

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**PLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ KOROZIVZDORNÝCH
OCELOVÝCH PLECHŮ MALÝCH TLOUŠTĚK**

**PLASMA WELDING OF THIN AUSTENITIC STEEL
SHEETS**

Autor: Tomáš Langer

Studijní program: TZSI

Studijní obor: bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Langer** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **419921**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Plazmové svařování korozivzdorných ocelových plechů malých tloušťek

Název bakalářské práce anglicky:

Plasma welding of thin austenitic steel sheets

Pokyny pro vypracování:

Popis technologie svařování plazmatem.
Typy svařovacích hořáků a zařízení.
Přístup z hlediska přípravy před svařováním.

Seznam doporučené literatury:

Normy, odborná literatura.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Karel Kovanda Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2017**

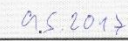

Podpis vedoucí(ho) práce

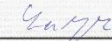

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

ANOTACE

<u>Jméno a příjmení:</u>	Tomáš Langer
<u>Obor:</u>	Bez oboru
<u>Druh práce:</u>	Bakalářská práce
<u>Vedoucí Práce:</u>	Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE – Ústav strojírenské technologie
<u>Rok obhajoby:</u>	2016/2017
<u>Název práce:</u>	Plazmové svařování korozivzdorných ocelových plechů malých tlouštěk
<u>Klíčová slova:</u>	Korozivzdorné oceli, Plazmové svařování, Mikroplazmové svařování, Plazma
<u>Anotace:</u>	<p>Bakalářská práce zpracovává problematiku plazmového svařování a svařitelnost korozivzdorných ocelí.</p> <p>Cílem této práce je teoretický popis technologie svařování plazmatem, společně s dalšími souvisejícími principy. Experimentální část práce je věnována mikroplazmovému svařování korozivzdorných plechů malých tlouštěk 1 mm z materiálu AISI 304. Zde je sledován vliv nastavovaných svařovacích parametrů a používaných plynů na výslednou geometrii svarového spoje.</p>
<u>Rozsah práce:</u>	48
<u>Počet obrázků:</u>	20
<u>Počet tabulek:</u>	8

ANNOTATION

<u>Author:</u>	Tomáš Langer
<u>Field of Study:</u>	Without field
<u>Kind of work:</u>	Bachelor thesis
<u>Supervisor:</u>	Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE – Department of Manufacturing Technology
<u>Year of defence:</u>	2016/2017
<u>Bachelor's Thesis:</u>	Plasma welding of thin austenitic steel sheets
<u>Key Words:</u>	Austenitic steel, Plasma welding, Microplasma welding, Plasma
<u>Annotation:</u>	<p>The Bachelor's thesis deals with the issues related to the plasma welding as well as the weldability of the austenitic steel.</p> <p>Scope of this thesis is a theoretical description of plasma welding as well as other related principles. The experimental part is focused on microplasma welding of austenitic steel sheets with thickness of 1 millimetre made of AISI 304. The experiment compares the effects of different welding parameters as well as gases used on the resulting geometry of the weld.</p>
<u>Scope of work:</u>	48
<u>Number of pictures:</u>	20
<u>Number of tables:</u>	8

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorských zákonů).

V Praze dne

.....

podpis

Děkuji panu Ing. Karlu Kovandovi Ph.D., IWE za cenné rady a připomínky při psaní bakalářské práce.

Dále děkuji panu Ing. Petru Vondroušovi Ph.D., IWE za pomoc při řešení některých problémů, které nastaly v průběhu prováděných experimentů.

Obsah	
1. Úvod	8
1.1 Cíl práce	8
1.2 Motivace	8
2. Plazmové svařování	9
2.1 Princip svařování plazmou	9
2.1.2 Výhody svařování plazmou	10
3.1.3 Fyzikální princip plazmového oblouku	11
3.1.4 Procesy při tvorbě plazmového oblouku	12
2.2 Volba plynu	13
2.2.1 Vlastnosti používaných plynů a směsí	15
2.2.2 Plazmové plyny	16
2.2.3 Fokusační plyny	16
2.2.4 Ochranné plyny	17
2.3 Typy hořáků	17
2.4 Svařovací parametry	19
2.5 Způsoby svařování PAW	20
2.5.1 Svařování klíčovou dírkou	20
2.5.2 Svařování mikroplazmou	21
2.6 Příprava svarových ploch při svařování PAW	22
3. Korozivzdorné oceli	24
3.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí	25
3.1.1 Feritické oceli	26
3.1.2 Martenzitické a vytvrditelné oceli	27
3.2 Svařitelnost korozivzdorných ocelí	30
4. Experiment	32
4.1 Experimentální pracoviště	32
4.1.1 Svařovací traktor WELDYCAR NV	32
4.1.2 Invertorový mikroplazmový zdroj	32
4.1.3 Mikroplazmový hořák	34
4.1.4 Upínací přípravek	35
4.2 Použité plyny	36
4.3 Materiál a rozměry zkušebních vzorků	36
4.4 Postup svařování	36
4.5 Vyhodnocení	38
4.5.1 Naměřené hodnoty	39
5. Závěr	42

1. Úvod

1.1 Cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce je teoreticky zpracovat technologii plazmového svařování a popsat přístup z hlediska přípravy před svařováním. Dále provést rozbor svařitelnosti korozivzdorných ocelí a jejich popis. Součástí bakalářské práce je také experiment, kde byl zkoumán vliv jednotlivých parametrů na výsledný svar, které byly nastavovány na mikroplazmovém zdroji MICROPLASMA 50. Stejně tak byl sledován vliv použitých ochranných i plazmových plynů při svařování tenkých korozivzdorných plechů.

1.2 Motivace

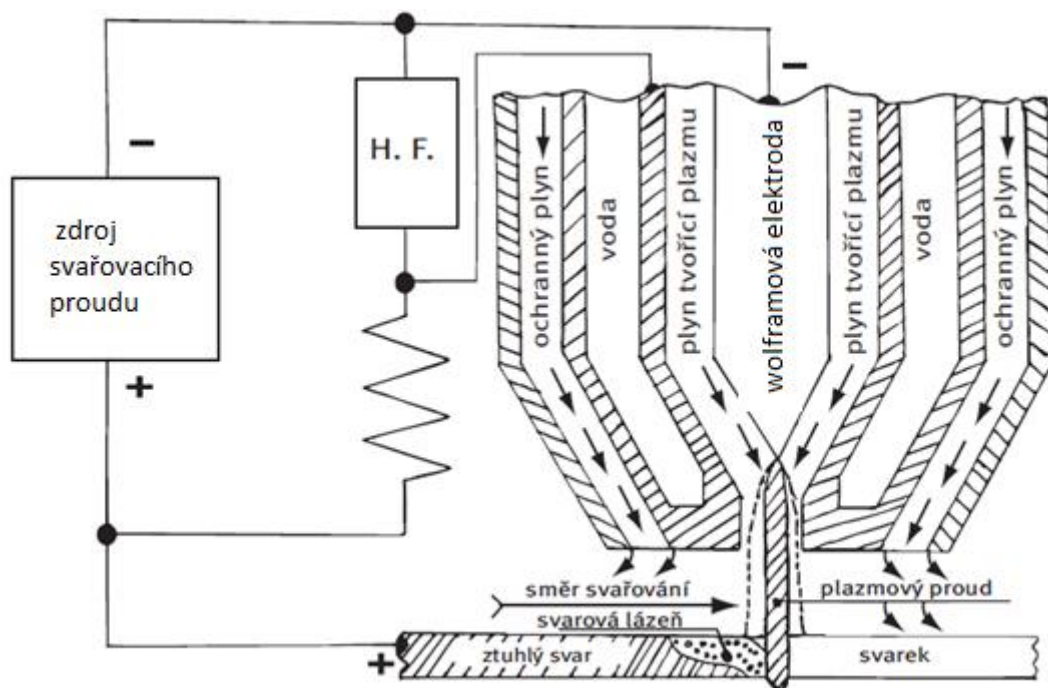
V dnešní době je velkým trendem hledání a zdokonalování technologií, které umožňují vysokou produktivitu práce a zároveň vysokou kvalitu výsledného produktu. To je i důvod, proč jsem si záměrně vybral téma plazmové svařování korozivzdorných plechů malých tlouštěk. Už samotné plazmové svařování se řadí mezi moderní a vysoce produktivní technologie obloukového svařování v ochranné atmosféře s celou řadou výhod a jeho využití pro obtížné svařování plechů malých tlouštěk je velice zajímavé.

Další motivací pro mě samotného je termín plazma, který z fyzikálního hlediska představuje čtvrté skupenství hmoty, přičemž v celém vesmíru je téměř 99 % veškeré hmoty tvořeno právě tímto skupenstvím. Plazmatické skupenství představuje hmotu úplně nebo částečně ionizovanou s vysokým obsahem energie, která se využívá v technické praxi. Kromě využití pro svařování, kterým se zabývá tato bakalářská práce, se využívá dále například k řezání, žárovým nástřikům, nebo k povrchovému tepelnému zpracování ocelí a má další širokou škálu využití.

2. Plazmové svařování

2.1 Princip svařování plazmou

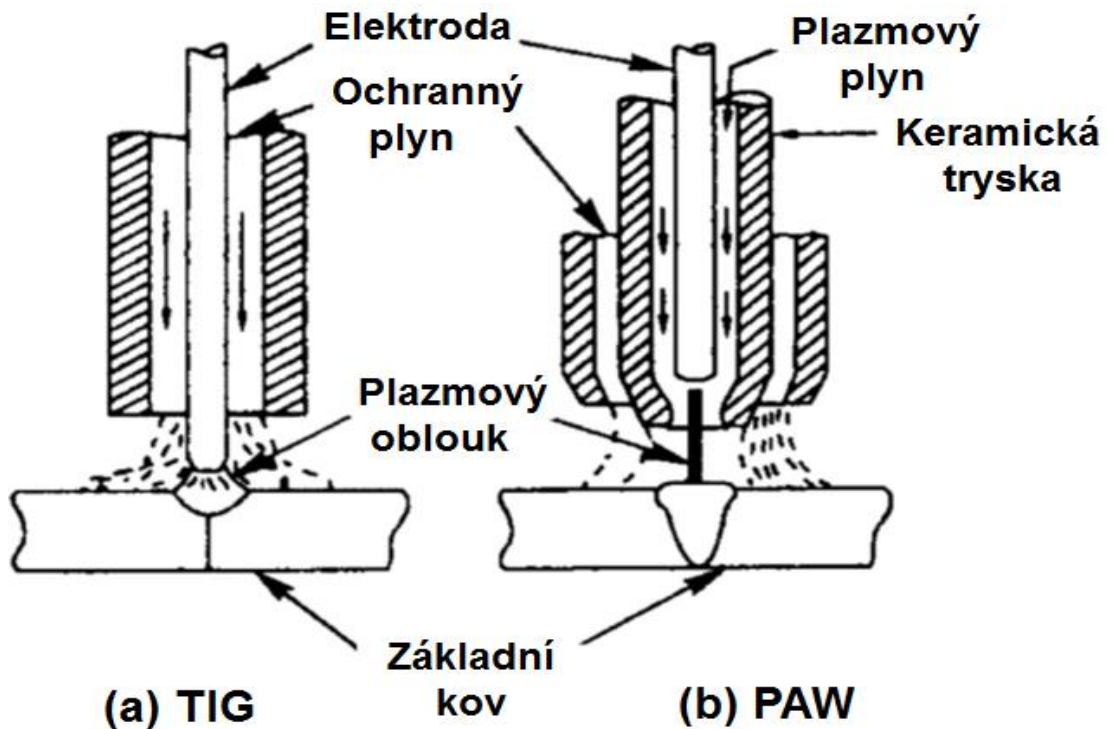
Svařování plazmou je metodou velmi často označovanou jako PAW (Plasma Arc Welding). Jedná se o moderní a vysoce produktivní metodu svařování světelným obloukem v ochranné atmosféře, jejíž vývoj započal již roku 1957 Američan Robert F. Gage. Základní schéma plazmového svařování můžeme vidět na obr. 2.1.[1,2]



Obr. 2.1 Schéma plazmového svařování [3]

Metoda plazmového svařování vznikla vývojem technologií TIG (WIG), a proto jsou si tyto technologie velice blízké. Plazmový oblouk je zde charakterizován vysokou koncentrací energie a vysokou pracovní teplotou. Základem obou technologií je oblouk hořící mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního plynu. Oproti metodě TIG má plazmové svařování vyšší produktivitu a keramická tryska je nahrazena kovovou o menším průměru. Kovová tryska zužuje oblouk na poměrně malou plochu svařence a je velmi intenzivně chlazená vodou nebo plynem. Pro zúžení oblouku se využívá koncentrace tepla a dynamický účinek plazmy. Vlivem tepla oblouku se plazmový plyn proudící z trysky roztahuje a mění se na plazmu, která opouští otvor trysky velmi vysokou rychlostí. Koncentrované teplo zaručuje hluboké

natavení základního materiálu, dobré formování kořene a charakteristický průřez svaru. Ve srovnání s laserovým paprskem má plazmový oblouk nižší koncentraci energie, ale několikanásobně vyšší energetickou účinnost a nižší celkové provozní náklady. Na obr. 2.2 je vyobrazeno srovnání metod TIG a PAW. [1,4,5]



Obr. č. 2.2 Porovnání metod TIG a PAW [5]

2.1.2 Výhody svařování plazmou

- malé deformace
- minimální ovlivnění svařovaného materiálu → lze svařovat materiály malých tlouštěk
- svařování těžko tavitelných kovů
- možnost svařování součástí malých rozměrů (součásti automobilové, letecké, rádiové nebo raketové techniky)
- vyšší rychlost svařování
- lze svařovat bez podložení kořene
- při svařování materiálů do tloušťky 8 mm není nutné svarové plochy úkosovat
- úspora přídavného materiálu
- vysoký stupeň mechanizace a automatizace

- možnost svařování střídavým i impulsivním proudem [1, 6]

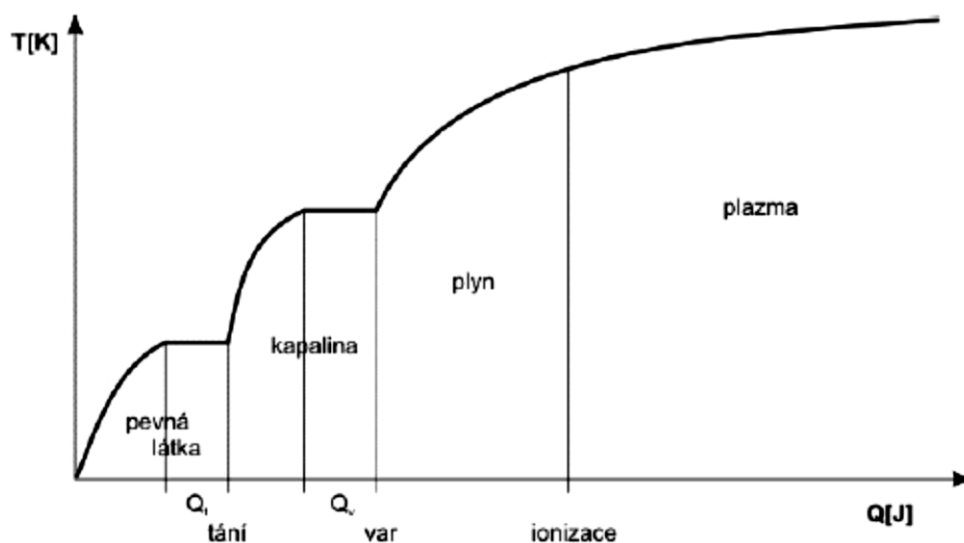
Na obr. 2.3 můžeme vidět příklady svařování PAW.



Obr. 2.3 Příklady svařování plazmou [7,8,9,10]

3.1.3 Fyzikální princip plazmového oblouku

Z fyzikálního hlediska rozeznáváme čtyři skupenství hmoty - pevné, kapalné, plynné a plazmu (viz obr. 2.4). Termín plazma, využívaný při svařování, označuje disociovaný a vysoce ionizovaný elektrický vodivý plyn, který obsahuje neutrální molekuly a atomy, ale také pozitivně a záporně nabitě částice v různém množství. Takový plyn umožňuje hoření elektrického oblouku, jehož stabilizací vzniká koncentrovaný sloupec plazmového média při průchodu chlazenou tryskou. Na vnitřním povrchu stěn trysky dochází k rekombinaci ionizovaných částic, díky čemuž se jádro sloupce silně přehřívá a úzký sloupec plazmového oblouku tak nabývá svých specifických vlastností, jimiž jsou vysoce zkoncentrovaná energie a axiální dynamická složka. [2,4,11]



Obr. 2.4 Čtyři skupenství hmoty [11]

Běžně využívaná technická plazma se vyznačuje těmito vlastnostmi:

- Současně s pružnými srážkami molekul (atomů) se v podstatné míře vyskytují i nepružné, které vedou k disociaci a ionizaci plynu.
- Chemicky stejnorodý plyn se mění na směs atomů, iontů, elektronů atd.
- Směs částic v plazmě je kvazineutrální (=počet kladných a záporných částic je přibližně stejný).
- Elektrická vodivost plazmy je závislá na pohyblivosti elektronů (100x vyšší než iontů).
- Na plazmu silně působí elektrické a magnetické pole. [12]

3.1.4 Procesy při tvorbě plazmového oblouku

Disociace

Disociace nastává při teplotách 4 000 až 10 000 K. Při takto vysokých teplotách dochází ke srážkám molekul a tím k rozpadu molekuly. Dvouatomové molekuly plynů (kyslík, dusík, vodík) disociují na své dva atomy a spotřebují přitom určité množství tepla. Schéma tohoto procesu můžeme vidět na obr. 2.5. [2,12,13]

Ionizace

Záporně nabitě elektrony a kladně nabitě protony obsažené v elektricky neutrálním protonu jsou v rovnováze, avšak vzroste-li teplota plynu v oblouku na

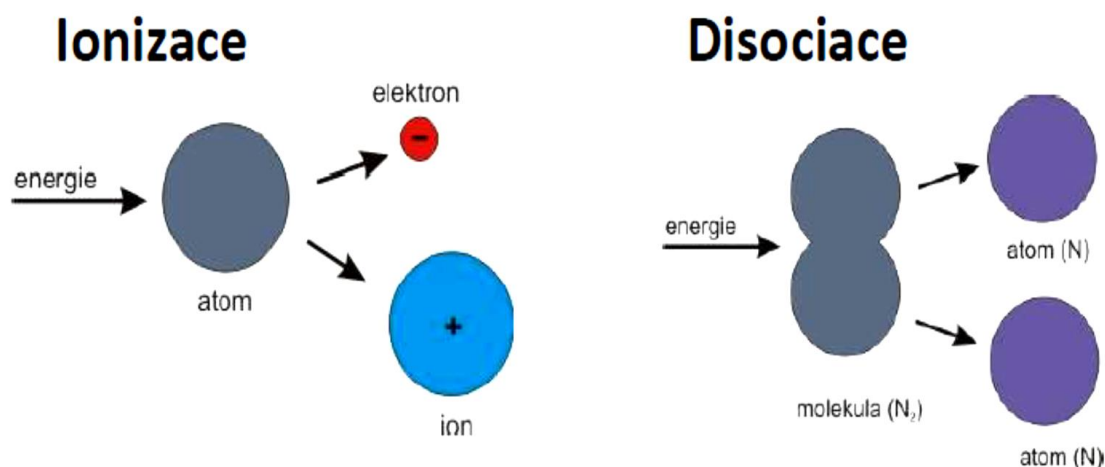
velmi vysokou hodnotu (8 000 až 30 000 K), dojde k oddělení elektronu z atomu. Elektron je vymrštěn z atomu dalším přívodem tepelné energie.

Z obr. 2.5 je patrné, že po ztrátě elektronu se atom rozpadne na kladně nabitou částici, nazývanou iont, a záporně nabitou částici, tzv. volný elektron. Takovému rozpadu elektricky nabitých částic za doprovodu spotřeby tepla říkáme ionizace. Podle stupně ionizace může být plazma plně nebo částečně ionizovaná.

U netečných plynů, jako jsou například argon, helium, nebo neon, dochází pouze k ionizaci, protože mají uzavřenou valenční sféru a jejich molekula je pouze jednoatomová. [2,12,13]

Rekombinace

Jedná se o proces, ke kterému dochází při styku plazmového plynu vycházejícího z plazmového hořáku ve formě plazmového paprsku s chladným materiálem nebo okolím. Energie, která se spotřebovala na disociaci a ionizaci, se uvolní za vzniku elektricky neutrálních atomů nebo molekul. Tento proces označujeme jako rekombinaci. [2,12,13]



Obr. 2.5 Schéma procesů Ionizace a Disociace [11]

2.2 Volba plynu

Pro svařování plazmou se používají tři základní druhy plynů: plazmové, ochranné a fokusační. Jejich rozložení v plazmovém hořáku můžeme vidět na obr. 2.8.

Mezi nejčastěji používané plyny patří argon. Plní funkci plazmového plynu i ochranného. Velmi častá je také kombinace argonu s 30 % helia. Tato směs

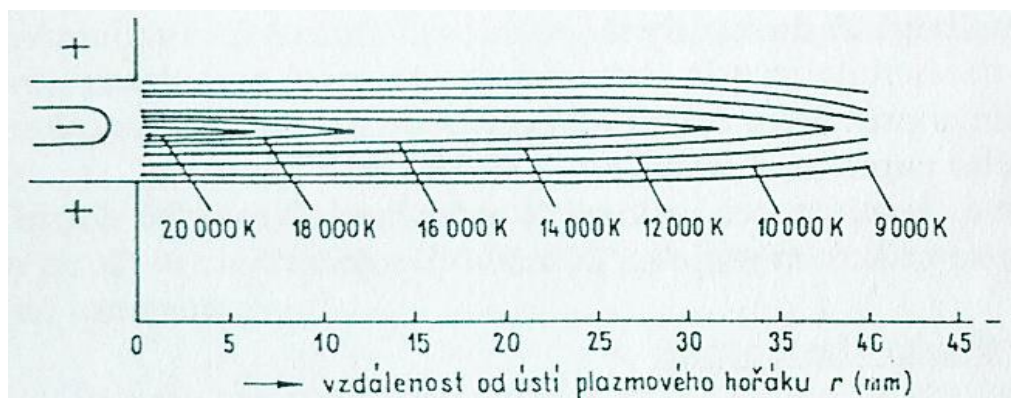
umožňuje použití nižší intenzity svařovacího proudu, což má za následek prodloužení životnosti hořáku a elektrody. Při využití směsi s obsahem helia vyšším než 30 % dochází k většímu přenosu tepla na svařenec, což může mít za následek nadměrný průvar nebo opačně, průvar nebude dostatečně silný. I přes vyšší koeficient tepelné vodivosti směsi argonu s heliem, než má samotný argon, je obtížné zvyšovat rychlost svařování za účelem kompenzace tepla přiváděného do svaru. Mezi další často používané plyny pro plazmové svařování patří například vodík nebo dusík. Stručný přehled vlastností plynů používaných u plazmového svařování můžeme vidět v tab. 2.1. Jejich hlubší rozbor bude proveden v následující podkapitole. [2]

Tab. 2.1- Přehled používaných plazmových plynů a jejich vlastností [2]

Plyn	Rel. hustota (vzduch=1)	Ionizační energie (eV)	Chemická aktivita
Vodík	0,06	13,59	Redukční
Argon	1,38	15,76	Interní
Helium	0,14	24,56	Interní
Dusík	0,91	14,55	Neredukční
Oxid uhličitý	1,44	-	Oxidační
Kyslík	1,04	13,62	Oxidační

Složení plazmových plynů se také odráží v maximální teplotě plazmového oblouku, kde dosahuje uvedených hodnot:

Dusík N ₂	9 000 K
Vodík H ₂	10 000 K
Argon.....	16 000 K
Helium.....	20 000 K
Vodou stabilizovaná plazma.....	35 000 K



Obr. 2.6 Rozložení teplot v argon-vodíkovém plazmatu [12]

2.2.1 Vlastnosti používaných plynů a směsí

Argon (Ar)

Argon je jednoatomový plyn bez barvy a zápachu, který se využívá pro svařování kovových, ale i nekovových materiálů. Je chemicky inertní, díky čemuž je velmi vhodný pro svařování vysoce reaktivních kovů, jako je titan, zirkon, tantal nebo molybden. Má nízkou tepelnou vodivost, nízký ionizační potenciál (15,8 eV) a vlastnosti zaručující malý přechod tepla z oblouku do okolních zón. Argon je též těžší než vzduch, a to přispívá k lepší ochraně svaru i nižší citlivosti na proudění vzduchu. [14,15]

Helium (He)

Stejně jako u argonu se jedná o jednoatomový inertní plyn. Oproti němu se však vyznačuje vysokou tepelnou vodivostí a vysokým ionizačním potenciálem asi 24,6 eV, což dává opačný účinek na svařovací oblouk i samotný svar. U helia se doporučuje vyšší průtok v důsledku jeho nižší měrné hmotnosti oproti argonu. Využívá se pro svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí, jako je například měď či hliník. [14,15]

Vodík (H₂)

Je molekulární plyn využívaný při svařování austenitických ocelí pro zvýšení teploty plazmového oblouku. Obdobně jako u ostatních molekulových plynů i vodík zvyšuje tekutost lázně, snižuje převýšení housenky a zlepšuje průvar. Nepoužívá se pro feritické a martenzitické oceli kvůli jejich náchylnosti na vznik trhlin. [14,15]

Dusík (N₂)

Jedná se o nejlevnější plazmový plyn, který se využívá především jako ochranný plyn. Výhoda dusíku je hlavně v jeho netečnosti vůči většině materiálů. Je vhodný hlavně pro austenitické materiály a pro zvýšení odolnosti vůči korozi u duplexních nebo superduplexních materiálů. [14,15]

Směs argonu a helia (Ar + He)

Dochází ke spojení vhodných vlastností obou plynů. Při svařování s podílem helia se zvyšuje tepelný výkon, což se pozitivně odráží na tvaru a rozměrech svarů. Úpravou poměru těchto prvků ve směsi můžeme docílit zlepšení požadovaných parametrů, jako je například rychlost svařování. Obsah helia ve směsi se běžně pohybuje i okolo deseti procent. [14,15]

Směs argonu a vodíku (Ar + H₂)

Využívá se převážně pro svařování CrNi ocelí nebo slitin na bázi niklu. V důsledku vyšší tepelné entalpie vodíku (při shodné délce oblouku) vyšší energie umožňuje zvýšit rychlost svařování ve srovnání s použitím čistého argonu. K tomu také přispívá vyšší součinitel tepelné vodivosti této směsi. Rozložení teplot při použití směsi Ar + H₂ můžeme vidět na obr. 2.6. [14,15]

2.2.2 Plazmové plyny

Plazmový plyn, někdy také nazývaný jako pilotní plyn, proudí okolo wolframové elektrody. Jeho čistota a složení ovlivňuje nejen teplotu, ale také stabilitu plazmy. Nejčastější složení bývá Ar, He, Ar + H₂, Ar + He s průtokem plynu v rozmezí od 0,5 do 9 l.min⁻¹. Množství přiváděného plynu nesmí překročit určitou mez, neboť by v důsledku velkého dynamického účinku mohlo dojít k řezání. [2,11,16]

2.2.3 Fokusační plyny

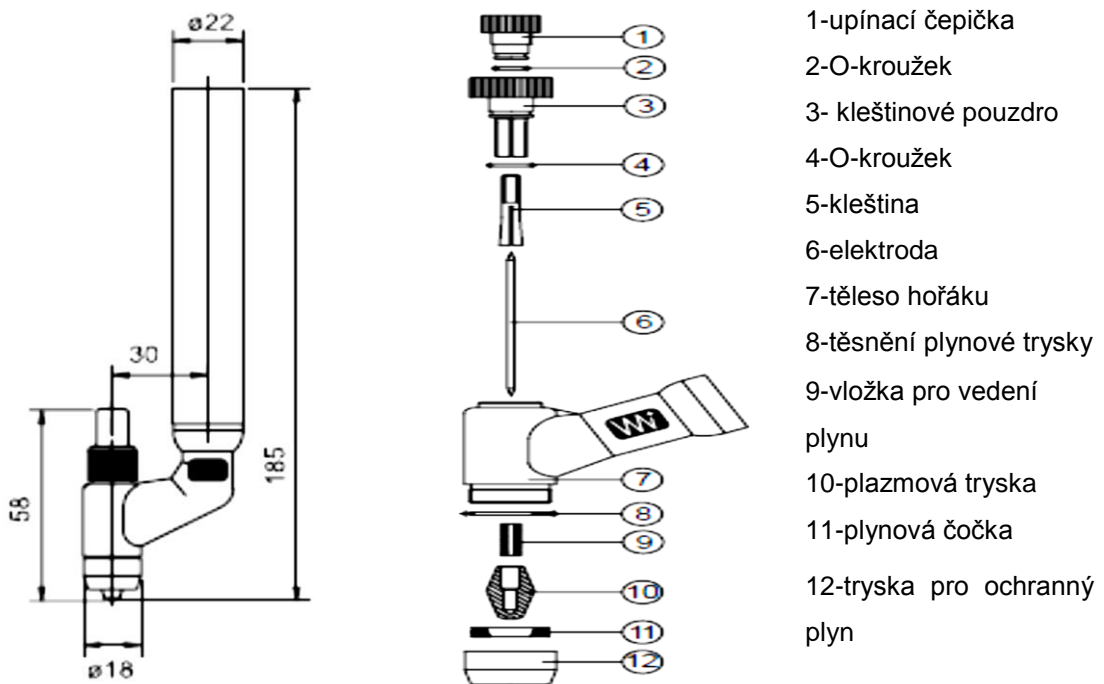
Fokusační plyn je do svařovacího hořáku přiváděn separátním okruhem mezi plazmovým a ochranným plynem za účelem zúžení proudu plazmatu. Jako fokusační plyny se nejčastěji používají směsi Ar + H₂, nebo Ar + N₂ s průtočným množstvím od 4 do 7 l.min⁻¹. [2,11,16]

2.2.4 Ochranné plyny

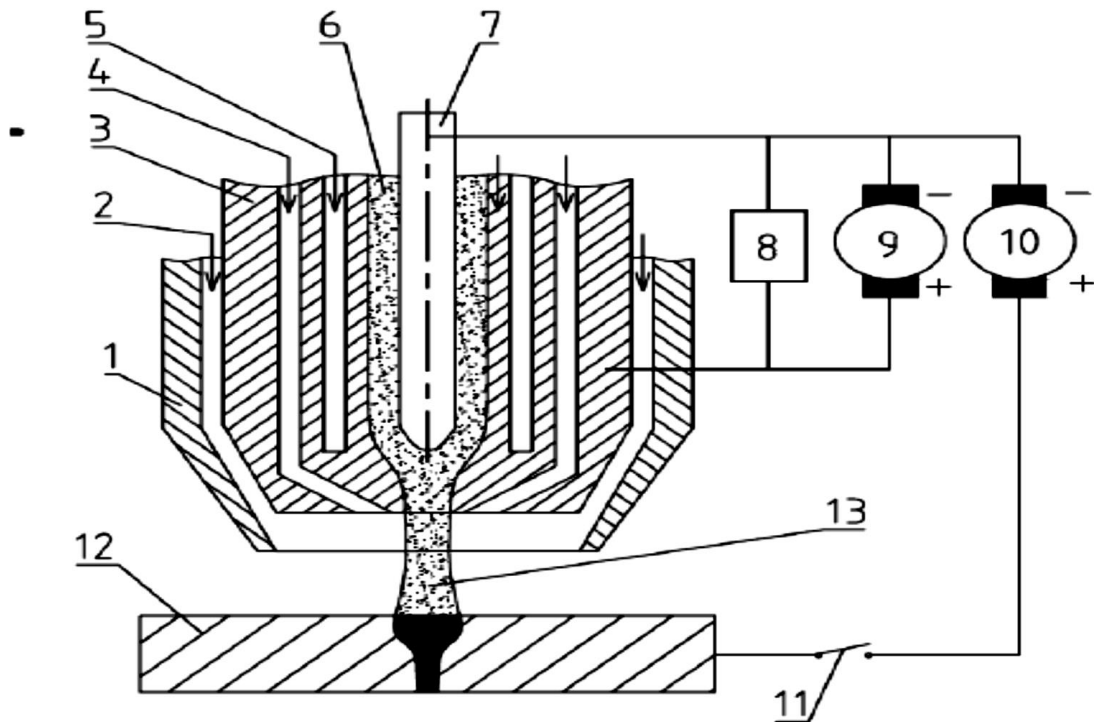
Základní materiál nesmí být negativně ovlivněn ochranným plynem, a proto se jeho volba podřizuje hlavně jemu. Pro nelegované oceli, nízkolegované oceli, austenitické oceli a slitiny na bázi niklu se nejčastěji používá směs Ar + H₂. Pro nelegované a nízkolegované oceli je možné použít i směs Ar + CO₂, nebo Ar + O₂. Pro svařování hliníku je nejvíce vhodné využití směsi Ar + He. Dalšími ochrannými plyny mohou být Ar, nebo Ar + N₂. Průtočné množství se pohybuje od 15 do 25 l.min⁻¹. [2,11,16]

2.3 Typy hořáků

První plazmový hořák vznikl modifikací TIG hořáku v roce 1957 v USA. Konstrukce plazmových hořáků může být různá. Jejich konstrukci a princip včetně schématu zapojení můžeme vidět na obr. 2.7, respektive na obr. 2.8. Obecně těleso hořáku omezuje prostor pro hoření oblouku a společně jej s vhodným plynem mechanicky stlačuje. Díky tomu se zvyšuje hustota energie a teplota silně vzrůstá. Zároveň dochází k disociaci a ionizaci plynu, čímž je část tepelné energie vázána přímo v plynu a zpětně se uvolňuje při rekombinaci, po výstupu z plazmového hořáku. Výkon plazmového hořáku závisí na množství plazmového plynu a velikosti přiváděného proudu i napětí. [2,17]



Obr. 2.7 Příklad konstrukce hořáku [18]



1-Hubice pro přívod ochranného plynu, 2- Ochranný plyn, 3- Tryska hořáku, 4-Fokusační plyn, 5- Vodní chlazení, 6-Plazmový plyn, 7-Wolframová elektroda, 8- Zdroj vysoké frekvence (ionizátor), 9- Zdroj pomocného elektrického oblouku (nezávislý) 10- Zdroj hlavního elektrického oblouku (závislý), 11-Spínač, 12- Základní svařovaný materiál, 13- Plazmový paprsek, 14-Provedený svar

Obr. 2.8 Princip hořáku se schématem zapojení [17]

V závislosti na způsobu vzniku plazmového paprsku dělíme hořáky do tří skupin:

Hořáky se **závislým (přeneseným)** plazmovým paprskem. V tomto případě vzniká plazmový oblouk mezi wolframovou elektrodou zapojenou jako katoda (- pól) a základním materiálem, který tvoří anodu (+ pól), při zapojení zdroje svařovacího proudu „10“ na obr. 2.8. Díky tomuto zapojení je svařovací hubice méně tepelně namáhána a má delší životnost.

Hořáky s **nezávislým (nepřeneseným)** plazmovým obloukem. U těchto hořáků je elektrický obvod proudu při hoření plazmového oblouku uzavřen. Plazmový oblouk hoří mezi wolframovou elektrodou (katoda, - pól) a anodou (+ pól), kterou, jak můžeme vidět na obr. 2.8, tvoří tryška „3“ plazmového hořáku, při zapojení zdroje proudu „9“. Protože hubice hořáku je velmi tepelně namáhána, musí být velmi intenzivně chlazena. Pro zvýšení životnosti trysky se jako

plazmový plyn používá pouze inertní plyn, případně směs s minimem aktivních plynů.

Hořáky s **kombinovaným** zapojením využívají zapojení obou předcházejících zdrojů (Obr. 2.8 pozice „9“ a „10“). Využívá se zde dvou oblouků, z nichž jeden je pomocný (nezávislý), který vzniká vlivem vysokofrekvenčního výboje v mezeře dýzy „3“ a hoří mezi wolframovou elektrodou (katodou) a anodou tvořenou povrchem dýzy „3“. V nezávislém oblouku se plazmový plyn proudící mezerou v dýze zahřeje na tak vysokou teplotu, že dojde k jeho ionizaci. Tímto krokem se dostane do plazmatického stavu, při kterém je vyfukován z dýzy a dochází k ionizaci oblasti mezi spodní hranou hořáku a svařovaným materiálem. Dále umožňuje vytvoření hlavního (závislého) oblouku po dostatečném přiblížení k svařenci a nejčastěji hoří i dále po jeho zapálení.[17,19]

2.4 Svařovací parametry

Mezi nejdůležitější parametry ovlivňující průběh svařování, výsledný vzhled i kvalitu svaru řadíme svařovací proud, rychlost toku plazmového plynu a svařovací rychlost.

Svařovací proud mění geometrii svarů prostřednictvím výstupního tlaku plazmy a teploty. Zvýšení napětí proudu má za následek rozšíření svaru nejen na povrchu, ale také v kořenové části spoje. Příliš velký proud ve vztahu ke svařovací rychlosti a tloušťce materiálu způsobuje přílišný průvar. Příklady rozsahů svařovacího proudu v závislosti na metodě svařování a tloušťce materiálu můžeme vidět v Tab. 2.2. [2,4]

Tab. 2.2 Doporučené parametry svařování v závislosti na použité metodě [2]

Metoda svařování	Svařovaná tloušťka (mm)	Proud (A)
Mikroplazma	0,1 - 1	0,1 – 20 (50)
Středněplazmové svařování	1 - 3,5	20 – 100
Svařování klíčovou dírkou	3,5 - 10	Nad 100

Rychlost toku plazmového plynu je spjata s kinetickou energií oblouku a týká se tedy i hloubky průvaru. Rychlost toku plazmového plynu se zvyšuje úměrně s vyšší tloušťkou materiálu nebo svařovací rychlostí. Dále se mění podle použitého plynu - například při použití dusíku je rychlost od 1500 do 2000 m.s⁻¹, u směsi Ar + 20% He okolo 2000 m.s⁻¹. [2,4]

Svařovací rychlost bývá nejčastěji v rozsahu 15 až 85 cm.min⁻¹ v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu a dalších parametrech svařování.

Dalšími parametry, které ovlivňují plazmové svařování, jsou:

- napětí na oblouku
- druh použitých plynů
- poměr míchání plynů
- množství jednotlivých plynů přiváděných do místa svaru
- čistota plynu
- druh a tvar netavící se elektrody
- vzdálenost hubice od svařovaného materiálu [2,4]

2.5 Způsoby svařování PAW

PAW se používá třemi způsoby:

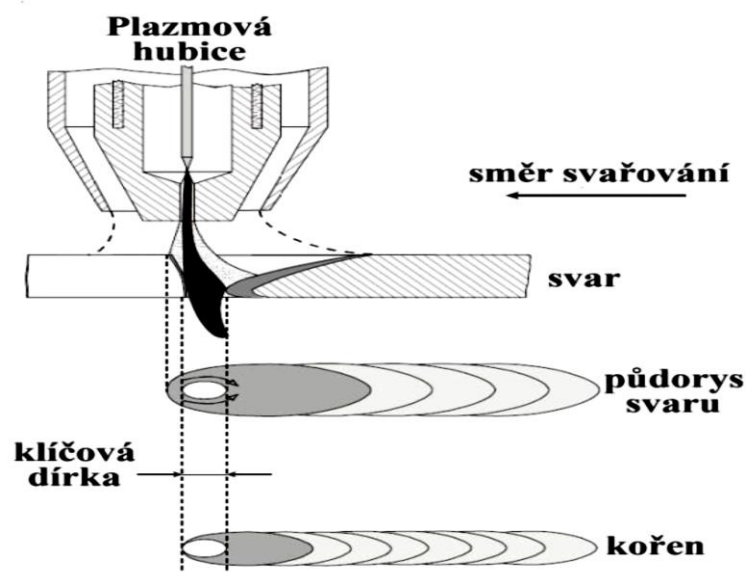
1. Mikroplazmové svařování se svařovacím proudem 0,1-20 A, tloušťky materiálů $t = 0,1-1$ mm.
2. Metoda středně plazmového svařování („not emergent jet“) se svařovacím proudem 20-100 A, tloušťky materiálů $t = 0,1-1$ mm.
3. Svařování klíčovou dírkou („keyhole welding“) se svařovacím proudem nad 100 A, tloušťky materiálů $t = 3,5-10$ mm. [2,3]

2.5.1 Svařování klíčovou dírkou

Podstatou metody využití efektu klíčové dírky je plazmový paprsek utvářející otvor na přední straně tavné lázně, kterým prochází v celé tloušťce základního materiálu (viz obr. 2.9). Právě toto profouknutí základního materiálu je znakem toho, že bylo dosaženo úplného provaření. Dalším posouváním plazmového hořáku ve směru svařování dochází vlivem povrchového napětí k opětovnému spojení svarového kovu a základního materiálu, čímž vzniká tzv. kalíškový

závar. Pro využití této metody je zásadní rovnoměrná rychlost svařování a přesné vedení hořáku středem svaru, a proto je prováděno výhradně strojně. [1,4,20]

Nespornou výhodou metody je úspora přídavného materiálu až o 1/10, jelikož není nutné u tupých svarů provádět svarové úkosity a lze ho provést na jeden průchod. Dalšími výhodami je snadná kontrola průvaru, nízká citlivost na změny délky oblouku a vysoká stabilita oblouku i při nízkých parametrech společně s malou tepelně ovlivněnou oblastí, zajišťující vysokou kvalitu svařovacího procesu. [1,4]



Obr. 2.9 Svařování klíčovou dírkou [21]

2.5.2 Svařování mikroplazmou

Mikroplazmové svařování probíhá již výše zmíněným principem klíčové dírky bez použití přídavného materiálu (může být i s přídavným materiálem). Plazmový oblouk, který se vyznačuje vysokou stabilitou hoření i při nízkých proudech (0,1 až 20 A), umožňuje svařovat kovové fólie tlouštěk 0,01 mm nebo plechy tlouštěk 2 mm. Komplikací zde představuje příprava svarové mezery, která se musí pohybovat v rozmezí 10 až 20 % tloušťky fólie. Dále musí být zajištěn kvalitní odvod tepla i poloha svařovaných materiálů, k čemuž se využívá upínacích přípravků.[16,22]

Největší oblast využití této metody bývá u svařování dílů, kde je kladen velký důraz na jakost svarových spojů (výroba měřících přístrojů, termostaty, vedení elektronových mikroskopů apod.). I přes bezproblémovou možnost ručního

svařování bývá 70 až 80 % prodaných zařízení obohaceno o různé typy mechanizace, které zajišťují plynulé vedení svařovacího hořáku a snadnou opakovatelnost. [20]

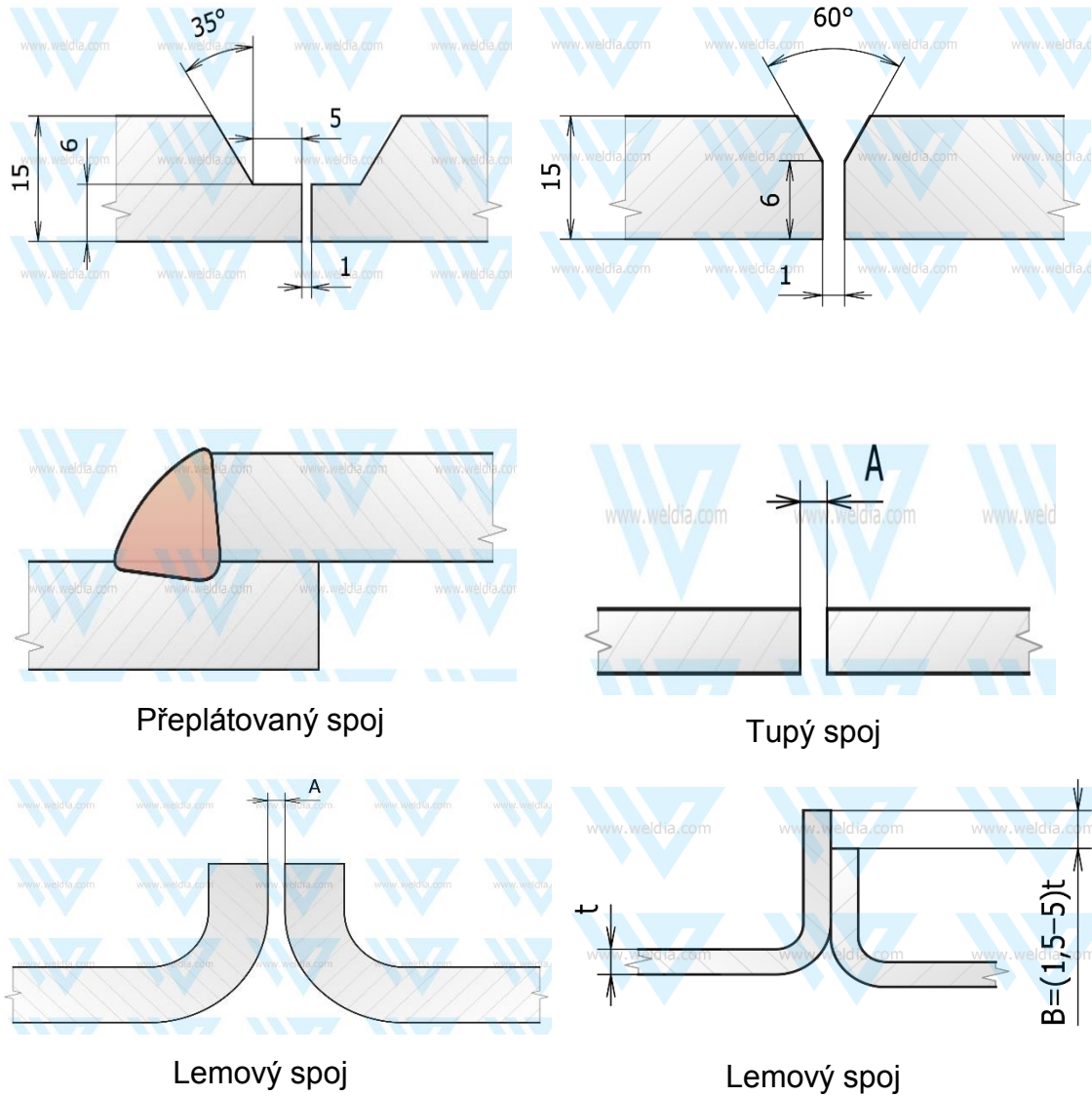
2.6 Příprava svarových ploch při svařování PAW

Svarové plochy pro svařování se upravují podle požadavků technologie a v souladu s platnými technickými normami. V České republice se využívá převzaté evropské normy ČSN EN ISO 9692-1, která řeší jednotně přípravu ploch pro svařování ocelí. [23]

Pro kvalitní svarový spoj je důležité, aby byla provedena příprava svařovaného materiálu a správná volba technologie svařování. Nesmí být zapomenuto vzít v potaz některá důležitá fakta. Například u plechů menších tlouštěk je větší riziko deformace. To souvisí také s materiálem plechu, kde korozivzdorné plechy mají větší sklon k deformacím nežli plechy z ocelí obvyklé jakosti. Další důležitou zásadou je dělení plechu prováděné před svařováním, které zajistí lepší sestavení a výslednou kvalitu svarového spoje.[24] Před započítím samotného svařování je doporučeno svařované materiály zbavit rzi, mastnoty a jiných nečistot ovlivňujících svařování. Na tyto účely je vhodné použití korozivzdorných ocelových drátovaných kartáčů, korozivzdornou ocelovou vlnu nebo různá chemická rozpouštědla. [3]

Svařování tenkých plechů plazmou je realizováno následujícími typy svarů: tupý, přeplátovaný, nebo lemový (viz obr. 2.10). Nejsnadnější je příprava I-tupého spoje, který může být svařován s nebo bez svarového kovu v závislosti na tloušťce dvou svařovaných dílů. Důležité je sestavení dílů, které by mělo být dostatečné, aby byl zajištěn 100% průvar. Při svařování tenkých materiálů musí být věnována extrémní péče prevenci proti nedostatečnému průvaru nebo propadnutí tavné lázně. Při svařování materiálů, kde je požadováno převýšení, se využívá tupý svar s ohybem. Tento spoj je účelný pouze na poměrně tenké materiály (1,5 až 2 mm). Další používaný spoj je přeplátovaný, u kterého není potřeba přípravy svarových ploch. Pro jeho zhotovení je nutné, aby se plechy dotýkaly těsně podél celé délky spoje, který má být svařen. Lemové spoje se používají pouze pro tenké materiály nevyžadující přídavný svarový kov. Příprava je snadná, ale tento spoj by neměl být využíván tam, kde na dokončené svary

působí přímé zatížení tahem. Mohlo by dojít k porušení kořene i za relativně nízkého pnutí.[3]

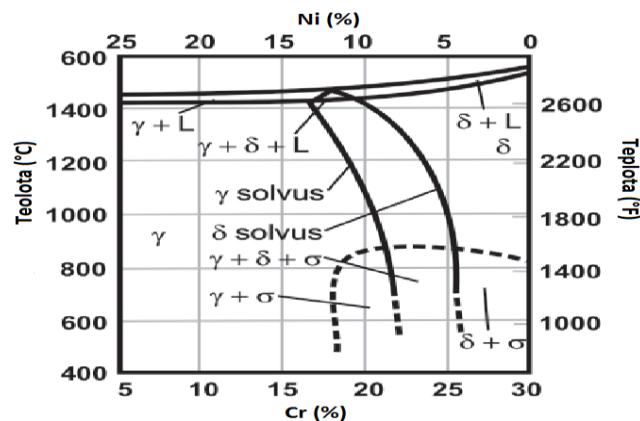


Obr. 2.10 Úpravy svarových ploch pro plazmové a mikroplazmové svařování vysokolegovaných Cr-Ni ocelí [12]

3. Korozivzdorné oceli

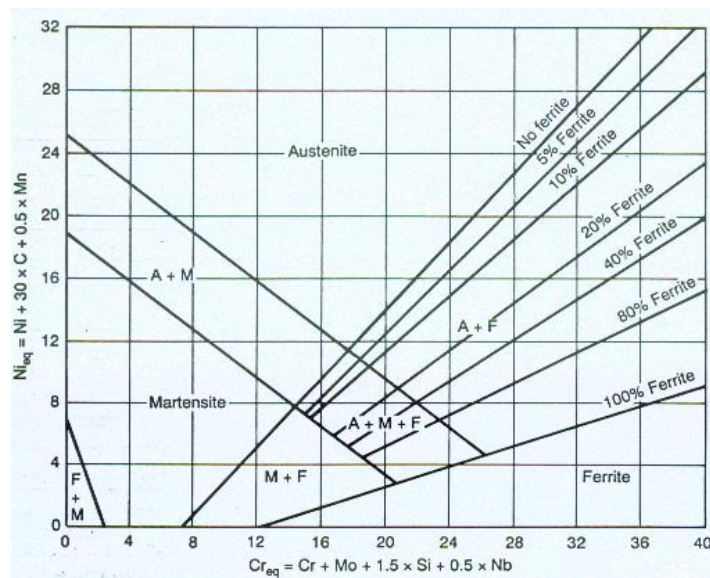
Jedná se vysokolegované oceli, jejichž hlavním prvkem je chróm. Korozivzdorné oceli mají schopnost pasivace, díky které jsou odolné proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí (soli, kapaliny a plyny). Podmínkou pasivace je obsah chromu v tuhém roztoku vyšší než 11,5 %. Obsah chromu v tuhém roztoku závisí také na obsahu uhlíku, se kterým tvoří karbidy, ale jeho obsah v korozivzdorných ocelích bývá nízký. Nejčastěji bývá nižší než 0,08 % s výjimkou martenzitických ocelí, kde může být vyšší. Pro vyšší difuzní rychlost uhlíku, než má chróm, může být vznik karbidů spojen se vznikem heterogenity. Místa ochuzená o chróm mají nižší korozivzdornost než ostatní matrice. Srážení karbidů chromu $M_{23}C_6$ na hranicích zrn může zapříčinit mezikrystalickou korozi, která se vyskytuje hlavně v tepelně ovlivněných oblastech po svařování. K zamezení vzniku mezikrystalické koroze snižujeme obsah uhlíku na koncentraci, která se rovná nebo je menší než je rozpustnost uhlíku v matici při teplotách při kterých se ještě vylučují karbidy, nebo v legování oceli prvky s vyšší afinitou k uhlíku než je afinita chromu (Nb, Ta, Ti). Oceli, u kterých je uhlík vázán na karbidy prvků s vysokou afinitou k uhlíku, se nazývají stabilizované. [25]

Dalšími důležitými prvky u korozivzdorných ocelí jsou např. austenitotvorné prvky Ni, N, Mn a již zmíněný C, které rozšiřují oblast γ v rovnovážném diagramu Fe-Cr-Ni (obr. 3.1) a snižují teplotu martenzitické přeměny. Vysokolegované oceli Cr-Ni mohou mít austenitickou strukturu. Nikl zde napomáhá ke zvýšení korozivzdornosti a vedle chromu se jedná o druhý nejdůležitější prvek obsažený v korozivzdorných ocelích. [25]



Obr. 3.1 Řez ternárním rovnovážným diagramem Fe-Cr-Ni [26]

Obsah prvků obsažených v korozivzdorných ocelích má velký vliv na jejich strukturu. Rozlišují se podle toho, zdali zužují nebo rozšiřují oblast γ . Chróm je hlavní představitel prvků, které mají největší vliv na strukturu ocelí, které uzavírají oblast γ . Právě proto se u skupiny prvků, které uzavírají oblast γ , zavádí pojem chróm-ekvivalent (Cr_{ek}). Uvádí ekvivalentní působení koncentrace těchto prvků na rozsah oblasti γ k působení 1 % obsahu chrómu. U austenitotvorných prvků má na strukturu matrice největší vliv nikl, a proto obdobně jako u chrómu zavádíme pojem nikl-ekvivalent (Ni_{ek}). Díky těmto pojům (Cr_{ek} , Ni_{ek}) je možné vyjádřit vliv chemického složení na strukturu nerezavějících ocelí v Schäfflerově-Delongově diagramu (obr. 3.2). [25]



Obr. 3.2 Schäfflerův-Delongův diagram [27]

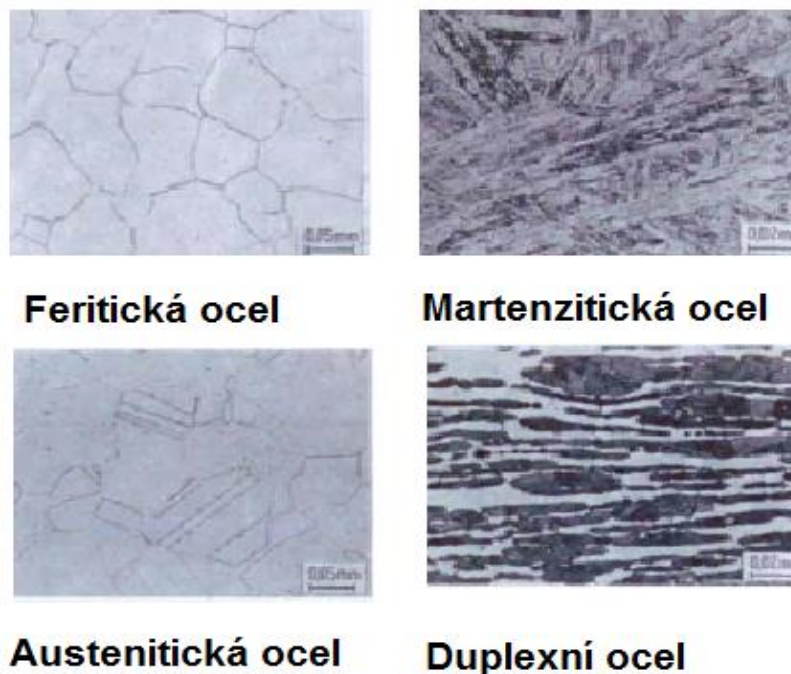
3.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí

Podle struktury (obr. 3.3) dělí norma EN 10088 korozivzdorné oceli na:

- feritické, pro které je charakteristický nízký obsah uhlíku a dusíku
- martenzitické a vytvrditelné
- austenitické
- austeniticko-feritické (duplexní) [25]

V tab. 3.1 můžeme sledovat některé mechanické vlastnosti korozivzdorných ocelí a jejich porovnání mezi sebou. Je z ní například patrné, že martenzitická ocel, vykazující nejvyšší pevnostní vlastnosti, má zároveň nižší odolnost proti

korozí a nižší houževnatost. Oproti tomu austenitická ocel má přesně opačné vlastnosti.



Obr. 3.3 Přehled typických struktur [28]

Tab. 3.1 Porovnání vlastností korozivzdorných ocelí [29]

Parametr	Austenitická ocel	Feritická ocel	Duplexní ocel	Martenzitická ocel (kalená a popouštěná)
R_e (N.mm ⁻²)	220 - 400	250 - 400	350 - 500	550 - 1800
R_m (N.mm ⁻²)	500 - 800	500 - 700	700 - 900	720 - 2000
δ_s (%)	30 - 50	25 - 30	30 - 40	2 - 20
Ψ (%)	55 - 70	45 - 60	50 - 60	5 - 55
KC (J/cm ²)	120 - 25	20 - 60	60 - 250	5 - 120

3.1.1 Feritické oceli

Při hrubém rozdělení lze feritické oceli rozčlenit do dvou skupin, a to na feritické oceli s obsahem Cr přibližně 11 až 13 % a feritické oceli s obsahem Cr asi 17 %. Typicky jemnozrnná struktura, kterou tyto oceli mají, bývá dosažena příslušným tepelným zpracováním.

Nízký obsah chrómu (11 - 12 %) má za následek omezení korozní odolnosti např. jen na atmosférické podmínky, nebo na vodnatá média. U ocelí s vyšším obsahem chrómu (17 %) se dosahuje lepší korozní odolnosti nebo lze zvýšit korozní odolnost dolegováním asi 1 % Mo. Dalšími obsaženými prvky v těchto ocelích bývá Ti nebo Nb, které na sebe váží uhlík. Díky tomu jsou stále i po svařování bez doplňkového tepelného zpracování (i pro větší tloušťky) a jsou stabilní proti mezikrystalové korozi. [30]

3.1.2 Martenzitické a vytvrditelné oceli

Martenzitické a vytvrditelné chromové a chromoniklové oceli

Pro získání potřebné korozivzdornosti (více než 11,5 % Cr) musí obsahovat prvky, které rozšiřují oblast γ . Snižování obsahu uhlíku je zde omezeno na koncentraci cca 0,08 % a je nutné ho kompenzovat přísadou niklu. Přípustná hodnota obsahu feritu v oceli je 20 %. Tyto oceli jsou korozně odolné v zakaleném stavu. Při popouštění na hodnotu 450 až 550 °C se vylučují z martenzitu karbidy, korozní odolnost se snižuje a může se projevit křehkost. Nejčastěji obsahují do 13 % Cr a do 0,25 % C. [25]

Martenzitické oceli bez niklu

Obsah uhlíku u těchto variant martenzitických ocelí bývá 0,95 % až 1,20 %. U ocelí, kde je obsah uhlíku vyšší, je zvýšený i obsah Cr na 17 % až 19 % a jsou legovány Mo. Je všeobecně doporučeno oceli s vysokým obsahem uhlíku kalit nadvakrát. Při prvním kalení vysokou teplotou (nad 1000 °C) dochází k rozpouštění karbidů, díky čemuž je ve struktuře vyšší množství zbytkového austenitu. Ze zbytkového austenitu se při druhém kalení vyloučí jemné karbidy, které se snadněji rozpustí. [25]

Martenzitické oceli s niklem

Pro tyto oceli je charakteristický nízký obsah uhlíku, struktura tvořená nízkouhlíkovým martenzitem a disperzně vyloučeným sekundárním austenitem. Austenit získaný popouštěním nízkouhlíkového martenzitu zlepšuje plastické vlastnosti, mez únavy i svařitelnost. Při nízkém obsahu uhlíku se přidává i nikl, který rozšiřuje oblast γ . [25]

Vytvrditelné oceli

U ocelí legovaných mědí a niobem se vytvrzování dosahuje precipitací fází Ni_3Nb a $\epsilon\text{-Cu}$. Po zakalení (kalící teplota $1050\text{ }^\circ\text{C}$) se získává martenzitická struktura a po vytvrzení při 400 až $500\text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje ocel vysoké pevnosti.

Oceli legované hliníkem mají po ochlazení z rozpouštěcího žíhání (teplota $1050\text{ }^\circ\text{C}$) úplně nebo částečně austenitickou strukturu. Přeměna na martenzitickou se vyvolává ochlazením na $-80\text{ }^\circ\text{C}$ nebo destabilizačním žíháním. Strukturní vytvrzení nastává při 400 až $500\text{ }^\circ\text{C}$. [25]

3.1.3 Austenitické oceli

Jedná se o nejvýznamnější skupinu korozivzdorných ocelí, která se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, dobrou zpracovatelností a hlavně vysokou korozní odolností. Nejčastěji obsahují 18% až 20% Cr a 8% až 11% Ni. Rozpustnost uhlíku v austenitu těchto ocelí je $0,03\%$. U austenitických Cr-Ni ocelí s vyšším obsahem uhlíku je nutné provádět rozpouštěcí žíhání při teplotách cca $1050\text{ }^\circ\text{C}$ s následným rychlým ochlazením, díky kterému dochází k potlačení precipitace a zisku austenitické struktury. [25,30]

Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti austenitických ocelí:

- Chrom – zajišťuje pasivaci a odolnost proti oxidaci.
- Nikl - stabilizuje austenit za normální teploty, zvyšuje korozní odolnost.
- Mangan – austenitotvorný prvek, při koncentraci nad 3% snižuje praskání svarů.
- Dusík – společně s Mo zvyšuje odolnost proti bodové a štěrbinové korozi.
- Křemík – vyvolává praskavost svarů, odstraňuje náchylnost k mezikrystalické korozi.
- Molybden – zvyšuje žárovečnost a podporuje vylučování intermediálních fází.
- Měď – používá se k legování vytvrditelných ocelí.
- Titan a niob – karbidotvorné prvky, snižují obsah uhlíku → stabilizace oceli.
- Hliník – zvyšuje žáruvzdornost, používá se k precipitačnímu vytvrzení.
- Síra, selen, fosfor, olovo – zvyšují obrobitelnost, snižují korozní odolnost.

- Bór – zlepšuje tvařitelnost a zvyšuje žárovevnost. [25]

3.1.4 Austeniticko-feritické (Duplexní oceli)

Tyto oceli mají obsah feritu okolo 40 % až 60 %. Obsah křemíku je zde omezen do 1 %, fosforu do 0,035 % a síry 0,015 %.

Chrórníkové oceli austeniticko-feritické mají obsah Cr 21 % až 28 % a Ni 3,5 % až 8 %. Duplexní oceli se tepelně zpracovávají obdobně jako austenitické oceli, tedy rozpouštěcím žháním s následným ochlazením. Pro vysokou koncentraci legujících prvků mají tyto oceli vysokou chemickou heterogenitu, která se odstraňuje zvýšením teploty žhání na 1200 °C. Vykazují dobrou svařitelnost a odolnost proti mezikrystalické korozi. [25]

3.1.5 Chemické složení

V tab. 3.2 můžeme vidět porovnání chemického složení vybraných typů korozivzdorných ocelí.

Tab. 3.2 Chemické složení vybraných korozivzdorných ocelí v hm. % [25]

Značka	C	Si	Mn	N	Cr	Mo	Ni	Ti	Cu
Feritické oceli									
X22CrNi12	max. 0,03	max. 1,0	max. 1,5	0,03	10,5- 12,5		0,3-1		
X2CrTi12	max. 0,03	max. 1,0	max. 1,0		10,5- 12,5			x(C+N)	
X6Cr13	max. 0,08	max. 1,0	max. 1,0		12,0- 14,0		až 0,65		
Martenzitické oceli									
X12Cr13	0,08- 0,015	max. 1,0	max. 1,5		11,5- 13,5		≤0,75		
X20Cr13	0,16- 0,25	max. 1,0	max. 1,5		12,0- 14,0				
X70CrMo15	0,65- 0,75	max. 0,7	max. 1,0		14,0- 16,0	0,4- 0,8			
Austenitické oceli									
X10CrNi18-8	0,05- 0,15			≤0,11	16-19	≤0,08	6-9,5		

X2CrNi18-7	≤0,03			0,1- 0,2	16,5- 18,5		6-8		
X2CrNiN23-4	≤0,03			0,05- 0,2	22-24	0,3- 0,6	3,5- 5,5		0,1- 0,6
Duplexní oceli									
X2CrNiN23-4	max. 0,03			max. 0,05- 0,2	22-24	0,1- 0,6	3,5- 5,5		0,1- 0,6
X2CrNiMoN22- 5-3	max. 0,03			max. 0,1- 0,22	21-23	2,5- 3,5	4,5- 6,5		
X2CrNiMoN25- 7-4	max. 0,03			max. 0,2- 0,35	24-26	3,0- 4,5	6,0- 8,0		

3.2 Svařitelnost korozivzdorných ocelí

Feritické oceli

Feritické oceli jsou vhodné pro svařování, avšak dochází k poklesu tažnosti. Všechny oceli této skupiny mají v teplem ovlivněné oblasti sklon k silnému růstu zrna, a proto je vhodné svařovat je s co nejmenším přívodem tepla. I z tohoto důvodu se využívá přehřevu svařovaného materiálu a používáme přídavné materiály s nízkým obsahem difuzního vodíku. Přes možné využití pro silnostěnné svařované konstrukce bývá feritická ocel většinou využívána pro tenkostěnné materiály, kde se klade důraz na čistotu svarových ploch. Tepelné zpracování není nutné, ale pro zlepšení odolnosti svarových spojů proti mezikrystalické korozi se někdy využívá žihání.[30,31]

Martenzitické oceli

Oceli s nízkým obsahem uhlíku jsou ke svařování vhodné pouze podmíněně a oceli s vysokým obsahem pro svařování nejsou vhodné. Při svařování používáme přehřev 250 °C, při kterém zůstává ve struktuře dostatečné množství austenitu, ve kterém se rozpouští difuzní vodík. Jako přídavný materiál se volí materiál stejného složení jako základní kov. [30,31]

Austenitické oceli

Svařují se snadněji než oceli feritické, ale je nutné brát v úvahu některé zvláštnosti. Například koeficient tepelné roztažnosti je asi o 50 % vyšší, což vede ke vzniku deformací a zbytkových pnutí. Tepelná vodivost je přibližně o 60 % nižší a teplo se tak koncentruje ve svařovací oblasti (odvádění měděnými podložkami). Používají se přídatné materiály stejného druhu nebo materiály výše-legované tak, aby byly při svařování bezpečné proti vzniku trhlin za tepla. U Ti nebo Nb stabilizovaných ocelí se sníženým obsahem uhlíku jsou ve svařovaném stavu odolné proti mezikrystalové korozi. Pro tloušťky větší než 5 mm musí být snížen obsah uhlíku pod 0,03 %. [30]

Duplexní oceli

Svařitelnost duplexních ocelí s přídatnými materiály je určována hlavně vlastnostmi přechodového pásma. Doporučuje se použití přídatného materiálu se zvýšeným obsahem niklu. Pro zajištění korozní odolnosti svarového spoje musí být náběhové barvy chemicky nebo mechanicky odstraněny po dokončení svařování. [30]

4. Experiment

4.1 Experimentální pracoviště

Pracoviště použité pro provádění experimentu se nachází v Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze v Laboratoři výuky svářečských technologií. Uspořádání pracoviště můžeme vidět na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Pracoviště experimentu

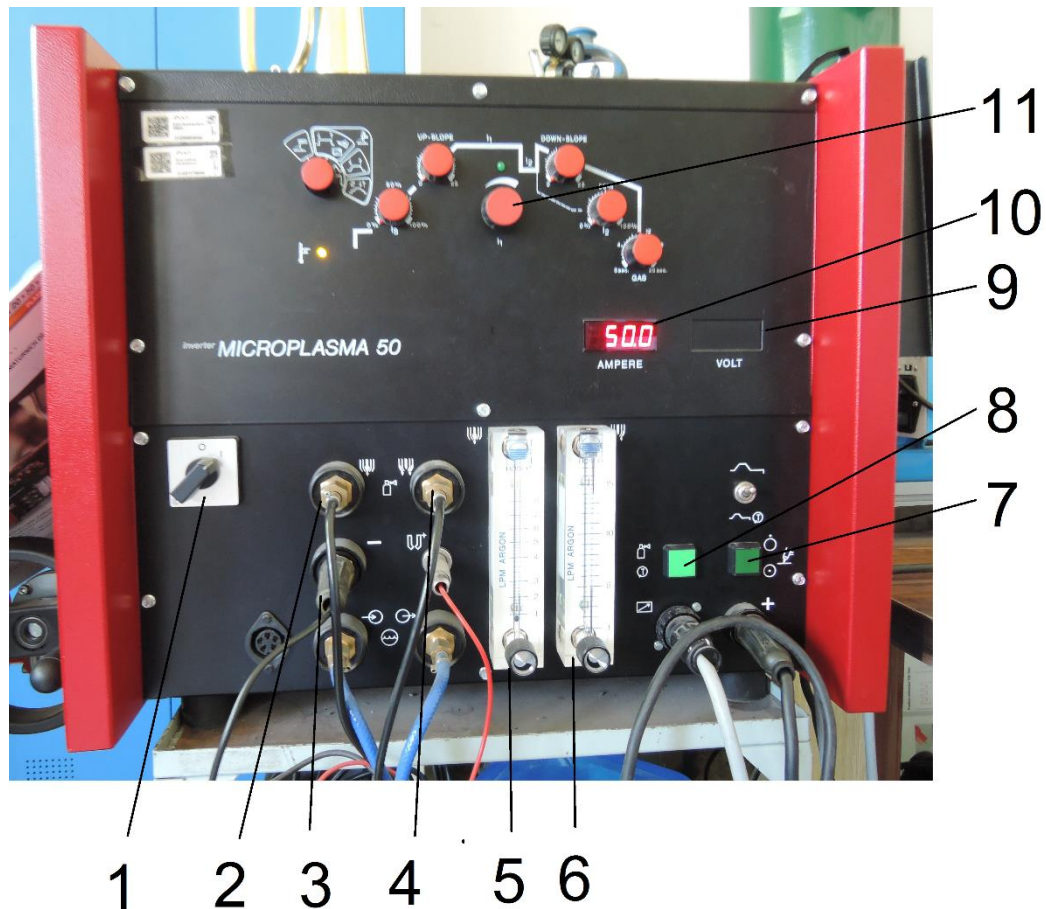
4.1.1 Svařovací traktor WELDYCAR NV

Pro posun svařovacího hořáku požadovanou rychlostí (30,50 a 70 cm/min) byl použit čtyřkolý svařovací traktor WELDYCAR. Dále za pomoci listových měrek a již zmíněného traktoru bylo možné nastavit vzdálenost mezi svařovacím hořákem a svařovaným plechem (1 mm a 3 mm).

4.1.2 Invertorový mikroplazmový zdroj

Laboratoř výuky svářečských technologií je vybavena invertorovým zdrojem stejnosměrného proudu pro mikroplazmové svařování MICROPLASMA 50 (Obr. 4.2) od firmy EWM Hightec Welding s.r.o. Zdroj má rozsah nastavení plazmového proudu 0,1 A - 50 A a rozsah pomocného oblouku 1 A – 10 A. Samotný zdroj je vybaven pomocným příslušenstvím: chladicí modul UK 500,

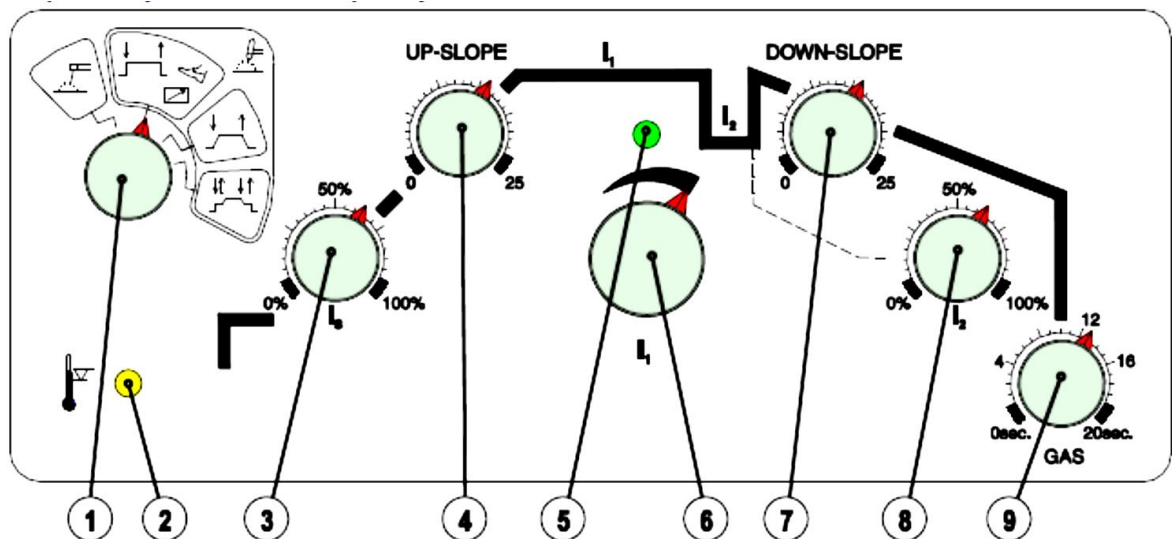
nožní pedál FR 21, ruční ovladač proudu FRP 15 a dva plazmové hořáky pro ruční a strojní svařování.



1- hlavní vypínač, 2- přípojná vsuvka plazmového plynu, 3- zásuvka pro připojení svařovacího proudu, 4- přípojná vsuvka ochranného plynu, 5- regulátor průtoku plazmového plynu, 6- regulátor průtoku ochranného plynu, 7- tlačítko pomocného el. oblouku s kontrolkou, 8- tlačítko testování plynu, 9- zobrazení svařovacího napětí, 10- zobrazení svařovacího proudu, 11- řízení zařízení

Obr. 4.2 Zdroj MICROPLASMA 50

Svařovací parametry jsou nastavovány na ovládacím panelu, viz Obr. 4.3. Může se zde přepínat spouštění a nastavování svařovacího proudu mezi nožním, ručním ovládáním a ovládáním na zdroji. Lze také upravovat parametry proudu jako náběh, doběh, pulsace a parametry průtoku ochranného plynu, jako je předfuk a dofuk. Průtok ochranného a plazmového plynu je nastavován pomocí regulátoru průtoku na čelní straně zdroje (viz Obr. 4.2).



1- otočný přepínač režimu, 2- kontrolka přehřívání/chyba chlazení svařovacího hořáku, 3- spouštěcí proud, 4- otočný ovladač doby náběhu proudu, 5- kontrolka tlačítka hořáku, 6- otočný přepínač nastavení svařovacího proudu, 7- otočný ovladač doby doběhu, 8- otočný ovladač sníženého proudu, 9- otočný ovladač doby zbytkového proudění plynu

Obr. 4.3 Ovládací panel MICROPLASMA 50 [32]

4.1.3 Mikroplazmový hořák

Mikroplazmový hořák využívaný v prováděném experimentu je stejně jako předcházející zmíněné vybavení součástí výbavy Laboratoře výuky svářečských technologií. Jedná se o strojní hořák s kombinovaným zapojením (popsáno v kapitole 2.3), jehož konstrukce je uzpůsobena pro snadné a kvalitní upnutí do manipulátoru. Pro tento experiment bylo využito svařovacího traktoru WELDYCAR, popsaného v kapitole 4.1.1. Samotný hořák není opatřený žádnými ovládacími prvky, jako tomu je v případě jiných svářecích technologií (TIG), ale je ovládán nožním pedálem, kterým lze snadno uvést hořák v činnost.

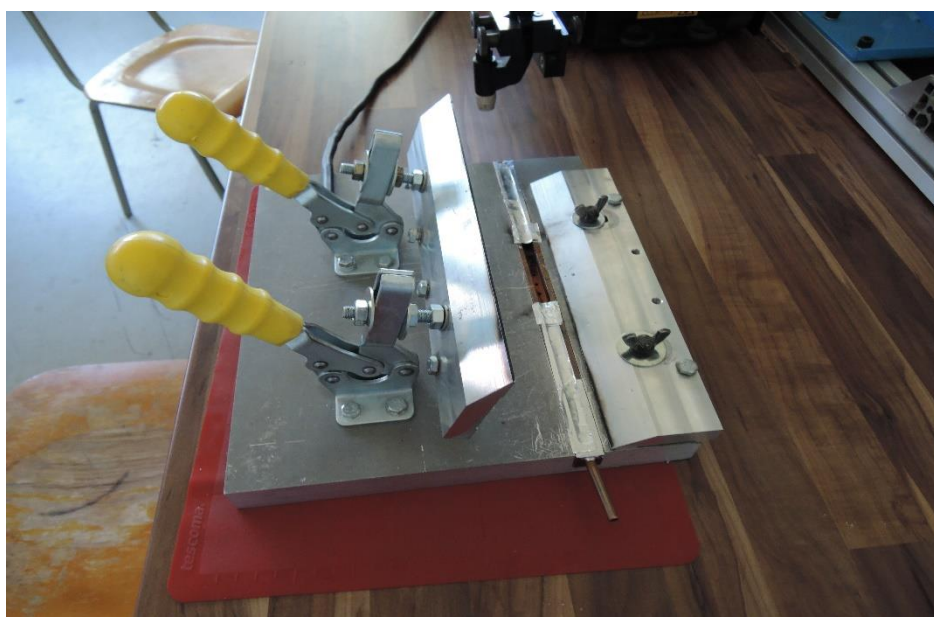
Konstrukce námi využívaného hořáku je téměř totožná s hořákem na obr. 2.7. Volba průměru trysky a elektrody pro vykonání experimentu byla zvolena podle manuálu od firmy EWM HIGHTEC WELDING. Část tabulky z manuálu je uvedena v tab. 4.1, ze které byl zvolen průměr trysky 1,6 mm a průměr elektrody 1,5 mm.

Tab. 4.1 Zatížení pro plazmové trysky [18]

Tryska	Množství plazmového plynu	Standardní tryska		Dlouhá plazmová tryska	
		elektroda (mm)	Proud (A)	Elektroda (mm)	Proud (A)
Ø (mm)	Argon (l.min ⁻¹)				
1,6	0,25-0,4	Ø 1,5	50	Ø 1,5	45
1,8		Ø 1,5	60	Ø 1,5	50
2,0		Ø 1,5/2,4	70	Ø 1,5	60

4.1.4 Upínací přípravek

Upnutí přípravku bylo řešeno za pomoci upínacích čelistí. Součástí základní desky je drážka obdélníkového průřezu určená k vsazení lišty pro přívod plynu, který slouží jako ochrana kořene svaru. Dále je na základní desku připevněna z jedné strany lišta pomocí dvou šroubů za účelem sevření svařovaného plechu. Obdobně je tomu i na druhé straně s tím rozdílem, že samotné sevření svařovaného plechu lištou je zde usnadněno upínkami, které jsou pevně přidělány k základní desce. Na jednom konci je společně s pákou připevněn také zemnicí kabel. Celé uspořádání je vidět na obr. 4.4. Deska byla ustavena v prostoru tak, aby byla rovnoběžná s dráhou traktoru WELDYCAR.



Obr. 4.4 Upínací přípravek

4.2 Použité plyny

Jako ochranné a plazmové plyny byly použity tyto plyny: Ar, Ar + 2 % H₂, Ar + 6 % H₂. Jejich popis byl zpracován v kapitole 2.2.

4.3 Materiál a rozměry zkušebních vzorků

Tenké plechy s tloušťkou 1 mm vyrobené z oceli AISI 304 (X5CrNi18-10) byly použity jako svařovaný materiál. Jedná se o austenitickou nestabilizovanou chromniklovou ocel - viz kapitola 3.1.3. V Tab. 4.2 je krátký přehled základních mechanických vlastností a chemické složení.

Tab. 4.2 Přehled vlastností oceli X5CrNi 18-10 (1.4301) [33]

Cr (%)	Ni (%)	C (%)	R _m (N/mm ²)	R _{p0,2} min. (N/mm ²)	A ₈₀ min. (%)	Žíhací teplota (°C)
17-19,5	8-10,5	<0,07	520-720	210	48	1000-1100

Plechky byly nastříhány za pomoci tabulových nůžek na plech na menší obdélníky s rozměrem stran cca 65 mm x 150 mm, aby je bylo možné snáze připevnit k upínacímu přípravku.

4.4 Postup svařování

V experimentu je používán pojem svařování, i když nedocházelo k spojování dvou oddělených plechů, ale pouze k návarům na jeden plech.

Před započítím samotného svařování bylo nutné zbavit svařované plechy veškerých nežádoucích nečistot a mastnoty za pomoci technického lihu. Následně se plech vložil mezi čelisti a desku s lištou pro přívod plynu k ochraně kořene svaru. Čelisti udržující svařovaný vzorek v požadované poloze byly za pomoci upínek a šroubů přitlačeny k podložce (viz Obr. 4.5). K WELDYCAR traktoru byl připevněn strojní mikroplazmový hořák a přesunut na místo, kde se pohyboval po dráze od něj vyžadované. Dále byla nastavena vzdálenost konce hubice hořáku od plechu na 1 mm nebo 3 mm. Na panelu WELDYCAR traktoru byla zadána rychlost a směr pohybu. Poté se nastavily parametry měření také na panelu zdroje. Zde se zadávala velikost proudu, průtok ochranného plynu a průtok plazmového plynu po otevření lahví s plyny. Plyn pro ochranu kořene svaru byl přiváděn externím přívodem do lišty. Svařování se ovládalo nožním

pedálem, který při stlačení započal svařování a při povolení ukončil proces. Jednotlivé kroky se po přenastavení výše uvedených hodnot opakovaly. Jednotlivé varianty nastavení parametrů můžeme vidět v Tab. 4.3.

Tab. 4.3 Parametry použité při svařování

č. m.	I (A)	vzd. (mm)	v (cm/min ⁻¹)	typ OP	průtok OP (l.min ⁻¹)	typ PP	průtok PP (l.min ⁻¹)
1	30	3	30	Ar	4	Ar	0,25
2	30	3	50	Ar	4	Ar	0,25
3	30	3	70	Ar	4	Ar	0,25
4	50	3	30	Ar	4	Ar	0,25
5	50	3	50	Ar	4	Ar	0,25
6	50	3	70	Ar	4	Ar	0,25
7	50	3	50	Ar	5	Ar	0,4
8	50	3	50	Ar	5	Ar	0,6
9	50	1	50	Ar	5	Ar	0,4
10	50	1	70	Ar	5	Ar	0,4
11	50	1	50	Ar	5	Ar	0,4
12	50	3	50	Ar	5	Ar	0,4
13	50	3	70	Ar	5	Ar	0,6
14	50	1	70	Ar	5	Ar	0,6
15	50	1	70	Ar	5	Ar	0,5
16	50	1	70	Ar	5	Ar + 2% H2	0,5
17	50	1	70	Ar	5	Ar + 2% H2	0,4
18	50	3	70	Ar	5	Ar + 2% H2	0,4
19	50	3	70	Ar + 2% H2	5	Ar	0,4
20	50	1	70	Ar + 2% H2	5	Ar	0,4
21	50	1	70	Ar + 6% H2	5	Ar	0,4
22	50	3	70	Ar + 6% H2	5	Ar	0,4
23	50	1	70	Ar	5	Ar + 6% H2	0,4
24	50	3	70	Ar	5	Ar + 6% H2	0,4

č. m. - číslo měření, I (A) – proud, vzd.(mm) - vzdálenost hořáku od svařovaného plechu, v (cm/min) - rychlost svařování, OP - ochranný plyn, PP - plazmový plyn

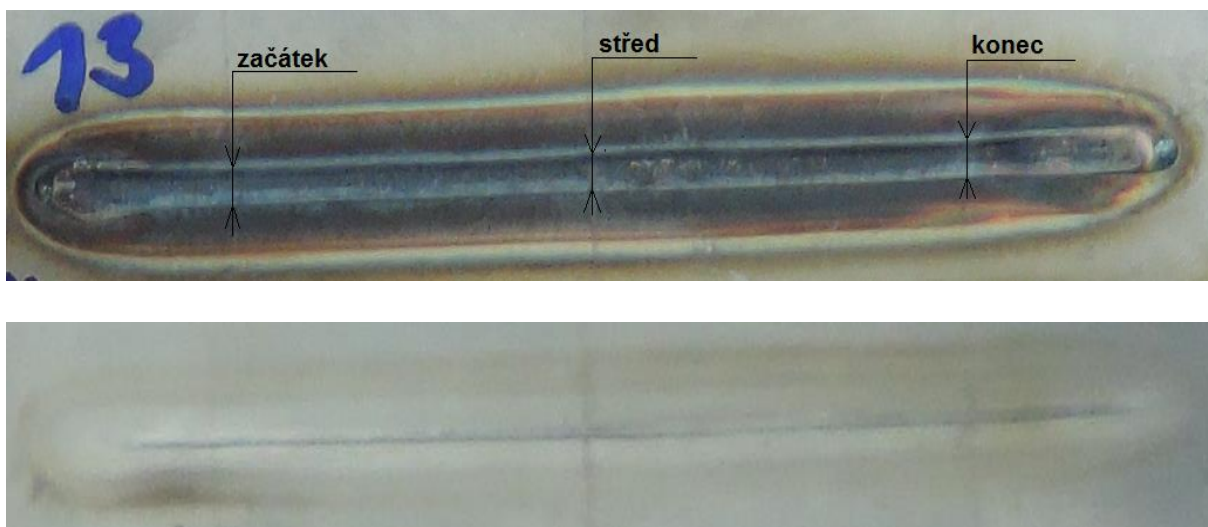
Do předem připravené tabulky se zapisovaly právě naměřené hodnoty, které se po skončení samotného měření ještě dále zpracovávaly.



Obr. 4.5 Poloha hořáku při svařování

4.5 Vyhodnocení

Bylo nutné odměřit ukazatele kvality svaru, kterými byla šířka svaru v lící vrstvě, šířka svaru v kořeni, stav kořene a výskyt vad ve svaru. Šířka svaru v lící i kořenové vrstvě byla měřena na třech místech - začátek, střed a konec svaru, a to za pomoci digitálního posuvného měřítka (viz. Obr. 4.6). Pro zbylé dva parametry hodnocení postačila vizuální kontrola.



Obr. 4.6 Šířky svarové housenky

Pro konečné hodnocení bylo využito pouze některých naměřených hodnot, které jsou od zbytku barevně označeny v Tab. 4.4. Zvolené hodnoty mají konstantní maximální rychlost svařování nastavitelnou na svařovacím traktoru WELDYCAR a maximální proud, kterého bylo možno dosáhnout použitím mikroplazmového zdroje MICROPLASMA 50. Konstanty proud a rychlost svařování byly vybrány z důvodu důrazu, který se v dnešní době klade na produktivitu práce. Bylo tedy zkoumáno, zdali lze při takto nastavených parametrech docílit kvalitního svaru včetně požadovaných parametrů. Zároveň byl sledován vliv kořenové ochrany svaru, který byl zajištěn čistým argonem.

4.5.1 Naměřené hodnoty

V Tab. 4.4 můžeme vidět naměřené hodnoty a na obr. 4.7 barevně zvýrazněné pokusy.



Obr. 4.7 Svarové (návarové) housenky

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty

č. m.	I	vzd.	v	typ OP	přítok OP	typ PP	přítok PP	KO	šířka svaru v krycí vrstvě			šířka svaru v kořenové vrstvě			stav kořene	Tepelný příkon q (J/mm)
									začátek	střed	konec	začátek	střed	konec		
1	30	3	30	Ar	4	Ar	0,25		2	1,8	2	0,7	0,3	0,3	zoxidovaný, nepravdělná šířka svaru	156
2	30	3	50	Ar	4	Ar	0,25		není nataveno			není nataveno			94	
3	30	3	70	Ar	4	Ar	0,25		není nataveno			není nataveno			67	
4	50	3	30	Ar	4	Ar	0,25		3,1	3,4	3,7	2,5	2,9	2,9	zoxidovaný, nerovná šířka i tvar svaru	260
5	50	3	50	Ar	4	Ar	0,25		1,6	1,6	1,6	není nataveno			156	
6	50	3	70	Ar	4	Ar	0,25		není nataveno			není nataveno			111	
7	50	3	50	Ar	5	Ar	0,4		2	2	2	1,9	0,9	0,6	zoxidovaný, pravidelný	156
8	50	3	50	Ar	5	Ar	0,6		díra	3,2	díra	díra	2,7	díra	zoxidovaný, nepravidelný tvar s patrnými dírami	156
9	50	1	50	Ar	5	Ar	0,4		3,2	2,8	2,8	2,7	1,9	1,9	míná oxidace, pravidelný	156
10	50	1	70	Ar	5	Ar	0,4		1,6	1,6	1,6	0,2	0,2	0,2	míná oxidace, pravidelný	111
11	50	1	50	Ar	5	Ar	0,4	Ar	2,8	2,6	2,6	1,5	1,5	1,5	bez oxidace, pravidelný	156
12	50	3	50	Ar	5	Ar	0,4	Ar	2,4	2,4	2,2	1,1	1,1	1	bez oxidace, pravidelný	156
13	50	3	70	Ar	5	Ar	0,6	Ar	1,3	1,3	1,3	0,3	0,3	0,3	bez oxidace, pravidelný	111
14	50	1	70	Ar	5	Ar	0,6	Ar	1,3	díra	1,3	0,5	díra	0,5	bez oxidace, nepravidelný tvar s patrnými dírami	111
15	50	1	70	Ar	5	Ar	0,5	Ar	1,5	1,5	1,5	0,4	0,4	0,4	bez oxidace, pravidelný	111
16	50	1	70	Ar	5	Ar + 2% H2	0,5	Ar	díra	1,8	1,8	díra	0,5	0,5	bez oxidace, z počátku nepravidelný s dírou, dále pravidelný	111
17	50	1	70	Ar	5	Ar + 2% H2	0,4	Ar	2,2	2,1	1,8	0,5	0,5	0,3	bez oxidace, pravidelný	111
18	50	3	70	Ar	5	Ar + 2% H2	0,4	Ar	1,5	1,5	1,5	není nataveno			111	
19	50	3	70	Ar + 2% H2	5	Ar	0,4	Ar	1,8	1,8	1,8	0,6	0,6	0,6	bez oxidace, pravidelný	111
20	50	1	70	Ar + 2% H2	5	Ar	0,4	Ar	1,8	1,8	1,8	0,5	0,5	0,5	bez oxidace, pravidelný	111
21	50	1	70	Ar + 6% H2	5	Ar	0,4	Ar	3	2,8	2,8	1,5	1,5	1,5	bez oxidace, pravidelný	111
22	50	3	70	Ar + 6% H2	5	Ar	0,4	Ar	2,3	2,3	2,3	0,9	0,9	0,9	bez oxidace, pravidelný	111
23	50	1	70	Ar	5	Ar + 6% H2	0,4	Ar	2,7	2,7	2,7	1,3	1,3	1,3	bez oxidace, pravidelný	111
24	50	3	70	Ar	5	Ar + 6% H2	0,4	Ar	1,8	1,8	1,8	0,1	0,1	0,1	bez oxidace, pravidelný	111

V experimentu bylo provedeno 24 svarů, přičemž každý vyhotovený svar byl svařen při jiných parametrech nastavení. Průtok plazmového plynu se ukázal jako zásadní pro zhotovení pravidelného a kvalitního svaru. Průtok plazmového plynu $0,25 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, použitý v prvních pokusech (1-6), byl nedostatečný. Plech v těchto případech nebyl vůbec nataven, nebo vznikl nepravidelný svar. Po provedení několika svarů vzešla jako optimální volba pro pravidelnost svaru hodnota průtoku plazmového plynu $0,4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Rozdíl je vidět i v šířkách měřených vrstev, kde se po zařazení směsi obsahující vodík, zvětšily šířky jednotlivých vrstev. To bylo zapříčiněno větší tepelnou vodivostí směsí Ar + H₂ oproti čistému argonu, a tedy větším teplem přivedeným do svaru. Další parametr, který výrazně ovlivnil výslednou kvalitu svaru, byla nastavovaná vzdálenost. Vzdálenost hořáku, která byla 1 mm od svařovaného plechu, se ukázala být vhodnější nežli vzdálenost 3 mm. V případech, kdy byly nastaveny parametry $I = 50 \text{ A}$ a $v = 70 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, zajistila lepší průvar a formování kořene. Nízký proud (30 A), používaný v prvních měřeních společně s již zmíněným malým průtokem, neměl dobrý vliv na výsledný svar, a i z tohoto důvodu byl navýšen na 50 A. Rychlost svařování dle předpokladu výrazně ovlivnila výsledný svar. V měřeních 9 a 10 si můžeme povšimnout, jak pouhou změnou rychlosti došlo k proměně výsledného svaru. Nižší rychlost svařování zásadně zvýšila šířku kořenové vrstvy a zlepšila průvar.

U pokusů, které jsou v Tab. 4.4 barevně označeny, a které probíhaly za konstantní rychlosti svařování a konstantního proudu, je na kořeni svarů jasně zřetelný posun. Příčinou je použití kořenové ochrany, která se v podobě podložky, do které byl přiváděn čistý argon, ukázala jako dostatečná.

5. Závěr

Byla zpracována rešerše, která popisuje technologii plazmového svařování. V rešerši byl podrobně zpracován princip plazmového svařování, používané plyny, zapojení hořáků a příprava svarových ploch. Dále zde byla rozpracována problematika korozivzdorných ocelí a jejich svařitelnost.

V praktické části se vykonala řada experimentů, při kterých byly zvoleny parametry proud a svařovací rychlost jako konstanty. Konstanty nabývaly maximálních hodnot, které bylo možné na použitých zařízeních nastavit. Z experimentální činnosti vyplynulo, že nejlepšího svaru za takto stanovených podmínek se docílilo v měřeních číslo 17 (i přes zúžení na konci svaru, zapříčiněné mírným zvlněním plechu při upínání), 21 a 23. Bylo v nich dosaženo nejlepšího průvaru i s přihlédnutím k šířce lícní a kořenové vrstvy. Kořen byl dobře formován a byl dle počátečních požadavků (předpokladů) bez oxidace. Na svarech se dále nevyskytovali žádné viditelné vady. Svary dosahovaly nízkého převýšení a tím i snížení nákladů na jejich případné opracování. Z těchto pokusů se také zdá být vhodné volit směsi Ar + H₂ jako plazmový plyn a čistý Ar spíše jako ochranný plyn. Stejně tak pro lepší průvar v kořenové vrstvě volit vzdálenost 1 mm hořáku od svařovaného materiálu.

Seznam použitých zdrojů:

- [1.] SCHLIXBIER, Michal. *Trendy vývoje svařování plazmou* [online]. konstrukce, 2005 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/trendy-vyvoje-svarovani-plazmou/>
- [2.] SCHWARZ, Drahomír; HLAVATÝ, Ivo. *Svařování plazmovým obloukem* [online]. Svět svaru, 2014 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/05/2014-1_SvarovaniPlasmou.pdf
- [3.] Pierre-Jean Cunat; Joinville-le-Pont. *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. Praha: Euro Inox, 2007 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf
- [4.] Homen.vsb.cz [online]. 2009 [cit. 2017-03-06]. Homen. Dostupné z: WWW: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-01-15.pdf>
- [5.] WU, CS. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2014, **16**(1), 74 [cit. 2017-03-06]. ISSN 15266125. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S152661251300073X>
- [6.] Schinkmann.cz *Svařování plazmou* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/svarovani-plazmou?popup=0>
- [7.] Plasma welding. In: *Westermans* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.westermans.com/plasmawelding.aspx>
- [8.] Micro-plasma welding. In: *MTU aero Engines* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.mtu.de/technologies/repair-techniques/joining-processes/micro-plasma-welding/>
- [9.] Plasma: The Fourth State of Matter. In: *Fabricating and metalworking* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/02/plasma-the-fourth-state-of-matter/>

- [10.] MIGA 5220 – automat pro podélné svařování trubek. In: *Automig* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://automig.cz/svarovani-v-praxi/novinky/miga-5220-automat-pro-podelne-svarovani-trubek/>
- [11.] MRŇA, Libor. *Dělení a svařování svazkem paprsku* [online]. Brno: VUT Brno, Technologie svařování a povrchových úprav [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__deleni_a_svarovani_plasmou_2013__mrna.pdf
- [12.] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [13.] KOVAŘÍK, Rudolf. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 978-80-7082-697-3.
- [14.] ZÁŠKODA, David. *PARAMETRICKÉ ZKOUŠKY PLAZMOVÉHO SVAŘOVÁNÍ KOŘENE SVARU*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce ING. JAROSLAV KUBÍČEK.
- [15.] CHUDÍK, Ivan. *Výběr ochranných plynů pro obloukové svařování* [online]. Konstrukce, 2008 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vyber-ochrannych-plynu-pro-obloukove-svarovani/>
- [16.] *Air Products. Plazma a technické plyn* [online]. Svět svaru [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: http://www.haasmont.cz/files/PlasmaTP_2006.pdf
- [17.] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1980.
- [18.] *Plazmové svařovací hořáky* [online]. 1. Mundersbach- Germany: EWM hightec welding, 2005, s. 42 [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <https://www.ewm-sales.com/upload/099-008231-EWM01.pdf>
- [19.] DUNOVSKÝ, Jiří. *Speciální technologie*. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1984.

- [20.] VEVERKA, Jan. *Svařování mikroplasmou* [online]. OMNITECH spol. s r.o. [cit.2017-03-07]. Dostupné z:
http://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_mikroplasmou.html
- [21.] BEDNÁŘ, Šimon. *VYUŽITÍ PLAZMOVÉHO OBLOUKU V TECHNICKÉ PRAXI*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Doc. Ing. LADISLAV DANEK, CSc.
- [22.] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II: Část svařování* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-03-08]. 68 s. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
- [23.] MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. 2., aktualiz. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 1998. ISBN 80-7183-285-5.
- [24.] HALLA, Petr. *Svařování slabých plechů* [online]. Konstrukce, 2014 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-slabych-plechu/>
- [25.] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [26.] *Řez ternárním rovnovážným diagramem Fe-Cr-Ni* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/262617332_fig2_Figura-4-Diagrama-pseudobinario-de-liga-Fe-Cr-Ni-com-teor-de-Fe-fi-xado-em-70-Lippold
- [27.] *The Schaeffler and Delong diagrams for predicting ferrite levels in austenitic stainless steel welds* [online]. BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION [cit. 2017-04-26]. Dostupné z:
<http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>
- [28.] MACHÁČEK, Josef. *Materiály a jejich charakteristiky* [<http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/Nerez-2.pdf>]. Praha [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/Nerez-2.pdf>. ČVUT v Praze – Fakulta stavební.
- [29.] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu*. 2. Praha: Academia, 1975. 542 s.
- [30.] *Korozivzdorné oceli - vlastnosti* [online]. 1. Lucembursko: Euro Inox, 2002 [cit. 2017-07-04]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z:
http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicacione-s-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf

- [31.] RYTÍŘOVÁ, Marie. "svařovací materiály [online]. 2005, , 62 [cit. 2017-07-04]. Dostupné z:
http://www.hkprerov.cz/upload/image/ablona_materi%C3%A1ly_pro_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_pro_hk.pdf
- [32.] MICROPLASMA 50 [online]. EWM HIGHTEC WELDING [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: https://www.ewm-group.com/cs/ewmprodukte/geraete/plasma/microplasma.html?page=shop.product_details&flypage=ewm_flypage.tpl&product_id=33&category_id=39
- [33.] NEREZOVÁ OCEL 1.4301. INOX, spol. s.r.o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL [online]. , 1 [cit. 2017-06-25]. Dostupné z:
<http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Schéma plazmového svařování.....	9
Obr. 2.2 Porovnání metod TIG a PAW.....	10
Obr. 2.3 Příklady svařování plazmou.....	11
Obr. 2.4 Čtyři skupenství hmoty.....	12
Obr. 2.5 Schéma procesů Ionizace a Disociace.....	13
Obr. 2.6 Rozložení teplot v argon-vodíkovém plazmatu.....	15
Obr. 2.7 Příklad konstrukce hořáku.....	17
Obr. 2.8 Princip hořáku se schématem zapojení.....	18
Obr. 2.9 Svařování klíčovou dírkou.....	21
Obr. 2.10 Úpravy svarových ploch pro plazmové a mikroplazmové svařování vysokolegovaných Cr-Ni ocelí.....	23
Obr. 3.1 Řez ternárním rovnovážným diagramem Fe-Cr-Ni.....	24
Obr. 3.2 Schäfferův-Delongův diagram.....	25
Obr. 3.3 Přehled typických struktur.....	26
Obr. 4.1 Pracoviště experimentu.....	32
Obr. 4.2 Zdroj MICROPLASMA 50.....	33
Obr. 4.3 Ovládací panel MICROPLASMA 50.....	34
Obr. 4.4 Upínací přípravek.....	35
Obr. 4.5 Poloha hořáku při svařování.....	38
Obr. 4.6 Šířky svarové housenky.....	38
Obr. 4.7 Svarové (návarové) housenky.....	39

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Přehled používaných plazmových plynů a jejich vlastností.....	14
Tab. 2.2 Doporučené parametry svařování v závislosti na použité metodě....	19
Tab. 3.1 Porovnání vlastností korozivzdorných ocelí.....	26
Tab. 3.2 Chemické složení vybraných korozivzdorných ocelí v hm. %.....	29
Tab. 4.1 Zatížení pro plazmové trysky.....	35
Tab. 4.2 Přehled vlastností oceli X5CrNi 18-10 (1.4301).....	36
Tab. 4.3 Parametry použité při svařování.....	37
Tab. 4.4 Naměřené hodnoty.....	40