %), obrovská životnost (až 100 000 h), malé prostorové nároky, vysoká kvalita laserového svazku, nejnižší provozní náklady ze všech uvedených typů laserů a téměř nulové nároky na údržbu [27].

#### 4.3.2.4 Polovodičové (diodové) lasery

Aktivní prostředí diodových laserů je elektricky čerpaná polovodičová dioda. Výkon těchto laserů se pohybuje v rozmezí mW až do kW. Diodové lasery mají vysokou účinnost, ale trpí nízkou kvalitou výstupního svazku, která neumožňuje dosahovat vysokých hustot energie. Mají velmi malé rozměry (pro nízké výkony) a používají se v CD/DVD přehrávačích, laserových tiskárnách apod. Diodové lasery s vysokým výkonem se v průmyslu používají zejména na svařování (kovů i plastů) a povrchové kalení [29].



Obr. 4.12 Princip diodového laseru [20].

# 4.4 Svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu – WIG (Wolfram Inert Gas) = TIG (Tungsten Inert Gas)

Je to oblouková metoda svařování, kde elektrický oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Podobně jako u metody MIG/MAG vzniká teplo potřebné pro natavení základního materiálu (a případně i přídavného materiálu ve formě drátu – ne vždy se používá) hořením elektrického oblouku. K ochraně elektrody a tavné lázně před okolní atmosférou se používá netečný plyn o vysoké čistotě minimálně 99,995 % procházející keramickou plynovou hubicí. Na rozdíl od metody MIG/MAG, je metodou TIG možno svařovat jak stejnosměrným, tak i střídavým proudem (zejména u svařování hliníku se využívá tzv. čistícího efektu střídavého elektrického proudu) [1].

Jedná se o méně produktivní metodu v případě ručního svařování a klade vyšší nároky na zkušenosti svářeče. Metoda TIG se nejčastěji používá v energetice, chemickém průmyslu, opravárenství, pro svařování trubek, rámů kol a motorek, tlakových nádob nebo při svařování speciálních materiálů a menších tloušťek. Nevýhodu menší produktivity částečně eliminuje možnost mechanického podávání drátu, případně úplné automatizace svařování [25, 1].

Metoda TIG se nejčastěji používá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin, dále vysokolegovaných ocelí, mědi, niklu, titanu a dalších [1].

Dle ČSN EN ISO 4063 je číselné označení metody TIG – 141 [63].

Výhody metody TIG:

- pravidelné formování kořene i povrchu svaru,
- vysoká celistvost, příznivé mechanické a fyzikálně-chemické vlastnosti vytvořených spojů,
- inertní plyn zabraňuje propalu prvků (vzniku strusky) výsledkem je čistý povrch svaru,
- svarová lázeň je dokonale chráněna ochranným plynem od účinků okolní atmosféry, svarové spoje jsou pevnější, houževnatější a korozivzdornější než svarové spoje svařované většinou jiných metod,
- svarová lázeň je dobře viditelná a snadno ovladatelná,
- svařovat lze ve všech polohách,
- vytváří elektrický oblouk s vysokou stabilitou v širokém rozsahu svařovacích proudů,
- svary mají malou tepelně ovlivněnou oblast a minimální deformace [25, 1].

#### 4.4.1 Princip svařování metodou TIG

Energie ve formě tepla se získává zapálením oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Přídavný materiál není nutný (zejména při svařování lemových a přeplátovaných tenkých materiálu), ale používá se při svařování materiálu větších tlouštěk [25].



#### 4.4.2 Základní parametry TIG svařování

•	polohy svařování	_	všechny (PA až PF dle ISO 6947),
•	druh svařovacího proudu	_	stejnosměrný (DC) i střídavý (AC),
•	proud	_	10 až cca 500 A,
•	teplota oblouku	_	6 500 až 9 000 °C,
•	používané ochranné plyny	_	argon, helium (někdy malé množství
			vodíku),
•	materiál elektrody	—	čistý wolfram, nebo legováno oxidy thoria,
			ceru, lanthanu nebo zirkonu [25].

### 4.4.3 Základní sestava zařízení pro svařování metodou TIG

Zařízení pro svařování metodou TIG sestává ze základních prvků (viz obr. 4.14). Zdroj stejnosměrného svařovacího proudu generuje usměrňovač se síťovým transformátorem nebo invertor, zdroj střídavého proudu generuje nejčastěji svařovací transformátor. Systém je možno doplnit o mechanické podávání drátu, případně pro dlouhé průběžné svary zařízení posadit na svařovací traktor nebo robotické zařízení. Kromě hardwarového vybavení se výrobci předhánějí v softwarovém řízení elektrického oblouku. Nově vyráběné zdroje jsou řízeny mikroprocesorem, tedy umožňují nepřeberné množství regulace oblouku [25, 1].



Obr. 4.14 Základní sestava zařízení pro svařování metodou TIG [25].

#### 4.4.4 Moderní vývoj metody TIG

Pomocí plně digitálního řízení svařovacího procesu je možné regulovat a dle potřeby měnit průběh proudu. Vznikly tak např. metody TIG Pulse, Hybrid Pulse nebo Dual Pulse. Řízení průběhu proudu umožňuje např. snížit množství vneseného tepla na potřebné minimum, snížit vypalovaní legur u vysokolegovaných ocelí atd. [39, 1, 8, 56].

Vývoj metody TIG se zabýval i zvýšením produktivity resp. zvýšením výkonu svařování a tedy velikostí průvaru. Vznikla tak metoda A-TIG, která spočívá v nanesení tenké vrstvy tzv. aktivátoru (tavidla) na povrch svařovaného materiálu, který má za následek zúžení oblouku a zvýšení sil působících v elektrickém oblouku [22].

# 4.5 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (Metal Active Gas)

Jedná se o obloukové svařování tavící se kovovou elektrodou v aktivní (chemicky reaguje s roztavenou lázní) plynové atmosféře. Společně s technologií obloukového svařování tavící se kovovou elektrodou v ochraně inertního plynu – MIG (Metal Inert Gas – rozdíl je v inertní (netečné) atmosféře plynu) patří mezi nejrozšířenější metody nejen obloukového svařování, ale i svařování vůbec. Obecně se dá říci, že se používá ve všech odvětvích průmyslové výroby. Důvodem je vysoká produktivita, dostupnost technologie (svařovací zdroje, široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů), v porovnání např. s metodou TIG relativně menší nároky na zručnost a zkušenosti ručních svářečů, ekonomika svařování, možnost automatizace atd. [1].

Metoda MAG se využívá při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí [1].

#### DIPLOMOVÁ PRÁCE

Dle ČSN EN ISO 4063 je číselné označení metody MAG – 135 [63].

Výhody metody MAG:

- svařování ve všech polohách,
- minimální tvorba strusky,
- oblouk i svarová lázeň je jasně viditelná,
- odstranění prostoje na výměnu klasických elektrod (poloautomatický zp. svařování),
- velmi dobrý profil svaru a hluboký závar,
- vysoká proudová hustota,
- široký proudový rozsah pro jeden průměr svařovacího drátu,
- vysoká svařovací rychlost = vyšší produktivita,
- při svařování ve zkratovém přenosu nižší vnesené teplo do svařence = menší deformace [1].

#### 4.5.1 Princip svařování metodou MAG

Teplo potřebné pro natavení přídavného a základního materiálu vzniká hořením elektrického oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním svařovaným materiálem v ochranné atmosféře aktivního plynu [1]. Svařovací oblouk má délku přibližně 2 až 7 mm a průměr 1 až 10 mm [26].



Obr. 4.15 Princip svařování tavící se elektrodou – MIG/MAG [26].

"Elektrický oblouk využitelný ve svařování je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Stabilně hoří za předpokladu napětí

List

dostatečného pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku v ionizovaném stavu" [1, s. 73].

Stabilitu oblouku ovlivňuje především:

- chemické složení a tepelná vodivost plazmatu,
- materiál a tepelná vodivost elektrod,
- tepelná vodivost základního materiálu,
- geometrické uspořádání a tvar elektrod
- částečně okolní atmosféra [1].

Plazmatem je označován ionizovaný, elektrický vodivý stav plynu. Jinak řečeno, plazma vytváří vodivé prostředí pro přechod elektrického oblouku [26].

Elektrický oblouk je zjednodušeně rozdělit na katodovou oblast, sloupec oblouku a anodovou oblast v tomto pořadí od tavící se elektrody. Mezi těmito základními oblastmi oblouku probíhají následující termodynamické děje – disociace, ionizace a excitace. Na základním materiálu naopak dochází k tzv. rekombinaci, tedy opačným termodynamických dějům výše vyjmenovaných. Všechny děje jsou spojeny s přeměnou energie – tepla, které slouží k natavení materiálu [26].

#### 4.5.2 Základní parametry MAG svařování

•	polohy svařování	—	všechny (PA až PF dle ISO 6947),
•	druh svař. proudu	_	stejnosměrný (DC),
•	přenos kovu v oblouku	_	zkratový, přechodový, sprchový, impulzní,
			moderovaný, rotující,
•	proud	_	40 až cca 800 A,
•	napětí	_	16 až cca 65 V,
•	teplota oblouku	_	8 000 až 15 000 °C,
•	rychlost svařování	_	$10 \text{ až } 150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1},$
•	používané ochranné plyny 1].	_	$CO_2$ , $Ar + CO_2$ , $Ar + O_2$ , $Ar + CO_2 + O_2$ [26,

#### 4.5.3 Zařízení pro svařování metodou MAG

V současnosti se vyrábí velmi široký sortiment zařízení pro tuto metodu. Svařovací zařízení mohou být schopny svařovat pouze metodou MIG/MAG, nebo mohou zahrnovat i metody svařování WIG (TIG) a ruční svařování obalenou elektrodou [1].

Kromě základních prvků (viz obr. 4.16) nabízejí výrobci velké množství příslušenství a doplňků jako např. transportní vozíky, chlazení zdroje a hořáku, push-pull hořáky, několikanásobné podavače drátu pro svařování v delší vzdálenosti od zdroje atd. [26].

59



Obr. 4.16 Schéma svařování metodou MIG/MAG: 1 – elektrický oblouk, 2 – drátová elektroda, 3 – zásobník drátu, 4 – podávací kladky, 5 – rychloupínací spojka, 6 – hořákový kabel, 7 – svařovací hořák, 8 – zdroj svařovacího proudu, 9 – kontaktní svařovací průvlak, 10 – ochranný plyn, 11 – plynová tryska, 12 – svarová lázeň [1].

#### 4.5.4 Moderní alternativy MIG/MAG

Svařování za účelem zvýšení produktivity, snížení množství vneseného tepla, svařování tenkých materiálu, pro přemostění velkých mezer aj.

Zvyšování produktivity je možno zajistit použitím trubičkového drátu, svařováním dvěma a více dráty, elektrodou ve formě pásku atd. [26].

Pro svařování tenkých plechů a dále omezení deformací má každý výrobce svařovacích zdrojů svůj vlastní proces, např. metoda CMT (Cold Metal Transfer), Cold Arc, Aristo Super Pulse aj. [26].

Pro svařování pozinkovaných plechů byla vyvinuta metoda MIG – pájení (křemíkovým nebo hliníkovým bronzem), kdy po svařování nedochází k porušení zinkové vrstvy, a tedy nedochází ke snížení korozivzdornosti. Další výhodou je minimální tepelné ovlivnění materiálu a deformace [26, 1].

## 5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavními cíli diplomové práce je:

- provést základní rešerši v těchto oblastech: svařování elektronovým svazkem, pracovní komory svářeček, vakuová technika, technologie svařování tlakových nádob,
- navrhnout vhodné uspořádání pracovní komory,
- zkonstruovat pracovní komoru (nakreslení sestavy + část výrobních výkresů),
- navrhnout vhodnou technologii svařování pro výrobu komory.

Výsledky budou sloužit v ÚPT AV ČR v.v.i. při budování experimentální svářečky s elektronovou tryskou o výkonu 2 kW s urychlovacím napětím 60 kV.

61

### 6 NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ PRACOVNÍ KOMORY

- komora má dle zadání ÚPT AV ČR v.v.i. krychlový tvar o rozměrech 500x500x500 mm a objemu cca 100 litrů,
- je opatřena šesti shodnými většími přírubami, na které lze montovat elektronovou trysku, manipulátor nebo případné rozšíření komory,
- tři větší příruby jsou umístěny na horní stěně pracovní komory pro možnost uchycení elektronové trysky nebo rozšíření komory v různých polohách, další příruba je umístěna na obou bočních stěnách a dále na spodní stěně (tato slouží pro připevnění manipulátoru),
- dále komora obsahuje i šest menších přírub (tři na každé boční stěně), které jsou určeny například pro elektrické průchodky nebo průzor,
- dveře pracovní komory mají dvojité panty a průzor pro sledování svařovacího procesu,
- na zadní stěně pracovní komory je umístěný otvor pro vakuový systém,
- na dně komory jsou navařeny podpěry se závity pro uchycení křížového stolu.
- na dolní stěně jsou navařeny podpěry komory se závity, které slouží k uchycení komory k pracovnímu stolu.

### 7 KONSTRUKCE PRACOVNÍ KOMORY

Konstrukce pracovní komory musí splňovat následující požadavky [52]:

- dostatečné rozměry,
- komora musí být dostatečně pevná a tuhá (tlak atmosféry nesmí po vyčerpání ovlivnit nepříznivě vzájemnou polohu osy trysky, vychylovacího systému a polohovacího zařízení),
- velké pracovní komory, pokud mají obecný tvar, mají být navrhovány metodou konečných prvků tak, aby jejich deformace vlivem vnějšího tlaku byly minimalizovány,
- pracovní komory jsou zhotoveny z běžné konstrukční oceli, která účinně snižuje rušivý vliv vnějších magnetických polí,
- vnitřní plochy není třeba chránit proti korozi, protože vnitřní prostor je většinu času evakuován,
- větší pracovní komory jsou vybaveny pozorovacími průzory, které jsou z olovnatého skla, aby dostatečně absorbovala škodlivé rentgenové záření,
- vstupní dveře pracovní komory musí být opatřeny elektrickým blokovacím zařízením (mikrospínač), který kontroluje čerpání pracovní komory.







### DIPLOMOVÁ PRÁCE







### 8.4 Posouzení napjatosti dle normy ČSN EN 13445-3

Hodnoty základního dovoleného napětí pro austenitické oceli A  $\geq$  35 % [4]:

- provoz:

$$f_d = max\left\{\frac{R_{p1,0}^T}{1,5}; min\left[\frac{R_{p1,0}^T}{1,2}; \frac{R_m^T}{3}\right]\right\},\tag{8.1}$$

kde:  $f_d$  [MPa] – maximální hodnota dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení,

- $R_{p_{1,0}}^T$  [MPa] minimální smluvní mez kluzu 1 %,
- $R_m^T$  [MPa] minimální mez pevnosti v tahu.

 $f_d = 173,3 \text{ MPa}$ 

#### Posouzení komory

 $\sigma_{eq} = \underline{64,7 \text{ MPa}} < 173,3 \text{ MPa Vyhovuje}$ 

#### Posouzení dveří

 $\sigma_{eq} = \underline{64, 6 \text{ MPa}} < 173, 3 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Vyhovuje}$ 

Model komory vyhovuje na zatížení vnějším tlakem 0,1 MPa.

Vzhledem k nízkému výslednému napětí na povrchu je takto zjednodušený model dostatečný.

### 9 NÁVRH TECHNOLOGIE SVAŘENÍ PRACOVNÍ KOMORY

#### 9.1 Úvod

Vakuová (podtlaková) pracovní komora pro elektronové svařování je zařazena do kategorie EXC2 dle normy EN ISO 1090-2. Svařování je zvláštní proces, pro zajištění jakosti je nezbytné dodržet zásady v rámci ČSN EN ISO 3834-2. Stupeň přípustnosti vad dle ČSN EN ISO 5817 ve stupni "C".

#### 9.2 Posouzení konstrukce

Prvořadým požadavkem kladeným na svařovanou konstrukci je vzduchotěsnost a odolnost proti zborcení vlivem rozdílných tlaků uvnitř a vně komory. Komora bude mít tvar krychle, svařená z pěti desek. Tloušťka desek bude 15 mm. Materiál vysokolegovaná korozivzdorná ocel značená dle ČSN EN 10027-1 *X5CrNi18-10*.

Šestou stěnu krychle budou tvořit dveře.

S ohledem na menší rozměry (zejména vnitřní), dodržení kolmosti a rozměrů stěn se jeví jako nejvýhodnější varianta svařování z vnější strany, upnuté a sestehované komory.

#### 9.3 Příprava materiálu

S ohledem na značnou tloušťku stěny desek, je nezbytné připravit hrany pro svar. Postup přípravy bude dle doporučení ČSN EN ISO 9692-1.

Boční a horní desky budou mít jednostranný úkos o velikosti 13 mm a úhlu 30°. Úkos bude vytvořen nejpoužívanější metodou třískového obrábění – frézováním. Počítá se s V svarem. S ohledem na velikost a požadovanou přesnost úkosu není doporučeno zabroušení hrany ručním způsobem.

Ref. č.	č. Tloušťka Název Značka Řez Rozměry			něry	Doporučená		Zobrazení svaru	Poznámky			
	materiálu	svaru	(podle ISO		Úhel <sup>a</sup>	Mezera <sup>b</sup>	Otupení	Výška úkosu	svařování		
	t		2553)		α, β	b	c	h	(číslo podle ISO 4063)		
				×							
1.5	5 ≤ <i>t</i> ≤ 40	V – svar s výrazným otupením	Y		<i>α</i> ≈60°	$1 \le b \le 4$	$2 \le c \le 4$	_	111 13 141		_

Tab. 9.1 Příprava svarových spojů – V svar [6, str. 11].

U zadní desky, je z důvodu zamezení křížení svarů zvolen půl V svar ( $\frac{1}{2}$  V). Proto bude úkos proveden jen na zadní desce, a to o velikosti 13x45°.

Pozmění v mm

List

Ref. č.	Tloušťka	Název	Značka	Řez		Rozm	iěry		Doporučená	Zobrazení svaru	Poznámky
	materiálu	svaru	(podle	a	Úhel <sup>a</sup>	Mezera <sup>b</sup>	Otupení	Výška	metoda svařování		
	t		2553)		α, β	ь	с	h	(číslo podle ISO 4063)		
1.9.1	3 <i><t< i="">≤10</t<></i>	½ V − svar	V		35° ≤ β	2≤b≤4	1≤c≤2		111 13		_
1.9.2			V	B	≤ 00				141		

Po obrábění hran je nezbytné obráběné plochy obřitovat.

Před samotným svařováním komory (jakéhokoliv výrobku nebo konstrukce spadající do kategorie EXC3 a vyšších) je nezbytné provést svaření vzorku, která je svým charakterem nejvíce podobá prováděným svarům na komoře. K vzorku se vytvoří tzv. pWPS (Preliminary Welding Procedure Specification – předběžný postup svařování), kde je popsáno, za jakých podmínek byly svary vytvořeny. Vzorek se podrobí nedestruktivním i destruktivním zkouškám, na základě kterých se vyhodnotí, zda-li je svarový spoj vyhovující nebo nevyhovující. Protokol těchto zkoušek je označován jako WPQR (Welding Procedure Qualification Record). Tento dokument následně slouží pro tvorbu WPS. Ty plní funkci předpisů, nebo návodu, podle kterých by měl svářeč postupovat.

Zkoušky svarů jsou oprávněné provádět pouze certifikované zkušební organizace, které mají pověření od České svářečské společnosti ANB.

Protokoly WPQR, jsou až na výjimky, univerzální. Jak postupovat při tvorbě pWPS, WPQR a WPS je stanoveno v normách ČSN EN ISO 156XX (např. v 15614).

Pro navrhovanou pracovní komoru byla vytvořená pWPS, a na základě této i samotná WPS dokumentace.

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

71

Předběžná specifikace postupu svařování (pWPS)						
Výrobce:						
WPS č.:		WPQR č.:				
Metoda(y) svařování:	TIG, MAG	Označení základního materiálu (skupina):	X5CrNi18-10			
Způsob přenosu kovu:	kapkový	Tloušťka materiálu (mm):	15			
Druh spoje a druh svaru:	Tupý; V svar	Vnější průměr (mm):				
Způsob přípravy a čištění:	frézování	Poloha svařování:	РА			



### Podrobnosti svařování

Řada	Metoda	Rozměr	Proud	Napětí	Druh	Rychlost	Délka	Tepelný
	svařování	přídav. materiálu	[A]	[V]	proudu/polarita	podávání drátu	housenky/	příkon*
							Postup.	
							rychlost	
1.	TIG	1,6 – WC20	120	synergické	DC puls	ruční		
2.	MAG	1,2	200	synergické	DC puls	$9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
3.	MAG	1,2	140	synergické	DC puls	$6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
4.	MAG	1,2	140	synergické	DC puls	$6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		

Označení přídavného kovu a obchodní značka:	OK Autrod 308 LSi OK Tigrod 308 LSi	Další údaje*, například:
Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:		- Rozkyv (max. šířka housenky):
Označení plynu/tavidla: - ochranného:	Argon 4.6; Cronigon S1	- Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva
- pro ochranu kořene:	Argon 4.6	- Podrobnosti pulzního svařování:

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

List

Průtoková rychlost plynu: - ochranného:	8 $1 \cdot \min^{-1}$ ; 12 $1 \cdot \min^{-1}$	<ul> <li>Vzdálenost napájecího průvlaku od prac. kusu:</li> </ul>
<ul> <li>pro ochranu kořene:</li> </ul>	$6 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$	- Podrobnosti plazmového svařování:
Podrobnosti k drážkování/ ochraně kořene:		- Úhel sklonu hořáku:
Teplota předehřevu:		- Jiné údaje:
Interpass teplota:	200 °C	Výrobce : (jméno, datum, podpis)
Dodatečný ohřev (dohřev):		
Udržovací teplota předehřevu:		
Tepelné zpracování po svařování a/nebo stárnutí: doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlaz.*:	snížení vnitřního pnutí po svař.; 45 min.; 550 °C; v inertní atm.	
FSI VUT

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

73

	Specifikace postupu svařování (WPS)				
Výrobce:					
WPS c.:	1-2015	WPQR c.:	1-2015		
Metoda(y) svařování:	TIG, MAG	Označení základního materiálu (skupina):	X5CrNi18-10		
Způsob přenosu kovu:	kapkový	Tloušťka materiálu (mm):	15		
Druh spoje a druh svaru:	Tupý; V svar	Vnější průměr (mm):			
Způsob přípravy a čištění:	frézování	Poloha svařování:	РА		



### Podrobnosti svařování

Řada	Metoda	Rozměr	Proud	Napětí	Druh	Rychlost	Délka	Tepelný
	svařování	přídav. materiálu	[A]	[V]	proudu/polarita	podávání drátu	housenky/	příkon*
							Postup.	
							rychlost	
1.	TIG	1,6 – WC20	120	synergické	DC puls	ruční		
2.	MAG	1,2	200	synergické	DC puls	$9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
3.	MAG	1,2	140	synergické	DC puls	$6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
4.	MAG	1,2	140	synergické	DC puls	$6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		

Označení přídavného kovu a obchodní značka:	OK Autrod 308 LSi OK Tigrod 308 LSi	Další údaje*, například:
Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:		- Rozkyv (max. šířka housenky):
Označení plynu/tavidla: - ochranného:	Argon 4.6; Cronigon S1	- Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva
- pro ochranu kořene:	Argon 4.6	- Podrobnosti pulzního svařování:

FSI VUT

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

List

Průtoková rychlost plynu: - ochranného: - pro ochranu kořene:	8 l·min <sup>-1</sup> ; 12 l·min <sup>-1</sup> 6 l·min <sup>-1</sup>	<ul> <li>Vzdálenost napájecího průvlaku od prac. kusu:</li> <li>Podrobnosti plazmového</li> </ul>
Podrobnosti k drážkování/ ochraně kořene:		svařování: - Úhel sklonu hořáku:
Teplota předehřevu:		- Jiné údaje:
Interpass teplota: Dodatečný ohřev (dohřev):	200 °C	Výrobce : (jméno, datum, podpis)
Udržovací teplota předehřevu:		
Tepelné zpracování po svařování a/nebo stárnutí: doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlaz.*:	snížení vnitřního pnutí po svař.; 45 min.; 550 °C; v inertní atm.	

#### 9.4 Popis materiálu

Chrom niklová austenitická korozivzdorná (někdy označována jako potravinářská) ocel. Odolná korozi v běžném prostředí (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny, průmyslové a velkoměstské atmosféry). Nejčastěji používaná v potravinářském průmyslu a konstrukcích s max. teplotou 450 °C [21].

Tab. 9.3 Označení materiálu dle norem [21].

Číselné dle EN 10088	ČSN EN 10027-1	Dle ČSN	USA normy
1.4301	X5CrNi18-10	17240	AISI 304

Tab. 9.4 Chemické složení v hm. % [21].

С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Ν
max. 0,07	max. 1	max. 2	max. 0,045	max. 0,015	17 – 19,5	8-10,5	max. 0,11

#### 9.4.1 Mechanické vlastnosti

- pevnost v tahu  $R_m$  520–720 N·mm<sup>-2</sup>,
- mez kluzu  $R_{p0,2}$  min. 210 N·mm<sup>-2</sup> ,
- tažnost A80mm min. 45 %,
- nemagnetická,
- nekalitelná [21].

#### 9.4.2 Technologické údaje

- svařitelná všemi obvyklými způsoby,
- tvařitelná,
- třísková obrobitelnost dobrá[21].

#### 9.5 Přídavný materiál

#### 9.5.1 Technologie svařování TIG

- pro TIG technologii  $\Rightarrow$  OK Tigrod 308 LSi
- průměr drátu Ø 2,4 mm; délka drátu 1000 mm
- značení drátu W 19 9 LSi dle ČSN EN ISO 14343

#### SFA/AWS A5.9: ER308LSi OK Tigrod 308LSi EN ISO 14343-A: W 19 9 LSi (OK Tigrod 16.12) Použití: Ochranný plyn (EN ISO 14175): Drát pro svařování ocelí typu 18Cr8Ni, s nízkým obsa-11 hem uhlíku, což zaručuje vysokou odolnost proti Svařovací proud: -(-) vzniku MKK. Zvýšený obsah Si zlepšuje svařovací vlastnosti. Drát je široce používán především v chemickém a potravinářském průmyslu pro Typické chemické složení drátu (%): svařování potrubí a nádob, až do teplot -196°C. С Si Mn Cr Ni <0,03 10,00 0,85 1,80 20,00 Vhodnost pro svařování, např.: AISI 304, 304L, Jiné údaje: W. Nr.: 1.4301; 1.4306; 1.4541; 1.4550 aj. W. Nr.: ~1.4316 D 5 - 10 FN Klasifikace, certifikace: CE EN 13479 DB 43.039.11 DNV 308L TÜV 05335

#### Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	Rm	R <sub>p02</sub>	A <sub>5</sub>	lese -	KV (	J)/°C	
			MPa	MPa	%	+20	-60	-110	-196
EN	TZ 0	11	625	480	37	170	150	140	100

TZ 0 - stav po svařování

Obr. 9.1 Označení přídavného materiálu – technologie svařování TIG [42].

#### 9.5.2 Technologie svařování MAG

- pro MAG technologii  $\Rightarrow$  OK Autrod 308 Lsi,
- průměr drátu Ø 1,2 mm,
- značení drátu G 19 9 LSi dle ČSN EN ISO 14343.

FSI VUT

77

# OK AUTROD 308LSi SFA/AWS A 5.9: ER 308LSi EN ISO 14343-A: G 19 9 LSi

Cr

20,0

Ni

10,0

**(OK AUTROD 16.12)** 

#### Použití:

Drát s nízkým obsahem uhlíku pro svařování nerezavějících ocelí typu 18Cr8Ni a niobem stabilizovaných ocelí tohoto typu, jestliže provozní teplota nepřevýší 400°C.

Vhodnost pro svařování, např.: 1.4301, 1.4306, 1.4541, 1.4550 a jiné

#### Klasifikace, certifikace:

CE	EN 13479
DB	43.039.01
DNV	308 L (-196°C)
TŪV	04267
další:	CWB

Ochranný plyn (EN439): M13, M12

Svařovací proud: -(+)

#### Typické chemické složení drátu (%):

Mn

1,80





Jiné údaje: W. Nr. 1.4316 FN 5-10

#### Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	Tepl. zk.	Rm	R <sub>p0,2</sub>	A <sub>5</sub>	K	V (J)/	°C
			°C	MPa	MPa	%	+20	-60	-196
EN	TZ 0	M13	+20	620	370	36	110	90	60
EN	TZ 0	M13	+350	490	370	25			
EN	TZ 1	M13	+20	600	340	43	90	80	60
EN	TZ 1	M13	+350	460	240	28			

TZ 0 - stav po svařování, TZ 1 - stav po rozp. žíhání 1050°C/0,5 h

Obr. 9.2 Označení přídavného materiálu – technologie svařování MAG [41].

#### 9.6 Plynová ochrana

#### 9.6.1 Pro metodu svařování TIG

- svarového kovu  $\Rightarrow$  Argon 4.6 (čistota Ar 99,996 %), ۰
- kořene svaru  $\Rightarrow$  Argon 4.6 (čistota Ar 99,996 %).

Značení plynu I1 (inertní plyn skupiny 1) dle ČSN EN ISO 14175.

U první svarové vrstvy je nezbytné zajistit plný průvar a omezit na minimum tvorbu póru a bublin, proto je předepsána u této metody i ochrana kořene svaru.

#### 9.6.2 Pro metodu svařování MAG

svarového kovu  $\Rightarrow$  Cronigon S1 (99 % Ar + 1 % O<sub>2</sub>) [46].

#### 9.7 Výběr netavící se elektrody

Na volbu netavící se elektrody je vždy potřeba pohlížet z několika hledisek. V první řadě je to materiál a jeho tloušťka, dále délka svarů, svařujeme-li stejnosměrným nebo střídavým proudem, jedná-li se o ruční nebo automatizované svařování, požadované životnosti a obecně zatížení elektrody.

Pro naše potřeby bude plně vyhovující typ WC20:

Ø 1,6 mm; materiál – WC20 (W + 2 % Ceria) – barevné značení šedá



Obr. 9.3 Wolframová elektroda pro TIG svařování [75].

Neméně důležitou úlohou je nabroušení elektrody. Je důležité elektrody brousit ve směru osy elektrody, jiné broušení má vliv na kvalitu a stabilitu oblouku.



Obr. 9.4 Vliv směru broušení špičky [75].

Kromě zatížení samotné elektrody je nutno myslet i na zatížení samotného hořáku, resp. na jeho chlazení. Běžné hořáky jsou chlazeny ochranným plynem a samotnou konstrukcí hořáku. Pro větší proudové zatížení, případně při potřebě nepřetržitého svařování je vhodné zvolit vodou chlazený hořák, který zajistí nepřehřátí hořáku, a tím i komfort svářeče.

#### 9.8 Popis svařování

Navzdory zaručené svařitelnosti korozivzdorné oceli typu 1.4301 je třeba během svařování dodržet několik zásad. Zaručená svařitelnost vychází z austenitické struktury, spolu s nízkým obsahem uhlíku je omezený vznik martenzitické struktury. Ke zkřehnutí může ovšem dojít vlivem odmíšení chromu, který ve spojení s uhlíkem vytváří křehkou strukturu ve formě karbidů chromu. Kromě zkřehnutí dochází i k ochuzení míst o chrom, a tím i místní ztrátu korozivzdornosti, tzv. MKK (mezikrystalické korozi).

Aby k těmto fázovým přeměnám nedocházelo, je nezbytné omezit množství vneseného tepla do svaru vhodnou volbou svařovacích parametrů, průměrem přídavného drátu, vhodným odvodem tepla (měděnými příložkami), druhem přenosu kovu a dodržováním interpass (mezihousenkové) teploty.

S ohledem na délku a tloušťku svaru, množství vneseného tepla, požadavku těsnosti jsem zvolil kombinaci technologii TIG a MAG. Svar metodou TIG zajistí těsnost spoje, metoda MAG bude použitá jako více produktivní varianta svarem vyplňující úkos spoje.

Vícevrstvé svařování kromě omezení TOO (teplem ovlivněná oblast) zajistí i vyžíhání předchozí svarové housenky.

Počátek a konec svarů je vždy z hlediska svařování bráno jako oblast s velkou pravděpodobností výskytu vad typu neprůvaru, studených spojů, necelistvostí. Proto jsem zvolil namísto náběhových a výběhových desek (použití desek by bylo vzhledem k povaze svarů komplikované) přídavek na obrobení po svařování.

Po dokončení svařování a tepelném zpracování je nezbytné ověřit těsnost svarů vakuovou zkouškou. Případné netěsnosti se opraví místním roztavením kořene svarů metodou TIG z vnitřní strany komory.

#### 9.9 Schematický technologický postup

Tab. 9.5 Technologický postup svařování komory.

Č. operace	Operace	Popis
10	frézování	Frézovat úkos 13x45° a úkos 13 mm pod úhlem 30° u vybraných desek.
15	svařování	Na spodní desku ustavit podpěry svařovacího stolu fixované přípravkem a svařit metodou TIG koutovými svary po obvodě podpěr bez přídavného materiálu.
20	stehování	Složit spodní, boční a horní desku; upnout svěrkami; sestehovat na okrajích a pak každých 100 mm.
30	svařování	Metodou TIG svařit první vrstvu; svařovat v poloze PA s otáčením komory; při každém otočení přemístit periférie pro ochranu kořene svaru.

FSI VUT

List

40	svařování	Další svary dle WPS; založit měděné příložky ze stran desek; zachovat sled svarů – vždy provést jen jednu housenku a otočit; před kladením dalších housenek měřit interpass teplotu – nesmí přesáhnout 200 °C.
50	frézování	Odfrézovat přídavek 5 mm ze strany zadní stěny.
60	stehování	Založit zadní desku; upnout upínkami; stehovat mimo rohy – tři stehy na každou stranu.
70	svařování	Postupovat dle operace 30 a 40.
80	svařování	Založit patky komory; svařit metodou TIG koutovými svary bez přídavného materiálu.
90	broušení, začištění	Zabrousit svary do roviny; použít nářadí vhodné pro korozivzdornou ocel.
100	tep. zprac.	Žíhat ke snížení vnitřního pnutí.
110	frézování	Zarovnat čelo frézováním pro provedení zkoušky těsnosti; nechat přídavek na finální obrábění.
120	zkouška	Vakuová zkouška pro zjištění těsností svarů; případné opravy a opakování zkoušky.
130	frézování	Finální frézování.

#### 9.10 Svařování vzorku

Svařením zkušebního vzorku se ověřuje, zda-li navržené technologie vyhovují požadovanému účelu. Nutno říci, že svařování vzorku neproběhlo za zcela totožných podmínek, které jsou předepsány v předpisu pWPS. Důvodem byly technické možnosti společnosti, ve které byl vzorek svařen. Zásadním rozdílem byla absence plynové ochrany kořene.

Na zkušebním vzorku se nepodařilo dosáhnout plného průvaru. Důvodem byla výše zmíněna absence plynové ochrany kořene a rovněž malá mezera po stehování. Na základě této zkoušky byly opraveny pWPS a WPS dokumenty. Tento postup je běžný ve výrobní praxi, kdy se na základě takových zkoušek provádí optimalizace svařovacích parametrů, úpravy svarových ploch, v některých případech i změna konstrukce v případě nedostačující technologičnosti konstrukce.



# DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obr. 9.5 Zkušební vzorek s přípravou hran pro svařování.





Obr. 9.7 Svařený vzorek metodou TIG – kořen svaru – vnější strana.



Obr. 9.8 Svařený vzorek metodou TIG – kořen svaru – vnitřní strana.

# ZÁVĚR

Svařování, ne bezdůvodně, je považováno za zvláštní proces. Během svařování vzorku se potvrdilo, že tomu tak je. Kvalitu svařování ovlivňuje spousta proměnných, které se méně či více na procesu svařování podepíší. Proto je již při samotném návrhu svařované konstrukce nezbytná spolupráce s technology, nebo je potřeba mít dostatečné znalosti konstruktéra v otázkách technologičnosti konstrukce svařenců.

Během návrhu technologie svařování vakuové komory jsem po zhodnocení vstupních proměnných (jako tloušťka a typ materiálu, požadované vzduchotěsnosti, rozměrech komory, ekonomičnosti výroby aj.) zvažoval několik možných metod svařování.

Jedna z možností byla svaření stěn komory spolehlivou metodou z hlediska provaření a to elektronovým svařováním. Jelikož ale neznám žádné zařízení na území ČR, které by komoru o potřebných rozměrech svařilo a zaslání do zahraničí by se ekonomicky nevyplatilo, tuto metodu jsem zavrhl.

Další možností by bylo svařit komoru laserovým svařováním. Zde by pravděpodobně opět byly značné ekonomické náklady na výrobu z důvodu toho, že se lasery využívají spíše pro sériovou a hromadnou výrobu a příprava svařování jednoho kusu svařence by tudíž byla neekonomická.

Po uvážení jsem se nakonec rozhodl pro kombinaci dvou metod svařování – TIG a MAG. TIG jakožto spolehlivější metoda bude použita pro svaření kořene, krycí svary budou následně provedeny produktivnější metodou MAG.

Jsem si vědom toho, že pro pracovní komoru, která se bude čerpat do vysokého vakua  $(10^{-2} \text{ až } 10^{-3} \text{ Pa})$  je z vakuového hlediska vhodnější svařovat komoru zevnitř (vnitřními koutovými svary), ale z důvodu možného špatného přístupu svářeče k vnitřním koutovým svarům, a tím i zvýšení pravděpodobnosti vzniku svarových vad, byla zvolena výše zmíněná varianta TIG a MAG s vnějšími svary.

Ačkoli jsem se v průběhu navrhování snažil pokrýt co nejvíce možných rizik a složitostí, je velice pravděpodobné, že během výroby vyvstanou další komplikace, které bude potřeba vyřešit. Předvýrobní svařování vzorku mnoho napoví, pomůže optimalizovat proces svařování, ale nemůže s jistotou říci, jak se svařování projeví v konečném důsledku na komoře jako takové. Pro zodpovězení těchto otázek se v průmyslové výrobě provádí tzv. ověřovací výrobní série, která simuluje skutečnou výrobu, a hodnotí úspěšnost návrhu.

Mnou navržená komora sice není ověřená výrobou, nicméně během posuzování svařitelnosti jsem vzal v potaz hlavní faktory, které mají vliv na jakost svařování, a dle toho jsem návrh zpracoval. Proto si myslím, že takto navržená technologie by mohla být při výrobě komory proveditelná.

### SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [2] Automating Electron Beam Free Form Fabrication with MATLAB. *MathWorks*. [online]. [cit. 2015-04-01]. Dostupné z:http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/automating-electron-beam-free-form-fabrication-with-matlab.html
- [3] BEČKA, Jaroslav. *Elektronická vyhodnocovací jednotka pro vakuovou měrku*. Plzeň, 2013, 60 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Freisleben.
- [4] ČSN EN 13445-3. *Netopené tlakové nádoby* Část 3: *Konstrukce a výpočet*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [5] ČSN EN 10028-7 Ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely Část 7: Korozivzdorné oceli. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [6] ČSN EN ISO 9692-1– Svařování a příbuzné procesy Doporučení pro přípravu svarových spojů - Část 1: Svařování ocelí ručně obloukovým svařováním obalenou elektrodou, tavící se elektrodou v ochranném plynu, plamenovým svařováním, svařováním wolframovou lektrodou v inertním plynu a svařováním svazkem paprsků. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [7] DAĎOUREK, Karel. Základy vakuové techniky. *Katedra materiálu TUL*. [online]. 2006 [cit. 2015-02-07]. Dostupné z:http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\_kmt\_magistri/VTM/vtm%20Dad/05vakuum1. pdf
- [8] Digitální revoluce. Fronius Česká republika . [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-14441901-09B3B4DE/fronius\_ceska\_republika/hs.xsl/29\_3894.htm#.VWhDrdLtnhi
- [9] DUBRAVCOVÁ, Viera. Vákuová a ultravákuová technika. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1992, 231 s. ISBN 80-05-01090-7.

[10]	DUPÁK, Libor. <i>Mikroobrábění nekovových materiálů elektronovým svazkem</i> . Brno, 2012. 101 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.
[11]	DVOŘÁK, Milan et al. <i>Technologie II.</i> 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
[12]	Dvoustupňová rotační olejová vývěva . <i>HAVOG spol. s r.o.</i> . [online]. [cit. 2015-02- 17]. Dostupné z: <i>http://www.havog.cz/obchod/vyvevy/value-vrd24-rotacni-olejova- dvoustupnova-vyveva-ma-vykon-3991-min-nebo-24-m3hod/]</i> .
[13]	ECKERTOVÁ, Ludmila a Luděk FRANK. <i>Metody analýzy povrchů: elektronová mikroskopie a difrakce</i> . 1. vyd. Praha: Academia, 1996, 379 s. ISBN 80-200-0329-0.
[14]	Elektronenstrahl-Anlagen. pro-beam Unternehmensporträt. [online]. [cit. 2015-03- 12]. Dostupné z: http://www.pro- beam.com/fileadmin/userdaten/dokumente/Downloads/Pro-Beam_InfoFlyer.pdf
[15]	Elektronové svářečky. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Akademie věd České republiky. [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z:http://ebt.isibrno.cz/galerie/elektronove-svarecky
[16]	ERBEN, Milan. Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií [online]. 28 s. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf
[17]	Focus MEBW-60. FOCUS GmbH. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://www.focus-e-welding.de/resources/Sectors/MEBWBroschuere2014.pdf
[18]	Focus MEBW-60. <i>Panaglobo</i> . [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://www.panaglobo.com/wp-content/uploads/2014/02/MEBW-60-2013- engl.pdf
[19]	GROSZKOWSKI, Janusz. <i>Technika vysokého vakua</i> . 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 438 s.

- [20] Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Mega-blog*. [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: *http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/*
- [21] INOX, spol. s r. o. *NEREZOVÁ OCEL 1.4301*. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: *http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html*
- [22] Investigation of the A-TIG mechanism and the productivity benefits in TIG welding. TWI. [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z:http://www.twiglobal.com/technical-knowledge/published-papers/investigation-of-the-a-tigmechanism-and-the-productivity-benefits-in-tig-welding-may-2009/
- [23] JIRÁK, David. Elektronové svařování součásti ze slitiny Al. Brno, 2011, 36 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [24] Katoda. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Akademie věd České
   republiky. [online]. [cit. 2015-02-03]. Dostupné
   z:http://ebt.isibrno.cz/knihv/prirucka/katoda
- [25] KOLAŘÍK, Ladislav. Svařování metodou TIG (WIG). Ústav strojírenské technologie. [online]. 15.3.2010 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/tig.pdf
- [26] KOLAŘÍK, Ladislav.. Svařování metodou MIG / MAG. Ústav strojírenské technologie. [online]. 7.3.2010 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/mig\_mag.pdf
- [27] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery hlavní typy laserů používaných v průmyslu. LAO Lasery a optika.[online]. 19.2.2013 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery—hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128
- [28] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery laserové svařování (laser welding). LAO Lasery a optika. [online]. 18. 02. 2013 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery—laserove-svarovani-i-laserwelding-134

FSI	VI	JT

- [29] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery základní princip laseru a jejich dělení. LAO – Lasery a optika. [online]. 19. 02. 2013 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery—zakladni-princip-laseru-ajejich-deleni-127
- [30] KOŘÁN, Pavel. Svařování laserem poslední trendy. *istrojirenstvi.cz*. [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z:http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=svarovani-laseremposledni-trendy&id=20
- [31] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení.* 1. vyd. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1980, 263 s.
- [32] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických.* 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 265 s.
- [33] Less shrinkage and optimal weld penetration. *Schelde Exotech*. [online]. [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: *http://www.exotech.nl/en/competences/electron-beam-welding*
- [34] MATLÁK, Jiří. *Povrchové zpracování vybraných ocelí pomocí elektronového svazku*. Brno, 2013. 61 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.
- [35] Medium Chamber EB Welding Systems from Sciaky Provide Unmatched Quality. *Sciaky INC.*. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné *z:http://www.sciaky.com/eb-welding-systems/small-chamber-systems*
- [36] Metody svařování dle ČSN EN ISO 4063 (05 0011) Svařování a příbuzné procesy přehled metod a jejich číslování. SAROND WELDING s.r.o.. [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.sarond-welding.cz/files/svarovaci-normy/metodysvarovani.doc&rct=j&q=&esrc=s&sa=U&ei=3aFfVbmrB4KNywPguoCYDw&ve d=0CBQQFjAA&sig2=UcOI86IKvJ0Wnbj3SxGpSg&usg=AFQjCNGXY6\_bLrMa NXWxWi0ox-5H1jC1Q
- [37] Mikro-Elektronenstrahlschweißgerät MEBW-60 für Feinmechanik und Mikrosystemtechnik. FOCUS electronics GmbH. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://www.messeleipzig.de/LeMMon/AUSSTPR.NSF/messewebger\_itc/83636D382DF9D9D4C1257 829002F1E1B?OpenDocument&lang=de&style=intec

New Pfeiffer Compact FullRange Gauge PKR 251 Active Pirani Cold Cathode [38] Transmitter KF25. Ideal vacuum products. [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné *z*: *http://www.pchemlabs.com/product.asp?pid=3214* News zur Schweißtechnik, zu Schweißrobotern und Schweißmaschinen. OTC [39] DAIHEN EUROPE. [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.otcdaihen.de/index.php?id=369 [40] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (1) – princip laseru. MM Průmyslové 13.3.2012 2015-04-03]. *spektrum*. [online]. [cit. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html [41] OK AUTROD 308LSi. ESAB. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://www.okweld.cz/PDF/draty-mig-mag/vysokolegovanenerezavejicic/OK AUTROD 308LSi.pdf OK Tigrod 308LSi. ESAB. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné [42] z: http://bcz.vamberk.eu/cd-dst-2013/PDF/1 pridavne svarovaci/D/D49/OK TIGROD 308LSi.pdf] Overview of Large-Chamber Welders. Sciaky INC. [online]. [cit. 2015-03-18]. [43] Dostupné z: http://www.sciaky.com/eb-welding-systems/available-systems [44] Overview of Large-Chamber Welders. Steigerwald Strahltechnik GmbH. [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: http://www.steigerwald-eb.de/en/machines/chambermachines/ebocam-series.html [45] Plazmové, elektronové a laserové svařování. Hadyna – International, spol. s r. 2015-04-02]. o. [online]. [cit. Dostupné z:http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2010-1%20Plazma-laserelektronové.pdf Prozessgas nach DIN EN ISO 14175: M13-ArO-1. Linde. [online]. [cit. 2015-03-[46] 14]. Dostupné z: http://produkte.linde-gase.de/db\_neu/cronigon\_s\_1.pdf [47] beam. *Ecosond*. [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné Pro *z*: *http://www.ecosond.cz/pro-beam.html* 

- [48] Průvodce aplikačními možnostmi Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v. i.. Aplikační a vývojové laboratoře pokročilých mikrotechnologií a nanotechnologií jsou součástí areálu Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z:http://alisi.isibrno.cz/upload/files/brozura-dotisk-cz.pdf].
- [49] Rotační olejová vývěva . *Fisher Scientific*. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: *http://www.thermofisher.cz/download.asp?appid=1&oid=A100000082C*
- [50] Rotační olejová vývěva pomaloběžná RV 20/21. Fisher Scientific. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: http://www.thermofisher.cz/produkty/vyveva-rot-olejova-pomalobezna-rv-20-21
- [51] ROUBÍČEK, Martin. Laserové svařování ekonomika a kvalita. Konstrukce odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. [online]. 16.5.2006 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita
- [52] RUDYK, Martin. Analýza aplikací svazku elektronů v průmyslu. Brno, 2011. 59 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [53] ŘASA, Jaroslav. KEREČANINOVÁ Zuzana, Nekonvenční metody obrábění 5. díl. MM Průmyslové spektrum.[online]. 12.5.2008 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5dil.html.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita
- [54] ŘASA, Jaroslav. KEREČANINOVÁ Zuzana. Nekonvenční metody obrábění 6. díl. MM Průmyslové spektrum. [online]. 11.06.2008 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html
- [55] SCHULTZ, Helmut. *Electron beam welding*. Cambridge: Abington, 1993, 232 s. ISBN 1-85573-050-2.
- [56] Slovník: TIG PULS. *Maister nářadí a svařování do továren*. [online]. [cit. 2015-04-19].Dostupné z: *http://www.maister.cz/slovnik/TIG-PULS/*
- [57] Small Chamber EB Welding Systems from Sciaky. *Sciaky INC.*. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: *http://www.sciaky.com/eb-welding-systems/small-chamber-systems*

- 90
- [58] Snímek korunové mince REM režimem. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Akademie věd České republiky. [online]. [cit. 2015-02-07]. Dostupné z:http://ebt.isibrno.cz/content/snimek-korunove-mince-rem-rezimem
- [59] Speciální technologie. *LASER MARKER WORKSHOP, s.r.o.*. [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: *http://www.lmw.cz/?i=technologie*
- [60] Svařování korozivzdorných ocelí. *Euro Inox*. [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: *http://www.euro-inox.org/pdf/map/BrochureWeldability\_CZ.pdf*
- [61] Svařování TIG: Metoda & Graf výběru. PROFI WELD, ZVÁRACIA TECHNIKA. [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z:http://www.profiweld.sk/data/Zvaracky%20TIG.pdf
- [62] ŠEBESTOVÁ, Hana. Průmyslové lasery pro svařování. Portál moderní fyziky. [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova\_prumyslove\_lasery\_pro\_svarovani.pdf
- [63] Technologie svařování. *Integrovaná střední škola Cheb*. [online]. [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: *http://iss-cheb.cz/projekt/Svařování.pdf*
- [64] THOMSON, Joseph John, sir. Aldebaran group for astrophysics. [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z:http://www.aldebaran.cz/famous/people/Thomson\_John.php
- [65] TŘINÁCTÝ, Jan. Návrh paroproudé vývěvy. Brno, 2013, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Ladislav Šnajdárek.
- [66] TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvárania*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1989, 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
- [67] Urychlovací elektrická čočka. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Akademie věd České republiky. [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z:http://ebt.isibrno.cz/node/738/urychlovaci-elektricka-cocka
- [68] VA4: Horké komory. *SUSEN*. [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: http://susen2020.cz/vyzkum/program-ssd/va4-horke-komory/.

FSI	V	UT

- [69] Vacuum chamber. *Pfeiffer Vacuum*. [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: *http://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/vacuum-chambers/*
- [70] Vakuometr PIRANI. *LAVAT*. [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: http://www.lavat.cz/dat\_vyrobky/Mereni/pirani/mpirani\_1.html
- [71] VHS-250 Difúzní pumpa. *LABTECH* . [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.agilent-vakuum.cz/difuzni-pumpa-3.html
- [72] VISSER, Andreas. *Werkstoffabtrag durch Elektronen–und Photonenstrahlen*. Bern: Technishe Runhschau, 1972.

[73] Vývěvy s pracovní komorou: pístové, s valivým pístem, olejové a suché rotační vývěvy, šroubové vývěvy.. *Přírodovědecká fakulta UJEP*. [online]. [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: *http://physics.ujep.cz/~mkormund/P222/FTV\_p6.pdf*

- [74] Vývěvy. Ústav mikroelektroniky. [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~sandera/BEPT/6vyvevj.pdf
- [75] Wolframové elektrody pro TIG svařování. Magazín praktického<br/>svařování. [online].[cit. 2015-03-14].Dostupné<br/>Dostupné<br/>z: http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201
- [76] Z čeho se vyrábí katoda do elektronových svářeček?. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Akademie věd České republiky. [online]. [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: http://ebt.isibrno.cz/faq/z-ceho-se-vyrabi-katoda-do-elektronovych-svarecek
- [77] ZATLOUKAL, Petr. Laserové svařování. *Svařování v České republice*. [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: *http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm*
- [78] Získávání a měření nízkých tlaků. Ustav fyziky a materiálového inženýrství UTB. [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z:http://ufmi.ft.utb.cz/texty/plazmochemie/PCH\_05.pdf
- [79] Získávání nízkých tlaků. ČVUT Fakulta strojní Ústav Fyziky. [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z:http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\_4.pdf
- [80] ZOBAČ, Ladislav a Martin ZOBAČ. *Elektronové svářečky, jejich historie a současnost v ČR*. Brno, 2007, 19 s.

- [81] ZOBAČ, Ladislav Proces vnikání svazku do hloubky. *Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Akademie věd České republiky*. [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: *http://ebt.isibrno.cz/cs/knihy/prirucka/proces-vnikani-svazku-do-hloubky*
- [82] ZOBAČ, Ladislav. *Základy vakuové techniky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954, 313 s.
- [83] ZOBAČ, Martin. Elektronový svazek v technologiích. *Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Akademie věd České republiky*. [online]. 29.1.2010 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: *http://ebt.isibrno.cz/elektronovy-svazek-v-technologiich*
- [84] ZOBAČ, Martin. *Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie*. Brno, 2009. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.
- [85] ZPRAVODAJ ČVS 18 (1) 2010. *Česká vakuová společnost*. [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: *http://vakspol.cz/z2010/Bulletin10\_1\_lsvt\_web1.pdf*

# SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Veličina
А	[%]	Tažnost
A	$[A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}]$	Konstanta emise, závisí na emitujícím povrchu
A80mm	[%]	Tažnost
b′	[mm]	Šířka svaru
е		Základ přirozeného logaritmu
$e \cdot \varphi_0$	[eV]	Výstupní práce elektronu z kovu
$f_d$	[MPa]	Maximální hodnota dovoleného namáhání pro
		běžné provozní zatížení
h	[mm]	Hloubka svaru
$J_e$	$[A \cdot cm^{-2}]$	Hustota emisního proudu
k	$[J \cdot K^{-1}]$	Boltzmannova konstanta
$\mathbf{P}_{0}$	[Pa]	Mezní tlak u dokonale těsné soustavy
$\mathbf{P}_1$	[Pa]	Počáteční tlak v čerpaném prostoru
$P_2$	[Pa]	Konečný tlak v čerpaném prostoru
R <sub>m</sub>	$[N \cdot mm^{-2}]$	Minimální mez pevnosti v tahu
$\mathbf{R}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}$	[MPa]	Minimální mez pevnosti v tahu při teplotě
		T °C
R <sub>p0,2</sub>	$[N \cdot mm^{-2}]$	Minimální smluvní mez kluzu 0,2 %
$\mathbf{R}_{\mathrm{p0,2}}^{\mathrm{T}}$	[MPa]	Minimální smluvní mez kluzu 0,2 % při
		teplotě T °C
$\mathbf{R}_{p1,0}^{T}$	[MPa]	Minimální smluvní mez kluzu 1 % při
		teplotě T °C
S	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Čerpací rychlost
Т	[°C]	Teplota
Т	[K]	Absolutní teplota katody
t	[s]	Čas
V	$[m^3]$	Objem plynu
ψ́	[-]	Poměr štíhlosti svaru

FSI VUT

List

94

Popis Zkratka AC Střídavý proud CEA Francouzská atomová komise CMT Cold Metal Transfer DC Stejnosměrný proud DPSS Diode pumped solid state ES-2 Elektronová svářečka Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation LASER LPSS Lamp pumped solid state Metal Active Gas MAG MEBW-60/2 Micro Electron Beam Welder Metal Inert Gas MIG MKK Mezikrystalická koroze MKP Metoda konečných prvků PKR 251 Kombinovaná vakuová měrka Pirani/Penning pWPS Preliminary Welding Procedure Specification REM Rastrovací elektronový mikroskop  $R_{T}$ Elektrický odpor RTG Rentgenové záření SES-1 Stolní elektronová svářečka TIG **Tungsten Inert Gas** TOO Teplem ovlivněná oblast ÚPT Ústav přístrojové techniky AV ČR Zdroj vysokého napětí VN WIG Wolfram Inert Gas Welding Procedure Qualification Record WPQR WPS Welding Procedure Specification

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Zařízení pro tavení kovů elektronovým svazkem
Obr. 1.2	Elektronová svářečka ES-2 v ÚPT v původní podobě16
Obr. 1.3	Elektronová svářečka SES-1
Obr. 1.4	Uspořádání elektronové trysky se základními elektronově-optickými prvky
Obr. 1.5	Tvorba svazku urychlovací čočkou18
Obr. 2.1	Schéma uspořádání elektronové svářečky a vakuového systému 19
Obr. 2.2	Katody pro trysky elektronových svářeček21
Obr. 2.3	Mikroskopický snímek wolframové katody21
Obr. 2.4	Magnetická čočka22
Obr. 2.5	Vychylovací systém
Obr. 2.6	X-Y manipulátor poháněný krokovými motory23
Obr. 2.7	Typy polohovacích mechanismů
Obr. 2.8	Zdroje, měření a využití vakua podle tlaku25
Obr. 2.9	Schéma rotační olejové vývěvy26
Obr. 2.10	Schéma dvoustupňové rotační olejové vývěvy
Obr. 2.11	Dvoustupňová rotační olejová vývěva26
Obr. 2.12	Rotační olejová vývěva pomaloběžná27
Obr. 2.13	Schéma turbomolekulární vývěvy27
Obr. 2.14	Řez turbomolekulární vývěvou27
Obr. 2.15	Schéma difúzní vývěvy
Obr. 2.16	Difúzní vývěva
Obr. 2.17	Schéma Pirani vakuometru
Obr. 2.18	Pirani vakuometr od společnosti LAVAT
Obr. 2.19	Schéma Penningova vakuometru
Obr. 2.20	Ionizační vakuometr se studenou katodou v provedení inverzní magnetron od společnosti Pfeiffer Vacuum
Obr. 2.21	Kombinovaná vakuová měrka PKR 251 od společnosti Pfeiffer Vacuum32
Obr. 2.22	Schéma řízení elektronové svářečky MEBW-60/2
Obr. 2.23	Zdroj vysokého napětí
Obr. 2.24	Zatěžovací charakteristika zdroje vysokého napětí elektronové svářečky MEBW-60/2
Obr. 2.25	Zobrazení v REM režimu pomocí bočního detektoru
Obr. 2.26	Zobrazení v REM režimu pomocí axiálního detektoru

Obr. 2.27	Ovládací panel elektronové svářečky MEBW-60/2	.36
Obr. 2.28	Zobrazení údajů na displeji elektronové svářečky MEBW-60/2	36
Obr. 3.1	Elektronová svářečka s mobilní komorou	.37
Obr. 3.2	Elektronová svářečka Pro Beam s pracovní komorou o objemu 630 m <sup>3</sup>	.38
Obr. 3.3	Modifikovaná elektronová svářečka ES-2	.38
Obr. 3.4	Válcová pracovní komora elektronové svářečky MEBW-60/2	.38
Obr. 3.5	Válcová pracovní komora elektronové svářečky MEBW-60/2 – vnit pohled	řní 38
Obr. 3.6	Krychlová komora elektronové svářečky EVOBEAM cube 250 společno Sciaky	osti .39
Obr. 3.7	Elektronová svářečka společnosti Sciaky kvádrového tvaru	.39
Obr. 3.8	Elektronová tryska umístěná na boku pracovní komory	40
Obr. 3.9	Elektronová tryska umístěná shora pracovní komory	40
Obr. 3.10	Kruhový průzor pracovní komory	40
Obr. 3.11	Dvojité panty dveří pracovní komory	41
Obr. 3.12	Dvojité panty dveří pracovní komory	41
Obr. 3.13	Výklopné víko pracovní komory se spodním uchycením	41
Obr. 3.14	Pracovní komora s pojezdovými dveřmi společnosti Sciaky	42
Obr. 3.15	Vakuový systém elektronové svářečky MEBW-60/2 umístěný na zao straně komory	dní 42
Obr. 3.16	Vakuový systém elektronové svářečky umístěný na boční straně komory	.43
Obr. 4.1	Tvar svaru	.45
Obr. 4.2	Svarový spoj vytvořený elektronovým svazkem	.45
Obr. 4.3	Základní schéma laseru	.47
Obr. 4.4	Porovnání laserového svařování	.48
Obr. 4.5	Princip laserového svařování	.49
Obr. 4.6	Princip plynového laseru	50
Obr. 4.7	Schéma SLAB laseru	.50
Obr. 4.8	Nd:YAG laser buzený výbojkami	51
Obr. 4.9	Nd:YAG laser buzený laserovými diodami se zadním buzením	.52
Obr. 4.10	Diskový laser	.52
Obr. 4.11	Princip vláknového laseru	53
Obr. 4.12	Princip diodového laseru	53
Obr. 4.13	Princip svařování netavící se elektrodou v inertním plynu – TIG	55
Obr. 4.14	Základní sestava zařízení pro svařování metodou TIG	56

FSI	VUT
-----	-----

Obr. 4.15	Princip svařování tavící se elektrodou – MIG/MAG
Obr. 4.16	Schéma svařování metodou MIG/MAG
Obr. 8.1	Model č. 1 – model celé komory – tloušťka stěny, síť konečných prvků 63
Obr. 8.2	Model č. 2 – model dveří komory – tloušťka, síť konečných prvků
Obr. 8.3	Okrajové podmínky pro model č. 1
Obr. 8.4	Okrajové podmínky pro model č. 2
Obr. 8.5	Celková deformace na model č. 1
Obr. 8.6	Celková deformace na model č. 2
Obr. 8.7	Napětí na povrchu – ekvivalentní napětí (hypotéza Tresca) – komora 67
Obr. 8.8	Napětí na povrchu – ekvivalentní napětí (hypotéza Tresca) – dveře
Obr. 9.1	Označení přídavného materiálu – technologie svařování TIG76
Obr. 9.2	Označení přídavného materiálu – technologie svařování MAG77
Obr. 9.3	Wolframová elektroda pro TIG svařování
Obr. 9.4	Vliv směru broušení špičky
Obr. 9.5	Zkušební vzorek s přípravou hran pro svařování
Obr. 9.6	Zkušební vzorek s přípravou hran pro svařování
Obr. 9.7	Svařený vzorek metodou TIG – kořen svaru – vnější strana
Obr. 9.8	Svařený vzorek metodou TIG – kořen svaru – vnitřní strana

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

98

### SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1	Rozdělení vývěv podle způsobu jakým snižují tlak	25
Tab. 9.1	Příprava svarových spojů – V svar	69
Tab. 9.2	Příprava svarových spojů – $\frac{1}{2}$ V svar	70
Tab. 9.3	Označení materiálu dle norem	75
Tab. 9.4	Chemické složení v hm. %	75
Tab. 9.5	Technologický postup svařování komory	79

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

### List

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	3D model pracovní komory									
Příloha 2	Materiálový list korozivzdorné oceli 17240									
Příloha 3	Výkres sestavy	KOMORA	DP - 2015 - 001							
Příloha 4	Výkres svařence	KOMORA SVAŘENEC	DP - 2015 - 002							
Příloha 5	Výkres sestavy	DVEŘE KOMORY	DP - 2015 - 003							
Příloha 6	Výrobní výkres	DVEŘNÍ PŘÍRUBA	DP - 2015 - 004							
Příloha 7	Výrobní výkres	VNĚJŠÍ PŘÍRUBA	DP - 2015 - 005							
Příloha 8	Výrobní výkres	VNITŘNÍ PŘÍRUBA	DP - 2015 - 006							
Příloha 9	Výrobní výkres	PŘÍRUBA MALÁ	DP - 2015 - 007							
Příloha 10	Výrobní výkres	PŘÍRUBA VELKÁ	DP - 2015 - 008							

# PŘÍLOHA 1 – 3D MODEL PRACOVNÍ KOMORY



WNr. (číslo materiálu) 1.4301	)	aı	Cr-Ni OCEL stenitická korozivzdorná ocel <sup>Kurzname (značka)</sup> X5CrNi18-10									
Chemické složení [hm. %]												
С	Si	Mn	Р	S1)	Cr	Ni	N					
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,0-19,5	8,00–10,5	max 0,11					
Normy D	N	·			•							
DIN EN 1008 DIN EN 1002 DIN EN 1002 DIN EN 1025 DIN EN 1026 DIN 4133-91 DIN 5512/3-5 DIN 17440-9 DIN 17441-9 DIN 17442-7	<ul> <li>DIN EN 10088 /1-3-95 korozivzdorné oceli</li> <li>DIN EN 10028/7-97 ploché výrobky z ocelí na tlakové nádoby; korozivzdorné oceli</li> <li>DIN EN 10022/5-00 výkovky z oceli na tlakové nádoby; martenzitické, austenitické a austeniticko-fertické korozivzdorné oceli</li> <li>DIN EN 10250/4-00 volné výkovky z oceli pro všeobecné použití; korozivzdorné oceli</li> <li>DIN EN 10269-99 oceli a niklové slitiny na upevňovací části pro zvýšené a/nebo snížené teploty</li> <li>DIN 4133-91 ocelové komíny</li> <li>DIN 5512/3-91 oceli na kolejová vozidla; ploché výrobky z korozivzdorných ocelí</li> <li>DIN 17440-96 korozivzdorné oceli; plech, pás válcovaný za tepla a válcované tyče na tlakové nádoby, tažený drát a výkovky</li> </ul>											
Mechani	cké vlast	nosti										
Rozměr t, d [ı	mm]		$\leq 6^{2}$ )	$\leq 12^{3}$ )	$\leq 75^{4}$ )	$\leq 160^{5})^{10}$	161–250 <sup>5</sup> )					
Stav				po ro	zpouštěcím žíha	ání						
Mez kluzu R <sub>p</sub>	0,2 [MPa] m	in	230 <sup>6</sup> )	21	19	0 <sup>9</sup> )						
Mez kluzu R <sub>p</sub>	1,0 [MPa]		260 <sup>6</sup> )	25	0 <sup>6</sup> )	225 <sup>9</sup> )						
Mez pevnosti	R <sub>m</sub> [MPa]		540-750	520-	-720	500-700						
Tažnost A [%	] min		45 <sup>6</sup>	<sup>5</sup> ) <sup>7</sup> )	45 <sup>6</sup> )	45 <sup>9</sup> )	35 <sup>6</sup> ) <sup>9</sup> )					
Kontrakce Z [	%]											
Νάτατονά πτά	∽o K\/ [ ]]	podél min	-	90		100 <sup>9</sup> )	-					
	JU INV [U]	napříč min	-	6	)	-	60 <sup>9</sup> )					
Tvrdost HB m	iax		-	-	-	21	5 <sup>9</sup> )					
Modul pružno	osti E [GPa]				200							
Rozměr t <sub>r</sub> [m	m]				25011)							
Stav			po rozpouštěcím žíhání									
Mez kluzu R <sub>o</sub>	0,2 [MPa] m	in			200							
Mez kluzu R <sub>o</sub>	1,0 [MPa]				230							
Mez pevnosti	R <sub>m</sub> [MPa]		500-700									
Tožpost A 0/		podél min			45							
Taziiusta %		napříč min			35							
Kontrakce Z [	akce Z [%]											

Nárazová práce KV [ ]]		podé	l min	100										
			ĩč min	60										
	KV <sup>-196</sup> [	J] napří	5 min 60											
Modul pružnosti E [GPa] 200														
Min. hodnoty	meze kluz	:u R <sub>p</sub> 0,2 a	a R <sub>p</sub> 1,0 a	a meze	pev	nosti R <sub>m</sub>	při zvýš	ených	n tepl	otách (sta	v po rozp	oušt	ěcím	žíhání)
Teplota [°C]		100	150	20	0	250	300	3	350	400	450	50	)0	550
Mezi kluzu	R <sub>p</sub> 0,2	155	140	12	27	118	110	1	04	98	95	9	2	90
[MPa]	R <sub>p</sub> 1,0	190	170	15	5	145	135	1	29	125	122	12	20	120
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		450	420	40	0	390	380	3	380	380	375	36	60	335
Hodnoty pevi	nosti v tah	u, tažnos	ti a nára	zové p	ráce	e ve zpevr	iěném s	stavu						
Označení			C70	0		C800	C8	50	(	C1000	C115	0	C	1300
Mez pevnosti	R <sub>m</sub> [MPa]		700–8	350	80	0—1000	850-	1000	100	00-1150	1150-1	300	130	0–1500
Tažnost A [%	] min		20			12	-	-		-	-			-
Nárazová prád	KV [J]	min	80			-	-	-		-	-			-
	KV-196	[J] min	50			-	-	-		-	-			-
Mechanické v	/lastnosti p	oři nízkýc	ch teplot	ách										
Teplota [°C]						-15(	)				-1	96		
Mez kluzu R <sub>p</sub>	<sub>0,2</sub> [MPa] r	nin				370	)				4	00		
Mez pevnosti	R <sub>m</sub> [MPa]	min			1400 1500									
Tažnost A [%	] min					40					3	5		
Nárazové prá	ce KV [J] r	min				60					6	0		
Hodnoty mod	dulu pružni	osti E při	zvýšený	ich tep	lotá	ch								
Teplota [°C]			10	00 2				3	300		400		500	
Modul pružn	osti E [GPa	a]	19	4		186		1	79		172		1	65
Fyzikální	vlastno	osti												
Hustota	a	Měrna	á tepelná	i	Тер	olotní sou	činitel	Ι	Te	epelná		Re	zistiv	rita
ρ[kq.m	-3]	ка с. [J.	pacita kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] $\lambda$			νc λ, [V	VODIVOST			$\Omega$ . mm $^2$ . m $^{-1}$ ]			
7 900	-		500			16.10-6	ĵ			15			0,73	-
Odolnost	proti d	egrad	ačním	ı pro	ce	sům								
ODOLNOST I	PROTI ME	ZIKRYST	ALOVÉ K	KOROZ	<u> </u>									
– v dodávané	ém stavu: a	ino												
– po zcitlivění: ne														
Technolo	gické ú	daje												
TEPELNÉ ZP	RACOVÁN	Í												
rozpouštěcí ž	íhání	1000	⊢1100 °	°C c	chla	azovat ve	vodě n	ebo na	a vzd	uchu <sup>8</sup> )				
TVAŘITELNO	ST													
teploty tváření 1200–900 °C ochla						ochlazovat na vzduchu								

#### SVAŘITELNOST

svařitelná všemi obvyklými postupy

#### Použití

Přístroje v potravinářském průmyslu (svařitelná, dobře leštitelná, zvláště hlubokotažná, odolná proi opotřebení).

#### Ostatní vlastnosti

magnetovatelnost: ne

Porovnání se zahraničními materiály						
ISO		EURO		Česká republika		
X5CrNi18-9E X5CrNi18-9 X5CrNi18-9 X5CrNi18-10 M 11	ISO 4954-93 ISO 9328/5-91 ISO 9329/4-97 ISO 6931/2-89 ISO 7153/1-91	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X6CrNi18-10 KD	EN 10088/1-3-95 EN 10028/7-97 EN 10222/5-00 EN 10250/4-00 EN 119-74	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 17 240	ČSN EN 10088/1-3-97 ČSN EN 10028/7-99 ČSN 41 7240	
Francie		Velká Británie		Rusko		
X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 Z6CN18-09 Z4CN19-10	NF EN 10088/1-3-95 NF EN 10028/7-97 NF A36-209-90 NF A35-577-90	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 304S15 LW 21 LWCF 21	BS EN 10088/1-3-95 BS EN 10028/7-97 BS 970/1-91 BS 6323/8-82 BS 6323/8-82	08Ch18N10	GOST 5632-72	
USA		Japonsko		Kanada		
304 304 H 30304 Type304 Gr. F 304	AISI AISI SAE J405 ASTM A167 ASTM A182	SUS 304 SUS 304 SUS 304 SUS 304 SUS 304	JIS G3448-88 JIS G3468-88 JIS G4303-99 JIS G4304-99 JIS G4305-99	_	_	
Itálie		Rakousko		Švédsko		
X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X5CrNi18-10KT X5CrNi18-10KT X5CrNi18-10KW	UNI EN 10088/1-3-95 UNI EN 10028/7-97 UNI 6904-71 UNI 7660-77 UNI 7660-77	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X5CrNi18-10KKW X5CrNi18 10S	ÖNORM EN 10088/1-3-95 ÖNORM EN 10028/7-97 ÖNORM EN M3121-91 ÖNORM EN 3120-86	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 2332 2333	SS EN 10088/1-3-95 SS EN 10028/7-97 SS 142332 SS 142333	
Polsko		Maďarsko		Norsko		
0H18N9	PN H-86020-71	X5CrNi18-10 KO 33	MSZ EN 10088/1-3-95 MSZ 4360-87	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 14350	NS EN 10088/1-3-95 NS EN 10028/7-99 NS 14350	
Finsko		Švýcarsko		Španělsko		
X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X4CrNi18 9	SFS EN 10088/1-3-95 SFS EN 10028/7-99 SFS 725	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10	EN 10088/1-3-95 EN 10028/7-99	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10 X5CrNi18 10 X5CrNi18 10 F.3504	UNE EN 10088/1-3-95 UNE EN 10028/7-99 UNE 36016/1,2-90,89 UNE 36087/4-89 UNE 36016/1,2-90,89	
Austrálie		Belgie		Bulharsko		
304 304	AS 1449-94 AS 2837-86	X5CrNi18-10 X5CrNi18-10	NBN EN 10088/1-3-97 NBN EN 10028/7-99	X5CrNi18-10 0Ch18N10	BDS EN 10088/1-3-99 BDS 6738-72	
Brazilie		Čína		Jugoslávie		
E 304 V-304	Br.400 Br.800	0Cr18Ni9 0Cr19Ni9	GB 4239-91 GB 12770-91	-	-	
Rumunsko		-				
5NiCr 180	STAS EN 10000/1-3-99 STAS 3583-97	-	_	_	_	

### Poznámky

<sup>1</sup> ) pro výrobky určené k obrábění je doporučen a povolen obsah S = 0,015–0,030 %
2) pás válcovaný za studena
<sup>3</sup> ) pás válcovaný za tepla
<sup>4</sup> ) plech válcovaný za tepla
<sup>5</sup> ) tyče a válcované dráty
<sup>6</sup> ) napříč
<sup>7</sup> ) pro materiál rovnaný protahováním je min hodnota o 5% nižší
8) nad 2 mm tloušťky pouze ve vodě
<sup>9</sup> ) pro válcované dráty platí pouze hodnota meze pevnosti
<sup>10</sup> ) pro profily a tyče s t $\leq$ 35 mm tvářené za studena platí: HB = max 315, R <sub>m</sub> = 500–900 MPa, A = min 36%
11) výkovky