



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

SVAŘOVÁNÍ AUSTENITICKÝCH OCELÍ PLAZMATEM

PLASMA WELDING OF AUSTENITIC STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Štěpán KRISE

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel ROHAN, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krise** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **473554**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Svařování austenitických ocelí plazmatem

Název bakalářské práce anglicky:

Plasma welding of austenitic steel

Pokyny pro vypracování:

provedte literární rešerši způsobů svařování plechů metodami se zvýšenou hustotou energie - plazmatem, laserem, EB v porovnání se svařováním elektrickým obloukem v ochranných atmosférách
navrhněte experiment pro ověření svařovacích parametrů pro lineární svar austenitického plechu plazmatem
provedte ověření navržených hodnot pro svařování plazmatem
vyhodnoťte experiment

Seznam doporučené literatury:

TENDERO, Claire, Christelle TIXIER, Pascal TRISTANT, Jean DESMAISON a Philippe LEPRINCE. Atmospheric pressure plasmas: A review: A review. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2006
LIU, Zu Ming, ShuangLin CUI, Zhen LUO, ChangZhen ZHANG, ZhengMing WANG a YuChen ZHANG. Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. Journal of Manufacturing Processes. 2016
PRASAD, K. Siva, Ch. Srinivasa RAO a D. Nageswara RAO. Application of design of experiments to plasma Arc Welding Process: a review: a review. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. sciELO, 2012,
MESSLER JR., Robert W. Chapter 6 - Welding as a Joining Process. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2004, s. 285-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-075067757-8/50006-3>. ISBN 9780750677578.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Rohan, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Rohana, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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 (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu práce panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., IWE za vedení práce, pomoc při experimentu a cenné rady při psaní práce.

Dále děkuji společnosti Migatronic CZ a.s. za zapůjčení techniky a proškolení a společnosti PFT s.r.o. za podnět k realizaci práce a poskytnutí materiálu na vzorky.

V neposlední řadě děkuji paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za provedení metalografie.

Na závěr děkuji své mamince Ing. Daně Kriseové za korekturu práce.

Anotace

Bakalářská práce zpracovává problematiku plazmového svařování korozivzdorných austenitických ocelí.

Cílem této práce je teoretický popis metod svařování s vysokou hustotou energie se zaměřením na plazmové svařování metodou klíčové dírky. Experimentální část práce je věnována svařování korozivzdorných ocelových plechů o tloušťkách 3, 4 a 5 mm z materiálu AISI 304 lineárním tupým svarem pomocí metody průchozího paprsku. Vyhodnocení experimentu se zaměřuje na posouzení vlivu svařovacích parametrů na tvorbu kořene a na celkovou geometrii svaru.

Název diplomové práce:	SWAŘOVÁNÍ AUSTENITICKÝCH OCELÍ PLAZMATEM
Autor práce:	Štěpán Krise
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Rohan, Ph.D., IWE
Konzultant:	Ing. Karel KOVANDA, Ph.D., IWE
Akademický rok:	2020/2021
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	53 stránek, 11 tabulek, 21 obrázků
Klíčová slova:	Plazmové svařování, Plazma, PAW, Metoda klíčové dírky, Svařování průchozím paprskem, Korozivzdorné austenitické oceli, Svařování s vysokou hustotou energie

Annotation

The Bachelor's thesis deals with the issues related to plasma arc welding of stainless austenitic steels.

The aim of this work is a theoretical description of high energy density welding methods with a focus on plasma welding using the keyhole method. The experimental part of the work is focused on welding of austenitic steel sheets with thicknesses of 3, 4 and 5 mm from the material AISI 304 by linear butt weld using the keyhole method. The evaluation of the experiment focuses on the assessment of the influence of welding parameters on the formation of the root and the overall geometry of the weld.

Title of the final thesis: PLASMA WELDING OF AUSTENITIC STEEL

Author: Štěpán Krise

Supervisor: Ing. Pavel Rohan, Ph.D., IWE

Consultant: Ing. Karel KOVANDA, Ph.D., IWE

Academic year: 2020/2021

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

Extent: 53 pages, 11 tables, 21 pictures

Keywords: Plasma welding, Plasma, PAW, Keyhole method, Keyhole welding, Stainless austenitic steel, High energy density welding

Seznam zkratk

zkratka	vysvětlení
LBW	Laser Beam Welding
EBW	Electron Beam Welding
PAW	Plasma Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
VPPAW	Variable Polarity Plasma Arc Welding
WFS	Wire Feed Speed

Seznam použité symboliky

symbol	[jednotka]	vysvětlení
Q	[kJ*mm ⁻¹]	specifické vnesené teplo
b	[mm]	šířka svarové housenky
b _k	[mm]	šířka kořene svaru
U _N	[V]	normalizované napětí
WFS	[m*min ⁻¹]	rychlost podávání přídatného drátu
v _s	[cm*min ⁻¹]	svařovací rychlost

Obsah

ÚVOD	11
1 Motivace a cíl práce.....	11
TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2 SVAŘOVÁNÍ	12
2.1 Laserové svařování.....	13
2.2 Svařování elektronovým paprskem.....	16
2.3 Plazmové svařování.....	17
2.3.1 Princip plazmového svařování.....	17
2.3.2 Popis zařízení a funkce hořáku.....	19
2.3.3 Porovnání s metodou TIG.....	20
2.3.4 Druhy plazmového svařování.....	21
2.3.5 Plyny pro plazmové svařování.....	22
2.3.6 Parametry svařování.....	22
3 KOROZIVZDORNÉ OCELI.....	25
3.1 Austenitické oceli.....	25
3.2 Svařitelnost austenitických ocelí.....	25
PRAKTICKÁ ČÁST.....	27
4 EXPERIMENT.....	27
4.1 Pracoviště a použité přístroje	27
4.2 Materiály.....	32
4.3 Metalografie.....	33
.....	34
4.4 Průběh experimentu	34
4.5 Výsledky a diskuse.....	37
4.5.1 Plechy o tloušťce 3 mm	37

4.5.2	Plechý o tloušťce 4 mm	40
4.5.3	Plechý o tloušťce 5 mm	43
	ZÁVĚR	47
5	Bibliografie.....	48
6	Seznam tabulek.....	52
7	Seznam obrázků.....	53

ÚVOD

1 Motivace a cíl práce

Technologie plazmového svařování je charakterizována širokým využitím a poměrně nízkými pořizovacími náklady v porovnání s ostatními metodami svařování s vysokou hustotou energie. V porovnání s metodou TIG nabízí vysokou produktivitu práce a zároveň vysokou kvalitu svaru. Hlavní motivací předkládané práce je teoretické i praktické seznámení s metodou svařování PAW a její praktické využití při svařování korozivzdorných austenitických plechů.

Práce byla vytvořena ve spolupráci se společností PFT, s.r.o., která se zabývá výrobou korozivzdorných součástí do kanalizací jako jsou vírové ventily a regulátory, česle, norné stěny apod. V současné době jsou armatury svařovány ručně technologií TIG z obou stran. Pro automatizaci a zefektivnění práce je zvažováno využití technologie PAW pro lineární svary norných stěn či za použití rotačního polohovadla i pro obvodové svary vírových ventilů a regulátorů. Při použití metody klíčové dírky, je předpoklad zvýšení efektivity výroby.

Cílem práce je zhotovit rešerši v oblasti svařování se zvýšenou hustotou energie (laserové svařování, svařování elektronovým paprskem a plazmové svařování) a zaměřit se blíže na metodu plazmového svařování. Část práce je věnována svařitelnosti korozivzdorných austenitických ocelí. Dalším bodem práce je návrh a ověření svařovacích parametrů pro tupý I svar plechů z korozivzdorné austenitické oceli o tloušťkách 3, 4 a 5 mm. Vzorky jsou hodnoceny metalograficky a vizuálně a získané poznatky jsou shrnuty v závěru práce.

TEORETICKÁ ČÁST

2 SVAŘOVÁNÍ

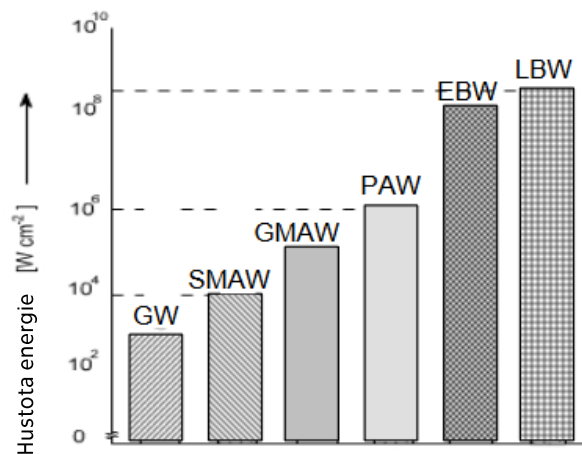
Svařování je dnes již široce rozšířená metoda nerozebíratelného spojení dvou dílů. První zmínky o svařování se datují do doby 3000 let před n.l., kdy lidé pájeli zlato, stříbro či měď. Následovalo spojování kujného železa svařováním v ohni od roku 1000 před n. l. Další vývoj svařování nastal až kolem roku 1900 n.l., kdy se začala používat technologie svařování plamenem (díky objevu acetylenu) a začátkem roku 1920 získává na významu elektrické ruční obloukové svařování a odporové svařování. Další vývoj už je velmi rychlý a postupem let se vyvinuly další metody jako například svařování pod tavidlem SAW (Submerged Arc Welding), metoda TIG (Tungsten Inert Gas), MIG (Metal Inert Gas), třecí svařování, ultrazvukové, plazmové a elektronovým paprskem, difuzní a svařování laserem. [1; 2]

Vývoj svařovacích metod neustále pokračuje a požadavky na nerozebíratelné spoje konvenčních a nekonvenčních materiálů vedou ke zvyšování výkonů a přesnosti, ke kombinaci různých technologií, a nakonec i výrazné automatizaci a robotizaci výroby. [2]

Svařování funguje na principu dodání dostatečného množství energie (tepla a tlaku) pro dosažení meziatomových vazeb dvou homogenních materiálů stejného či podobného složení. U kovových materiálů vzniká při svařování kovová vazba. Pro spojení materiálu jiného složení se nabízí technologie pájení či lepení. Zde však již nedochází k tvorbě meziatomových vazeb. [2]

Svařování se zvýšenou hustotou energie

Do této skupiny patří především plazmové (PAW – Plasma Arc Welding) a laserové (LBW – Laser Beam Welding) svařování a svařování elektronovým paprskem (EBW – Electron-Beam Welding). Jedná se o technologie s vysokou pořizovací cenou. Na rozdíl od klasických metod obloukového svařování jsou tyto technologie používané především na automatizovaných linkách. Výjimku tvoří například ruční plazmové svařování či ruční laserové svařování.



Obrázek 2.1 Srovnání svařovacích metod podle hustoty energie [3]

Zkratky zastupují svařování: GW-plamenové, SMAW-obalenou elektrodou, GMAW-v ochranné atmosféře, PAW-plazmové, EBW-elektronovým paprskem a LBW-laserové (Obrázek 2.1). Tyto metody se vyznačují především vysokou hustotou energie na dopadové ploše a vysokými teplotami. Díky tomu mají mnohé výhody oproti konvenčním způsobům svařování jako:

- minimálně tepelně ovlivněná oblast a pokles napětí a deformací
- vysoké svařové rychlosti
- nová konstrukční řešení
- možnost svařovat metodou klíčové dírky (svařování průchozím paprskem) a tudíž úspora či vynechání přídavného materiálu z procesu [2; 3]

2.1 Laserové svařování

Laserové svařování hraje důležitou roli v moderním průmyslu. Technologie laseru se nejprve v průmyslu využívala na řezání a až později na svařování, popřípadě povrchové kalení, navařování či gravírování. Další oblastí využití laseru v poslední době je kovový 3D tisk. Jelikož technologie laseru má velké zastoupení i v oblasti medicíny a dalších vědních oborů, pozornost bude věnována druhům laserů používaným ve strojním průmyslu při práci s kovy.

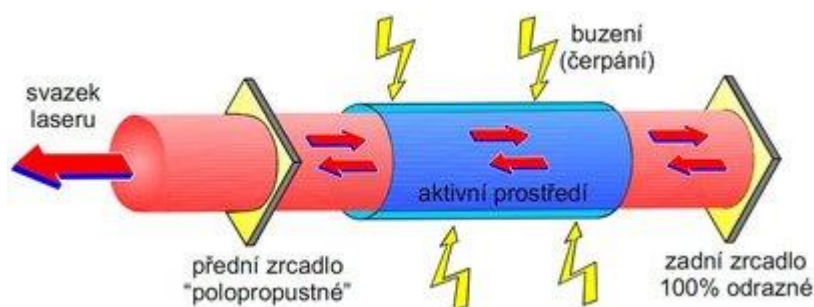
Historie a současnost

Princip laseru popsal už v roce 1917 Albert Einstein. Až později v roce 1960 byl zkonstruován první funkční laser s aktivním prostředím rubínu. V roce 1965 americká společnost Western Electric Company postavila první laserový systém, který měl za úkol vrtat

či řezat diamant. Následuje stroj na bázi CO₂ pro řezání ocelových plechů. Po vynalezení pevnolátkového Nd:YAG laseru se tato technologie začala uplatňovat i v oblasti svařování. Následuje vývoj diskových laserů (obdoba pevnolátkového), a nakonec v poslední době velmi využívané technologie vláknových a diodových laserů. [4; 5]

Princip laseru

Pro vytvoření laserového paprsku je potřeba dodání optického či elektrického buzení do aktivního prostředí (plynu či pevné látky). Díky tomuto buzení se elementy (atomy či molekuly) dostanou do vyšší energetické hladiny do tzv. excitovaného stavu. Při dosažení tzv. inverze populace (dostatečného množství elementů v excitovaném stavu) vzniká stimulovaná emise při níž foton s energií rovnou rozdílu energií dvou energetických hladin způsobí přechod elektronu z vyšší hladiny do nižší s uvolněním dalšího fotonu o stejné vlnové délce, směru, polarizaci a fázi (Obrázek 2.2).



Obrázek 2.2 Schéma laseru [6]

Díky rezonátoru se soustavou zrcadel dochází k lavinovému efektu a přes polopropustné zrcadlo odchází svazek fotonů v podobě laserového paprsku. Svazek laseru je kolimovaný (rovnoběžné dráhy fotonů), monochromatický (fotony mají stejnou vlnovou délku, resp. frekvenci) a koherentní (fotony jsou ve fázi časové i prostorové). Navíc paprsek tvořený fotony není ovlivnitelný rušivým elektromagnetickým zářením.

Paprsek fotonů po průchodu optickým aparátem a následnou fokusací do jednoho bodu naráží do materiálu a oblast dopadu zahřívá, taví a odpařuje. Díky vysoké hustotě energie a velmi malé ploše ohřevu (kolem 10^{-8} až 10^{-11} cm²) se tato technologie v průmyslu používá pro řezání, vrtání, svařování, navařování, gravírování a povrchové kalení. [6; 5; 2; 7]

Nejčastějšími lasery pro průmyslové využití jsou lasery plynové na bázi CO₂ a pevnolátkové Nd:YAG, polovodičové (diodové) a vláknové.

CO₂ lasery

Aktivní médium je zastoupeno směsí plynů hélia, dusíku a CO₂ v poměru: CO₂ : N₂ : He = 1 : 2 : 8. Při tomto poměru se dosahuje nejvyšších výkonů. CO₂ lasery produkují světlo o vlnové délce 10,6 μm, což znemožňuje přenos paprsku pomocí optických vláken. Tuto vlnovou délku některé materiály špatně absorbují a velká část záření se odráží. Tato metoda je tedy vhodná pro 2D aplikace jako řezání či jednodušší svary jen pro omezené spektrum materiálů. Avšak díky vysokým výkonům je tato metoda aplikovatelná při svařování tloušťek až do 26 mm. [2; 7; 6; 1]

Pevnolátkové Nd:YAG lasery

Používají jako aktivní prostředí monokrystal yttrium aluminium granátu dopovaného atomy neodymu. Jejich světlo o vlnové délce 1,06 μm umožňuje přenos paprsku pomocí optických vláken. To umožňuje robotizaci a tvorbu složitějších svarů a řezů. Nevýhodou je malý výkon těchto laserů a možnost svařování jen do 6 mm tloušťky kovu. [7; 6]

Polovodičové (diodové) lasery

Aktivním prostředím je elektricky čerpaná dioda. Hlavní výhodou je malá velikost přístroje, vysoká energetická účinnost a možnost použití optických vláken na přenos paprsku. Tato technologie je běžně používána například při čtení dat z CD. V poslední době probíhá intenzivní vývoj této technologie a díky vyšším výkonům je tato technologie používána i při svařování kovů. [8; 7]

Vláknové lasery

Jde o speciální typ pevnolátkových laserů. Aktivním prostředím je optické vlákno dopováno atomy vzácných kovů nejčastěji erbia (Er) nebo yterbia (Yr). Výhodou je robustnost přístroje díky absenci opto-mechanických prvků (zrcadel apod.). V současnosti jde o nejmodernější technologii v oblasti laserového svařování a řezání. [6]

Dále je můžeme rozdělit podle typu výstupního svazku na kontinuální (řezání a kalení) a pulzní (svařování, značení a gravírování). Pulsní se ještě dělí podle typu pulzu. Q – spínání, které generuje pulz v řádu nanosekund (značení a gravírování) a pulzní buzení, kde dostáváme pulz v řádu milisekund (svařování). [6; 5]

Pro ochranu optické soustavy, svarové lázně a odvětrání nežádoucích plazmových výparů ze svaru se používají ochranné plyny (hélium, argon, CO₂ a jejich kombinace). Použití přídavného materiálu do svaru je možné ale značně omezuje hloubku průvaru. Existuje také kombinace laserového svařování s technologií MIG/MAG či s plazmovým svařováním. [9; 7]

2.2 Svařování elektronovým paprskem

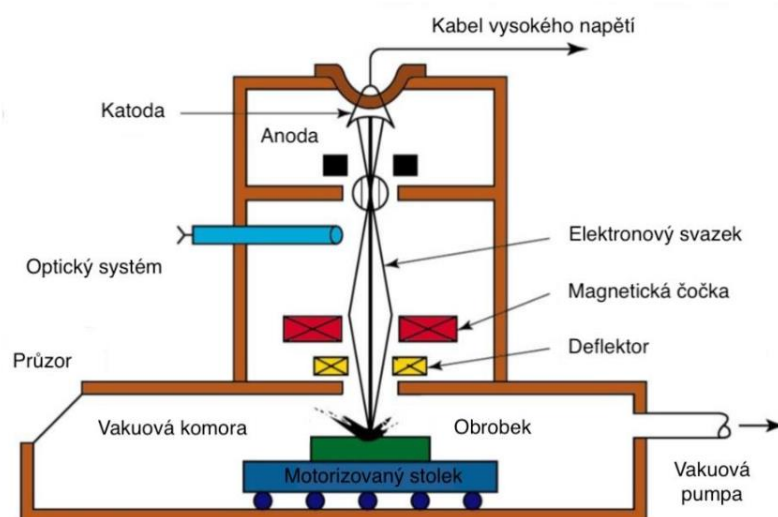
Technologie EBW se uplatňuje hlavně ve speciálních aplikacích. Jde o velmi nákladnou technologii s vynikajícími vlastnostmi. Jelikož se tato technologie používá i v jiných odvětvích jako například elektronová mikroskopie apod., pozornost bude zaměřena na přístroje používané v průmyslu na sváření a jiné úpravy kovů.

Historie a současnost

Zkoumání elektronového paprsku se datuje už do konce 19. stol. V druhé polovině 20. stol německý fyzik Dr. Karl-Heinz Steigerwald zkonstruoval první zařízení EBW a v roce 1958 poprvé svařil tupým svarem 5 mm tlustou slitinu zirkonia. Následuje prudký vývoj této technologie, který pokračuje dodnes. Naposledy se tato technologie uplatnila při vývoji kovového 3D tisku. [10; 11]

Princip elektronového paprsku

Z elektronového děla napájeného vysokým napětím (20–175 kV) a malým proudem (méně než 1 A) jsou vystřelovány elektrony pomocí žhavené nejčastěji wolframové katody. Anoda slouží jako urychlovač elektronů díky velkému potenciálovému rozdílu oproti katodě. Svazek elektronů je dále naváděn pomocí magnetických polí cívek. Magnetické cívky centrují, zaostřují a vychylují elektronový paprsek do místa svaru. Kvůli citlivosti elektronového paprsku na magnetické pole musí být svařovaný materiál demagnetizován, jinak by byl paprsek vychylován (Obrázek 2.3).



Obrázek 2.3 Schéma EBW zařízení [12]

Elektronový paprsek vyžaduje přítomnost vakua (10^{-3} - 10^{-5} atmosfér) v elektronovém dělu i v prostoru, kde se nachází svařenec. Elektrony by jinak interagovaly s molekulami

obsaženými ve vzduchu. Zároveň vakuová komora chrání obsluhu zařízení proti škodlivému rentgenovému záření vytvořenému sekundární emisí při dopadu elektronového paprsku na materiál. V neposlední řadě přítomnost vakua zajišťuje velmi dobrou ochranu svarové lázně, avšak znemožňuje přítomnost přídavného materiálu. Absence přídavného materiálu vyžaduje pečlivou přípravu svarových hran, aby nevznikl tzv. nedovařený svar.

Při dopadu elektronů na povrch svařovaného materiálu se kinetická energie elektronu mění na tepelnou energii a dochází k zahřívání, tavení a vypařování. Touto metodou lze svařovat až na výjimky všechny materiály a jejich kombinace včetně těch, které se nedají svařit konvenčními metodami. Hloubka penetrace kovových materiálu dosahuje až 250 mm. [7; 2; 13; 1]

2.3 Plazmové svařování

Plazmové svařování je moderní a vysoce produktivní metoda svařování se zvýšenou hustotou energie. Technologie PAW (Plasma Arc Welding) je dle normy ČSN EN ISO 9606-1 pro kvalifikaci svářečů v oblasti ocelí označená číslem 15. Jedná se v podstatě o modifikaci svařování wolframovou elektrodou v ochranném plynu – TIG. Rozdíl je však v konstrukci samotného hořáku a přítomnosti plazmového plynu. Výhodou oproti laseru a EB paprsku jsou nižší pořizovací náklady s ohledem na nižší svarové a materiálové požadavky. Zároveň ve srovnání s laserovým paprskem má plazmový oblouk nižší koncentraci energie, ale mnohonásobně vyšší energetickou účinnost a nižší celkové provozní náklady. Technologie plazmového oblouku se využívá i při řezání, povrchovém kalení, navařování a s ním spojené nově se rozvíjející technologii kovového 3D tisku. [2; 14; 15]

Historie a současnost

Plazmové svařování bylo objeveno v roce 1953 a za jeho zrodem stál Robert F. Gage, který si ho roku 1957 nechal patentovat. Následně se tato technologie začala rychle rozvíjet. Například v 70. letech se objevuje metoda VPPAW (Variable Polarity Plasma Arc Welding) využívající střídavého proudu pro svařování hliníkových slitin. V současné době se vyvíjí modifikace plazmového svařování kombinací s jinými svařovacími metodami (MIG, laser), nové konstrukce plazmových hořáků, sledování a úprava svařovacích parametrů. [7; 14; 16]

2.3.1 Princip plazmového svařování

Plazma je čtvrté skupenství hmoty a tvoří více než 99 % vesmíru. Plazma je více či méně ionizovaný plyn a jako takový je z makroskopického hlediska elektricky neutrální.

Avšak díky přítomnosti volných nosičů energie je plazma schopno vést elektrickou energii. Plazma dělíme na studené a teplé plazma. U plazmového svařování používáme teplé plazma. [17]

V kapalinách a plynech se částice volně pohybují a při střetu částic dochází k pružným srážkám. Dodáním energie se tyto srážky stávají nepružnými a dochází k těmto procesům:

Disociace

Tento proces nastává při teplotách 4 000 až 10 000 K. Dochází ke srážkám molekul a následně k rozpadu molekuly. Dvouatomové molekuly plynů (kyslík, dusík, vodík) disociují na své dva atomy a spotřebují přitom určité množství tepla (Obrázek 2.4). [1; 7; 14]

Ionizace

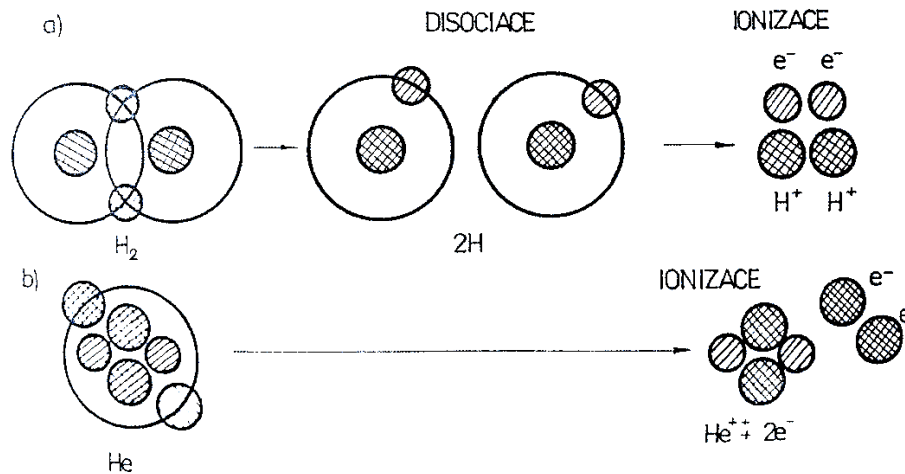
Při teplotách 8 000 až 30 000 K dojde k oddělení elektronu z atomu. Elektron je vymrštěn díky dodání dostatečného množství energie.

Je patrné, že atom se po rozpadu rozdělí na kladně nabitý iont a záporný volný elektron (Obrázek 2.4). Tomuto rozpadu se říká ionizace. Podle stupně ionizace může být plazma plně nebo částečně ionizováno.

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. [1; 7; 14]

Rekombinace

Rekombinace je proces, ke kterému dochází při styku plazmového plynu vycházejícího z plazmového hořáku ve formě paprsku s chladným materiálem nebo okolím. Za vzniku elektricky neutrálních atomů se spojí kladně a záporně nabitě částice a uvolní se teplo dodané při disociaci a ionizaci. Tento proces označujeme jako rekombinaci. Při tomto procesu se disociací a ionizací akumulované teplo uvolňuje a přenáší do základního materiálu. [1; 7; 14]



Obrázek 2.4 Štěpení plynů a) disociace, ionizace b) přímá ionizace [1]

Svarový paprsek je sloupec silně ionizovaného plynu, který je schopen vést elektrickou energii. Stupeň ionizace závisí na teplotě. Při ionizaci může dojít k odtržení více elektronů a mluvíme tedy o vícenásobné ionizaci. [1; 2]

2.3.2 Popis zařízení a funkce hořáku

Konstrukce plazmového hořáku – Obrázek 2.5 se skládá z wolframové elektrody, kterou obtéká plazmový plyn přiváděný vodou chlazenou kovovou tryskou. Tato tryska usměrňuje a ztenčuje plazmový paprsek. Plazmový plyn v těsné blízkosti stěny trysky ztrácí svou energii a tvoří obal méně ionizovaného plynu, který paprsek plazmatu ještě více ztenčuje a usměrňuje. Dynamická účinnost dopadajícího plazmatu na základní materiál spolu s vysokou teplotou umožňuje proniknutí paprsku v celém průřezu materiálu. Pro svařování je důležitá rovnováha tohoto dynamického účinku a povrchového napětí taveniny, aby nedošlo k profouknutí materiálu ze spáry. Mezi tryskou a keramickou hubicí proudí ochranný plyn, který chrání svarovou lázeň před oxidací.

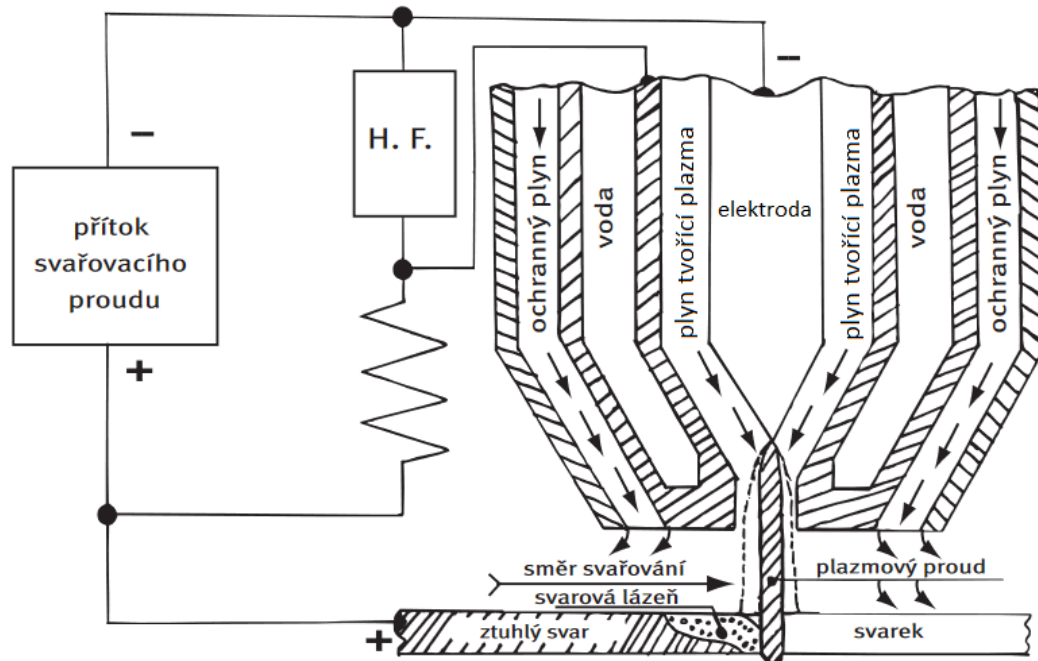
Mezi elektrodou a kovovou tryskou je připojen vysokofrekvenční ionizátor, který slouží pro zapálení pilotního oblouku. Výkon hořáku závisí na velikosti přiváděného proudu a napětí a na průtoku plazmového plynu. [2; 18; 14]

Podle způsobu zapojení se dělí plazmové hořáky do dvou skupin:

- Závislé zapojení (přenesený oblouk), u kterého je záporný pól připojen na elektrodu a kladný pól na základní materiál. Pro zapálení hlavního oblouku slouží pilotní (pomocný) oblouk, který vytvoří dostatečně vodivé prostředí i na relativně dlouhou

vzdálenost od materiálu. Tohoto zapojení se využívá především u svařování, navařování a řezání vodivých materiálů.

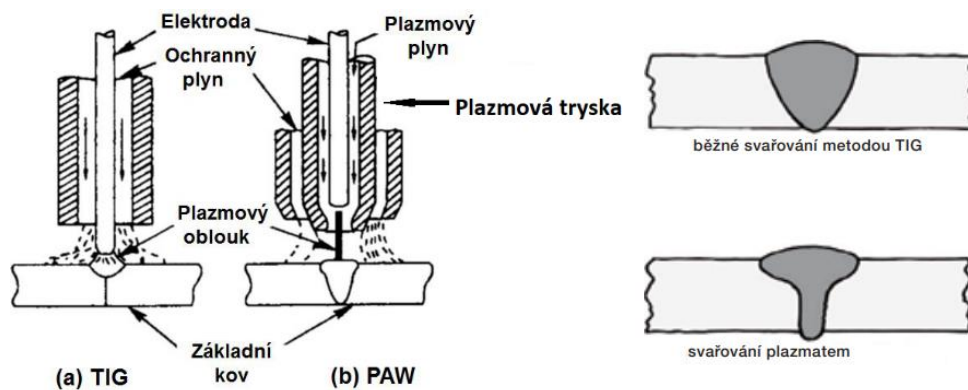
- Nezávislé zapojení (nepřenesený oblouk) využívá spojení elektrického obvodu mezi elektrodou (katodou, - pól) a tryskou plazmového hořáku (anodou, + pól). Plazmový paprsek je tedy zcela nezávislý na materiálu a je vytlačován z trysky silou plazmového plynu. Díky této vlastnosti se toto zapojení používá pro žárové nástřiky a řezání nevodivých materiálů. U tohoto zapojení je kladen velký důraz na chlazení hořáku, z důvodu vysokého tepelného namáhání. Jako plazmový plyn se používá plyn inertní, pro zaručení dlouhé životnosti hořáku. [1; 2; 19]



Obrázek 2.5 Schéma plazmového hořáku [18]

2.3.3 Porovnání s metodou TIG

Již bylo řečeno výše, že se metoda PAW velmi podobá metodě TIG jinak označované jako GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) (Obrázku 2.6). PAW se od metody TIG liší přítomností plazmového plynu, jinou konstrukcí hořáku a jiným tvarem průřezu svaru. Při pohledu na průřez svarem PAW je vidět charakteristický trychtýřovitý tvar svaru. To je dáno užším paprskem a vyšší hustotou energie. Metoda PAW se také odlišuje menší citlivostí na délku oblouku. Při vzdálení se o 2-3 mm oblouk zůstává PAW stabilní z hlediska dodaného tepla, což je 10krát lepší než u metody TIG. S výjimkou hořčíkových slitin je plazmové svařování vhodné pro stejné materiály jako u metody TIG. [7; 20; 18]



Obrázek 2.6 Porovnání metod TIG a PAW [19]

Další výhodou plazmového svařování je zapuštění elektrody do dýzy, a tedy zamezení kontaminace elektrody základním materiálem. Toto zapuštění zamezí i kontaminaci svaru materiálem elektrody (kovové vměstky). Stabilita plazmového paprsku a vysoká hustota energie zajišťuje vysokou kvalitu svaru, bezpórovitost a bezrostříkovost.

Nevýhodou PAW oproti technologii TIG je však složitá konstrukce hořáku, nutné chlazení hořáku, výkonný zdroj, komplexní zařízení pro kontrolu svarových parametrů a s tím vším související vysoká pořizovací cena. Kvůli složitější konstrukci a přítomnosti chladicího ústrojí se plazmové svařování používá spíše pro automatizované procesy. [2; 16]

2.3.4 Druhy plazmového svařování

Plazmového svařování je rozděleno do tří základních kategorií podle tloušťky materiálu a svařovacího proudu: [1; 7; 18; 21]

- *Mikroplazmové svařování* (0,1-15 A) pro tloušťky $t = 0,1-1$ mm. Tato metoda využívá dobré stability plazmového paprsku i při nízkých proudech. U této metody je nutno zajistit odvod tepla a přesnou mezeru pomocí upínacích přípravků.
- *Středně plazmové svařování* (15-100 A) pro tloušťky $t = 1-3$ mm. V této oblasti svařovacích proudů se tato metoda nejvíce podobá klasické metodě TIG. Je vhodná pro ruční i automatizované svařování. Používá se v automobilovém průmyslu pro svařování tenkých plechů nebo v potravinářském průmyslu při svařování trubek.
- *Metoda klíčové dírky* (>100 A) pro tloušťky $t = 3-10$ mm. Této metodě se také říká svařování průchozím paprskem. Její název je odvozen od jevu „keyhole“ tedy klíčové dírky známém i u laserového a EBM svařování. Tato metoda umožňuje svařovat bez nutnosti úkosů. Nárůstem svařovacího proudu přes 100 A a prouděním plazmového

plynu se tvoří velmi výkonný plazmový paprsek, kterým se docílí plného průvaru ve svaru. Během svařování proniká postupně plazmový oblouk tloušťkou stěny kovu, při posuvu svařovací hubice dochází vlivem povrchového napětí ke slévání roztaveného kovu v místě za „klíčovou dírkou“ a dochází k tvorbě svaru.

2.3.5 Plyny pro plazmové svařování

U plazmového svařování se používají 2 typy plynů. Plazmový plyn pro vytvoření plazmového paprsku a ochranný plyn pro ochranu svaru před oxidací. Plyn se volí dle daného materiálu a způsobu svařování. Pro oba typy plynů lze volit stejnou směs či odlišnou směs.

Plazmový plyn

Používá se zejména čistý argon, směs argonu s vodíkem do výše 20 % a směs argonu s heliem. Nutná je čistota daných plynů, která ovlivňuje teplotu a stabilitu plazmového paprsku. Pro svařování austenitických korozivzdorných ocelí je vhodná směs obsahující vodík, který zvyšuje teplotu paprsku a tím zvyšuje účinnost procesu. Na druhou stranu směsi s vodíkem se nesmí používat při svařování ostatních druhů korozivzdorných ocelí (feritických, martenzitických a duplexních). U těchto ocelí se doporučuje přidání dusíku do směsi. [2; 14; 19]

Ochranný plyn

Ochranný plyn se volí podobně jako u metody TIG. Volba plynu záleží na základním materiálu. Lze volit čistý argon nebo jeho směsi. Vhodnost plynu pro určitý materiál je podobná jako u plazmového plynu. Pro nelegované oceli, nízkolegované oceli nejčastěji používá směs Ar + H₂. Je možné použít i směs Ar + CO₂ nebo Ar + O₂. Další ochranou směsi může být například Ar + N₂. [2; 14; 19]

2.3.6 Parametry svařování

Svařovací proud

Svařovací proud ovlivňuje vlastnosti svarů prostřednictvím výstupního tlaku plazmatu a teploty. Zvýšením proudu se svar rozšiřuje jak na povrchu, tak v oblasti kořene svaru. Jestliže je svařovací proud vzhledem k ostatním parametrům (rychlost svařování, tloušťka materiálu) příliš vysoký, způsobuje přílišnou penetraci materiálu a hrozí propálení svaru. Podobný účinek může mít i příliš nízká svařovací rychlost. Je třeba nastavit parametr tak, aby bylo dosaženo požadované kvality spoje. [22]

Pro dosažení dobré kvality spoje se využívá pulzního proudu. Principem pulzního svařování je periodické střídání vyšší (I_1) a nižší (I_2) hodnoty proudu. Je nutné nastavit dobu trvání pulzu t_1 a mezery mezi pulzy t_2 . Základní svařovací proud I_1 je nastaven svářečem na požadovanou hodnotu. Tento proud zajišťuje dobrý průvar. Velikost I_2 se většinou volí v procentech hlavního proudu I_1 . Proud I_2 zajistí ionizaci prostředí a tedy "podržení" hořícího oblouku, ale nestačí k vytvoření tavné lázně a materiál se ochladí. Výsledkem je menší tepelné ovlivnění základního materiálu. Správně nastavenými pulsy lze úspěšně ovlivňovat hloubku závaru i šířku svaru. [23]

Průtok plazmového plynu

Rychlost toku plazmového plynu souvisí s kinetickou energií oblouku a ovlivňuje hloubku penetrace. Úměrně s rostoucí tloušťkou materiálu nebo rychlostí svařování se zvyšuje i rychlost toku plazmového plynu. Rychlost toku plazmového plynu se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 3,5 l*min⁻¹ podle druhu a tloušťky materiálu. [22]

Svařovací rychlost

Svařovací rychlost určujeme obvykle v poměrně úzkém rozpětí. Rychlejší postup tavení a tuhnutí materiálu může mít za následek hrubší povrch svarové housenky. Na rychlosti svařování mohou také záviset některé nežádoucí důsledky, jako např. vnitřní prnutí ve svaru a jeho okolí, které někdy způsobí jeho narušení trhlinami. Obecnější definice „optimální“ rychlosti svařování pro rozmanitost podmínek není možná, ale musí se volit podle okolností, případ od případu. [22; 24]

Specifické vnesené teplo

Specifické vnesené teplo nebo také tepelný příkon Q je množství energie na jednotku délky. Je dáno vztahem:

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s}$$

Q specifické vnesené teplo [kJ·mm⁻¹]

η tepelná účinnost přenosu tepla [-]

Usvařovací napětí [V]

I svařovací proud [A]

v_s rychlost svařování [mm·s⁻¹]

Pro potřeby experimentu byl vztah upraven, protože se svařovalo pulzním proudem. Písmeno f zde značí frekvenci pulzů.

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot (I_1 \cdot t_1 + I_2 \cdot t_2) \cdot f}{10^3 \cdot v_s}$$

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2}$$

t₁doba trvání pulzu [s]

t₂..... doba trvání mezery mezi pulzy [s]

ffrekvence pulzů [Hz]

Účinnost svařovacího procesu je dána normou ČSN EN 1011-1. Pro plazmové svařování je hodnota 0,6 a je shodná s metodou TIG. [25; 26]

3 KOROZIVZDORNÉ OCELI

Korozivzdorné oceli jsou vysokolegované oceli, jejichž hlavní prvek je chrom. Tyto oceli mají schopnost pasivace, díky níž odolávají elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Lze se však setkat i se vznikem různých lokálních druhů koroze jako je štěrbinová, bodová či mezikrystalová koroze. Proto jsou tyto oceli legovány dalšími prvky jako například nikl nebo mangan. Tyto oceli se také vyznačují nízkým obsahem uhlíku nejčastěji nižší než 0,08 %. Použití těchto ocelí je široké. Chemický a potravinářský průmysl, stavebnictví či automobilový průmysl.

Rozlišujeme čtyři základní skupiny korozivzdorných ocelí podle jejich struktury dle normy EN 10088. Feritické, martenzitické, austenitické a austeniticko-feritické neboli duplexní. V práci byla použita austenitická korozivzdorná ocel, proto je další pozornost věnována těmto druhům ocelí. [27; 18; 28]

3.1 Austenitické oceli

Nejvýznamnější skupina korozivzdorných ocelí. Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi, dobrou zpracovatelností a vysokou korozní odolností. Tyto oceli jsou dobře tvářitelné, přesto houževnaté a mají vysokou tažnost. V žíhaném stavu jsou tyto oceli nemagnetické a nejsou kalitelné. Obsah legujících prvků je nejčastěji 16,5 % až 20 % Cr a 8 % až 11 % Ni. Obsah uhlíku je nejčastěji méně než 0,03 %. U austenitických ocelí s vyšším obsahem uhlíku je nutno provádět rozpouštěcí žíhání pro zamezení mezikrystalové koroze. [18; 27; 28]

Chrom zajišťuje pasivaci a odolnost proti oxidaci a nikl stabilizuje austenit za normální teploty a zvyšuje korozní odolnost. Pasivace je zajištěna již při 13 % chromu ve slitině. Dalším významným prvkem je mangan, což je austenitotvorný prvek a při vyšších koncentracích snižuje praskání svarů. Molybden zvyšuje žárupevnost a společně s dusíkem zvyšuje odolnost proti bodové a štěrbinové korozi. Křemík odstraňuje náchylnost k mezikrystalové korozi, avšak vyvolává praskavost svarů. [27; 29]

3.2 Svařitelnost austenitických ocelí

Austenitické oceli mají vyšší tepelnou roztažnost a nižší tepelnou vodivost než oceli feritické. To se při svařování projeví vznikem větších zbytkových pnutí a deformací ve svaru.

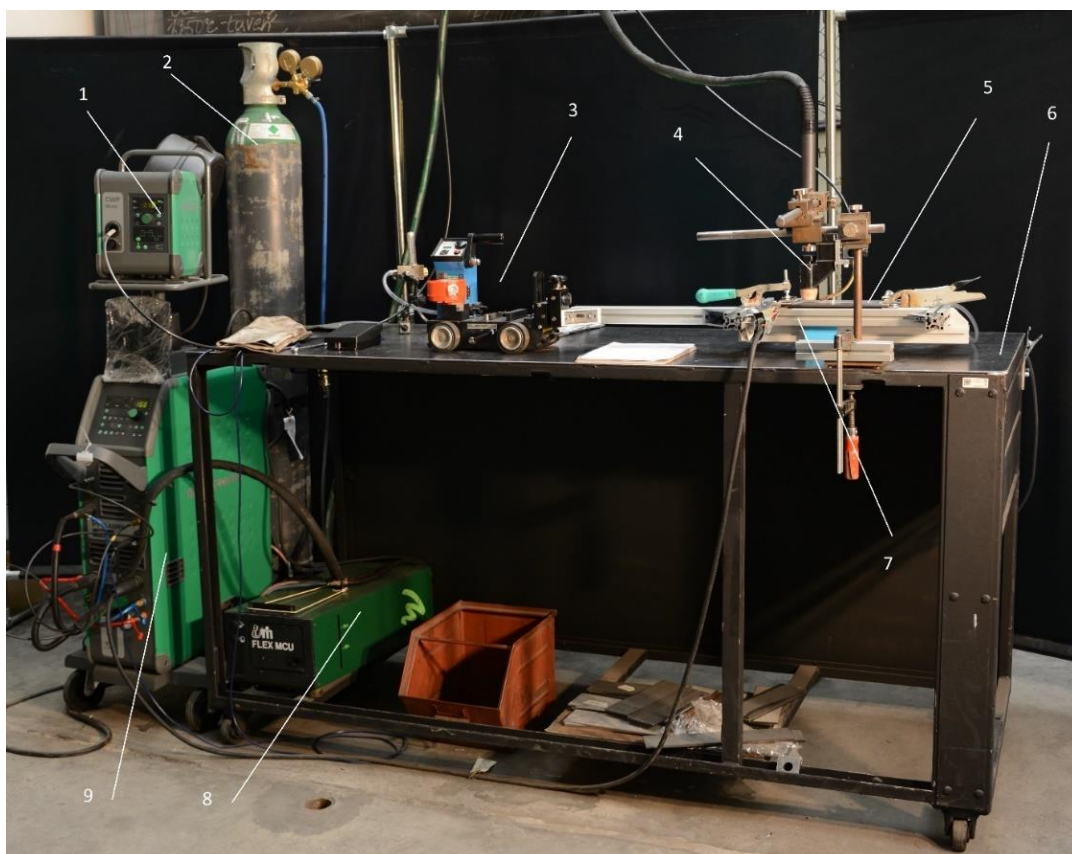
Tomuto jevu se dá zabránit například měděnými podložkami, které odvádějí teplo. Tyto oceli jsou náchylné na vznik tepelných trhlin a mezikrystalové koroze. Trhlinám za tepla se dá zamezit například snížením rychlosti svařování, použít nižší tepelný příkon nebo používat přídavné materiály s nízkým obsahem nečistot a zvýšeným obsahem manganu. Mezikrystalové korozi se zabráni použitím materiálu s obsahem uhlíku nižším, než je 0,03 hm. %, použitím přídavného materiálu s obsahem niobu či titanu nebo do procesu výroby zahrnout tepelné zpracování. Tepelné zpracování, konkrétně žíhání a následné prudké zchlazení zabráni hromadění chrómu na hranicích zrn. [28; 30]

PRAKTICKÁ ČÁST

4 EXPERIMENT

4.1 Pracoviště a použité přístroje

Experimentální pracoviště – Obrázek 4.1 bylo umístěno ve velké hale Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v jedné ze svářecích kójí.



Obrázek 4.1 Pracoviště: 1 - Podavač drátu, 2 - Tlaková láhev, 3 - Vozítko, 4 - Hořák, 5 - Vzorek, 6 - Stůl, 7 - Hliníková konstrukce, 8 - Chlazení, 9 - Svařovací invertor

Svařovací invertor

Svařovací invertor Pi 350 Plasma poskytla společnost Migatronik CZ a.s. [31]. Jedná se o vysoce výkonný svařovací invertor s vodním chlazením hořáku určený pro plazmové svařování v rozsahu 5 až 350 A všemi automatizovanými procesy – Tabulka 4.1. Lze jím svařovat nelegovanou ocel do 8 mm a korozivzdornou ocel do 10 mm. Je možné svařovat s pulzací i bez pulzace metodou PAW, TIG, popřípadě metodou MMA (obalenou elektrodou). Při plazmovém svařování umožňuje tři různé typy plazmového oblouku: tavný, tlakový nebo průvarový oblouk. Výhodou je také pilotní oblouk pro snadné a bezpečné zapálení oblouku.

ZDROJ PROUDU	PI 350 PLASMA
Napájecí napětí +/- 15 % [V]	3x400
Proudový rozsah pro plazmu [A]	5-350
Napětí naprázdno [V]	95
Zatěžovatel, 100 % při 40 °C [A/V]	350/39,0
Rozměry V x Š x D [mm]	980x545x1090
Hmotnost [kg]	85

Tabulka 4.1 Parametry svařovacího invertoru PI 350 PLASMA

Podavač drátu

Pro vzorky o tloušťkách 4 mm a 5 mm byl do svaru dodán přídatný materiál. Přívod drátu byl zajištěn podavačem studeného drátu CWF MULTI od společnosti Migatronik CZ a.s. [31]. Bylo možné nastavit synchronizaci pulzace proudu ze svařovacího invertoru a pulzace podávání drátu. V praxi to znamená, že při horním proudu se posune drát do lázně a při dolním proudu se drát zastaví. Tato funkce byla při experimentu použita. Bylo také nastaveno zpoždění podávání drátu shodné s dobou trvání horkého startu. V Tabulce 4.2 jsou vypsány parametry podavače. Průměr přídatného drátu byl 1 mm a podával se po směru jízdy hořáku, tedy v našem případě proti směru jízdy traktoru s upnutým vzorkem.

PODAVAČ DRÁTU	CWF MULTI
Rychlost podávání WFS [m/min]	0,2-5,0
Průměr drátu [mm]	0,6-2,4
Rozměry V x Š x D [mm]	276x211x276
Hmotnost [kg]	9,6

Tabulka 4.2 Parametry podavače drátu CWF MULTI

Chlazení

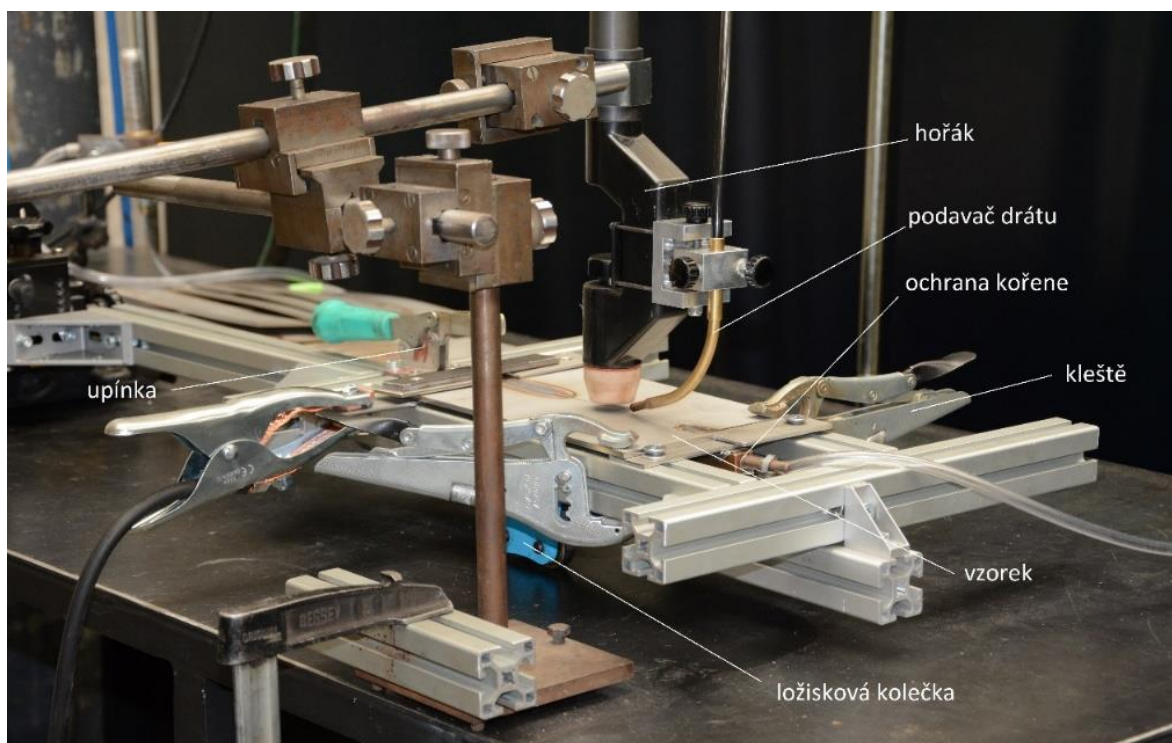
Vzhledem k vysokým teplotám při procesu plazmového svařování, musela být použita výkonná externí chladicí jednotka. Tato jednotka se používá při proudech nad 80 A [31]. Chlazení během svařování bylo zajištěno jednotkou FLEX MCU (Tabulka 4.3)

CHLADÍČÍ JEDNOTKA	FLEX MCU
Napájecí napětí	3 x 400 V +/-15 %
Chladicí výkon	850 W
Max. příkon naprázdno	5 W
Objem nádrže	4 l
Průtok při 1,2 bar/60 °C	1,75 l*min ⁻¹ .
Max. tlak	2,5 –3,0 bar
Norma	EN/IEC 60974–2
Třída ochrany	IP 23
Rozměry d x š x v, cm	70 x 30 x 22
Hmotnost, kg	16

Tabulka 4.3 Parametry chladicí jednotky FLEX MCU

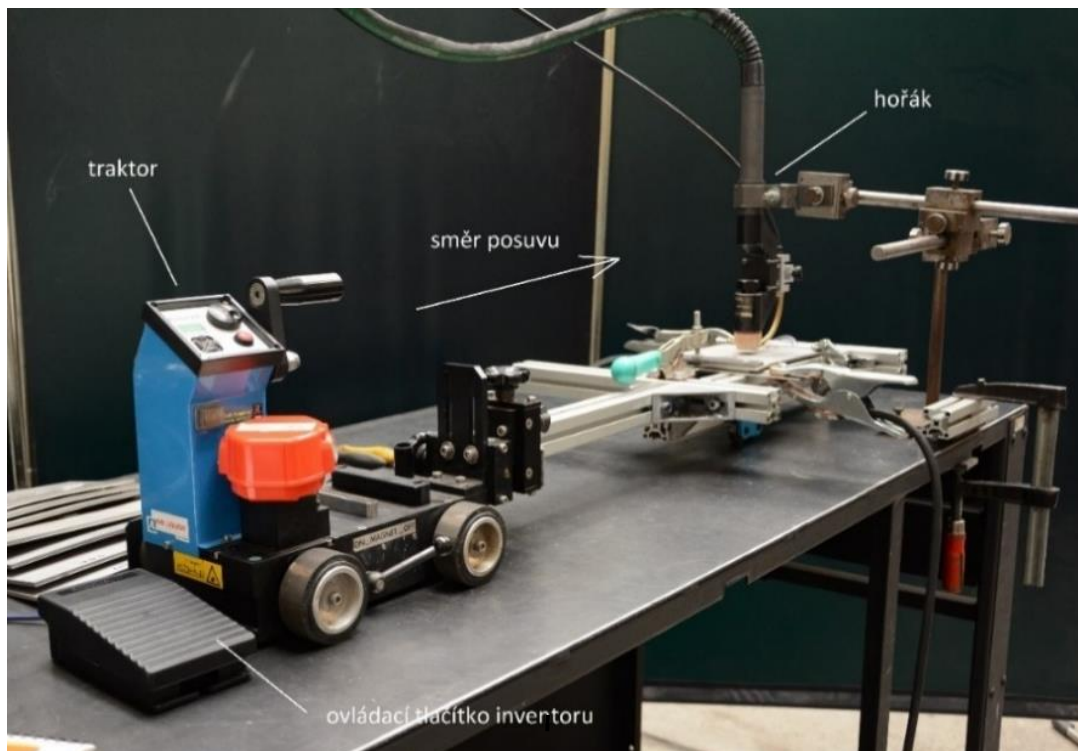
Zajištění posuvu

Při tomto experimentu nebyl hořák upevněn na vozík. Svařovací hubice s podavačem drátu byla staticky upevněna ke stolu a na vozík byla připevněna konstrukce z hliníkových profilů. Pro dostatečnou tuhost konstrukce byl rám podepřen ložiskovými kolečky. Na tuto konstrukci byl pak pomocí upínky a kleští připevněn vzorek - Obrázek 4.2.



Obrázek 4.2 Upevnění vzorku

Pro zajištění posuvu hořáku a regulaci svařovací rychlosti byl použit svařovací traktor WELDYCAR NV, AirLiquide – Obrázek 4.3. Na traktoru byla možnost nastavit zpoždění jízdy. Tato vlastnost byla využita pro synchronizaci se svařovacím invertorem. Svařovací invertor a vozítko totiž nebylo možné propojit pro zahájení svařovacího procesu sepnutím jednoho tlačítka. Pro spuštění procesu bylo zapotřebí spustit pohyb traktoru a zažehnutí hlavního oblouku samostatně. Pro propálení materiálu horkým startem, který trval od 0,7 s do 1 s, byla potřeba nastavit zpoždění traktoru o stejné hodnotě jako trvání horkého startu.



Obrázek 4.3 Zajištění posuvu

Hořák

Pro svařování byl použit strojní hořák PWM-300 od firmy Migatronic CZ a.s. s keramickou hubicí. Průměr dýzy byl 2,87 mm a vzdálenost dýzy od materiálu byl nastaven na 6 mm u všech zkoumaných vzorků. Velikost zasunutí elektrody do dýzy byla nastavena na 1,9 mm seřizovací měrkou. Průměr wolframové elektrody byl 4,8 mm s úhlem naostření 20°. Při prvotních zkušebních návarech byla použita elektroda s malou ploškou na hrotu o průměru přibližně 0,25 mm. Pro svary byla elektroda vyměněna za novou s ostrou špičkou. Výrazné změny v kvalitě svaru nebyly zpozorovány. Během experimentu nebyla elektroda ostřena.

Plyny

Jako plazmový i ochranný plyn byl použit technický argon o čistotě 4.8. Tlaková láhev byla opatřena redukčním ventilem a nastaven tlak 5 barů – Obrázek 4.4 vlevo. Průtok plazmového a ochranného plynu na lázeň zajišťovala řídicí jednotka svařovacího invertoru. Průtok plynu pro ochranu kořene (formovací plyn) byl zajišťován externím průtokoměrem – Obrázek 4.4 vpravo.

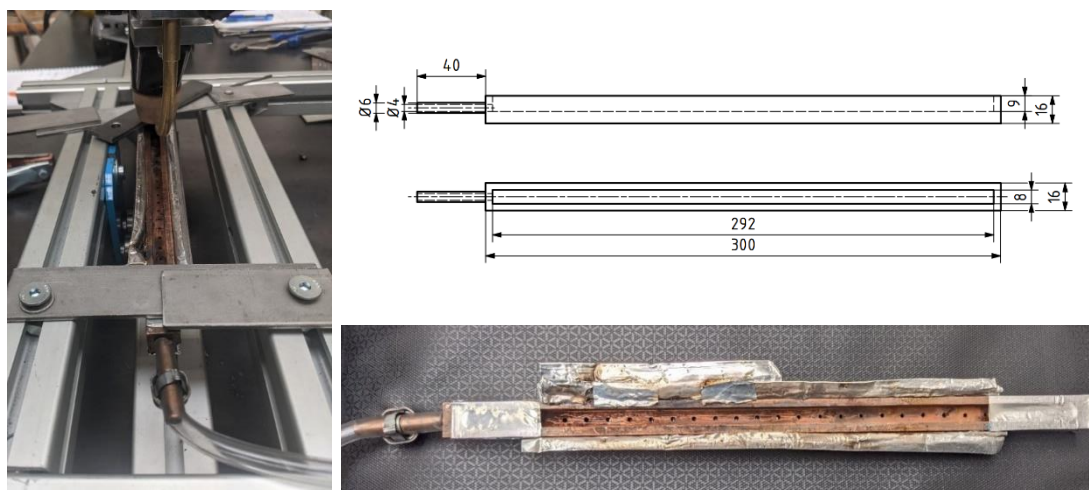


Obrázek 4.4 Redukční ventil a průtokoměr

Ochrana kořene

Ochrana kořene byla zajištěna pomocí měděného žlábků a chlopní z hliníkové folie pro utěsnění, aby docházelo k rovnoměrné distribuci ochranného plynu po celé délce svaru – Obrázek 4.5 dole. Žlábek byl upevněn na hliníkové konstrukci. Před každým svarem se hliníkové chlopně přitlačily ke vzorku. Vzdálenost dna žlábků a spodní strany vzorku byla cca 15 mm. Tato vzdálenost měla zamezit odrazu průchozího paprsku ode dna žlábků za vzniku pórovitosti v kořeni svaru. Při experimentu se tato vzdálenost ukázala jako vhodná.

Nevýhodou tohoto žlábků se však ukázala nerovnoměrná distribuce. Zatímco v blízkosti vstupu formovacího plynu byl kořen chráněn spolehlivě, na konci žlábků došlo k oslabení ochrany. Hliníkové chlopně sice doléhaly na vzorek, ale utěsnění nebylo dostatečné. To způsobilo ztrátu koncentrace formovacího plynu na konci žlábků.



Obrázek 4.5 Žlábek pro vedení formovacího plynu

Hodnoty průtoku formovacího plynu byly nastavovány externím průtokoměrem. Rozměry žlábků a způsob jeho upnutí na hliníkové konstrukci jsou vyobrazeny na Obrázku 4.5.

Vzorky

Vzorky byly o rozměrech 250 x 80 mm a tloušťkách 3, 4 a 5 mm. Vzorky o tloušťkách 3 a 5 mm byly vypáleny na CNC plazmovém stroji a hrany byly ručně začištěny úhlovou bruskou, aby byla zaručena čistota svaru. Vzorky o tloušťce 4 mm byly vypáleny laserem a hrany nebylo třeba obrábět. Všechny vzorky byly připraveny pro svar bez úkosů s minimální mezerou od 0 mm do 0,35 mm. Vzorky na svary byly předpřipraveny dvěma stehy a vzájemně posunuty o cca 20 mm pro přesný doraz při upevňování vzorku k hliníkové konstrukci.

4.2 Materiály

Materiál vzorků

Vzorky pro experiment byly poskytnuty firmou PFT, s.r.o. Materiál vzorků byla běžná potravinářská korozivzdorná ocel EN 1.4301, X5CrNi 18-10, AISI 304 shodná s ČSN 17 240 a 17 241 – Tabulka 4.6. Jedná se o austenitickou nestabilizovanou chromniklovou ocel – viz podkapitola 3.1 (Tabulka 4.4).

	Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	Mo	Si	V
složení [%]	66,74 až 71,24	17,5 až 19,5	8 až 10,5	max 2,00			max 1,00	

Tabulka 4.4 Složení oceli 1.4301 [32]

Na vzorcích bylo provedeno ověření složení materiálu ručním rentgenovým analyzátozem DELTA PREMIUM. Jak je vidět v Tabulce 4.5 naměřené hodnoty odpovídají normě.

vzorek	Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	Mo	Si	V
složení [%]	70,61	18,25	8,3	1,94	0,3	0,26	0,23	0,08

Tabulka 4.5 Naměřené složení vzorku

Vlastnosti použitého materiálu

Modul pružnosti E [GPa]	200
Tvrdost Brinell	215 HB
Mez pevnosti Rm [MPa]	520-750
Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa] min	190
Tažnost A [%]	40
Hustota [kg/m ³]	7900
Měrná tepelná kapacita [J/(kg*K)]	500
Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	1,8*10 ⁻⁵
Tepelná vodivost [W*m ⁻¹ *K ⁻¹]	15
Teplota tání [°C]	1450

Tabulka 4.6 Vlastnosti oceli 1.4301 [33; 32]

Přídavný materiál

Přídavný drát s označením G 19 9 Nb Si podle normy EN 12072 (ESAB). Drát typu 18Cr8Ni stabilizovaný niobem pro svařování korozivzdorných ocelí (Tabulka 4.7). Tento drát je vhodný pro svařování ocelí 1.4301, 1.4306, 1.4541 a jiných. Svarový kov je díky drátu odolný proti mezikrystalové korozi. [34]

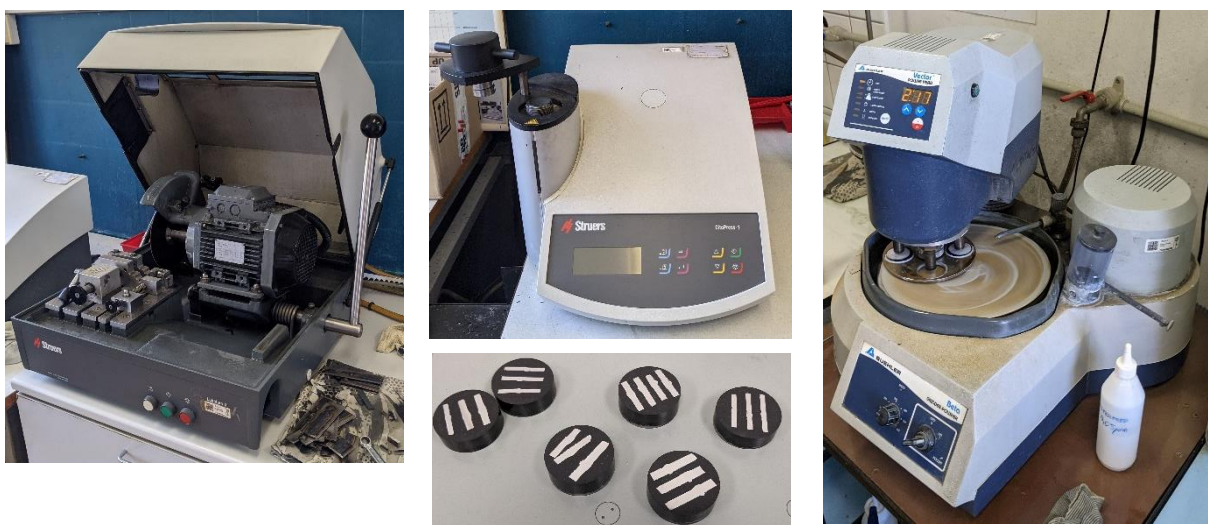
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
složení [%]	0,04	0,7	1,7	19	9,8	0,6

Tabulka 4.7 Složení přídavného materiálu [34]

4.3 Metalografie

Součástí vyhodnocování experimentu byla u vybraných 26 vzorků provedena metalografická zkouška v laboratoři metalografie na fakultě strojní ČVUT. Metalografie byla provedena paní doc. Ing. Marií Kolaříkovou, Ph.D., IWE.

Vzorek byl na hydraulických nůžkách ostříhnutý na šířku svaru a poté byla ze vzorku vyříznuta malá část na intenzivně chlazené kotoučové dělicí pile Strauss Labotom 3– Obrázek 4.6 vlevo. Řezání za studena je pro metalografii velmi důležité z důvodu zamezení tepelného ovlivnění svaru. Vyříznuté vzorky byly poté po více kusech zapečeny do termoplastické hmoty pomocní metalografického lisu Cito Press-1 od firmy Struers – Obrázek 4.6 nahoře. Tyto „puky“ (Obrázek 4.6 dole) o průměru 40 mm byly broušeny a leštěny na brusce a leštičce Beta Grinder Polisher od firmy Buehler – Obrázek 4.6 vpravo. Následně byly vzorky naleptány kyselinou, aby vynikla struktura svaru. Tyto „puky“ byly nakonec vloženy do exsikátoru pro celkové dosušení.



Obrázek 4.6 Metalografické pracoviště

Fotodokumentace makrostruktury vzorků byla pořízena metalografickým mikroskopem Neophot 32 od firmy Zeiss vybaveným CCD kamerou v laboratoři mikroskopie na Ústavu strojírenské technologie Fakulta strojní ČVUT – Obrázek 4.7. Na mikroskopu bylo nastaveno zvětšení 1,25x. U vzorků byla zkoumána pouze makrostruktura svarového spoje. Hledaly se defekty ve svarech jako například póry, vměstky či trhliny. Zkoumal se tvar svaru, úroveň provaření kořene a šířka tepelně ovlivněné oblasti.



Obrázek 4.7 Mikroskopické pracoviště

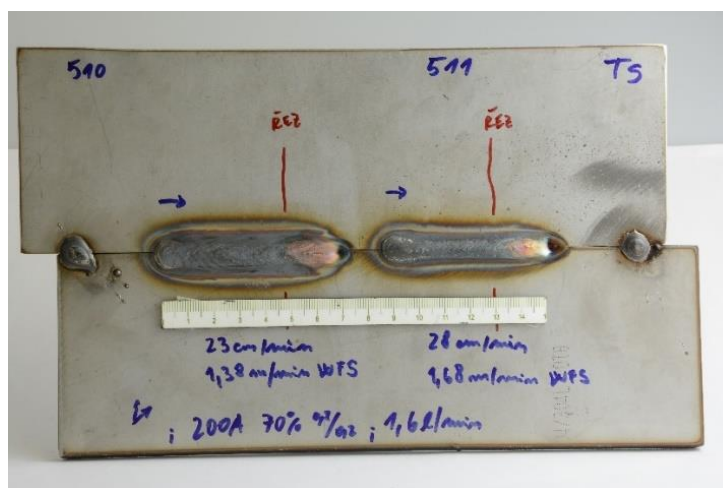
4.4 Průběh experimentu

První zkoušky parametrů u každé tloušťky se prováděly jako návary pro ušetření materiálu. Celkem bylo provedeno 102 pokusů z toho 52 svárů. Z těchto vzorků bylo vybráno 26 vzorků pro bližší zkoumání. Po odzkoušení parametrů se svařovaly předem nastehované vzorky. Vzdálenost dýzy a vycentrování plazmového paprsku na mezeru bylo při každé zkoušce kontrolováno. Svářecí invertor a pohyb traktoru bylo ovládáno současně (Obrázek 4.8). Při průběhu sváření byla zajištěna bezpečnost obsluhy v podobě svářečské helmy a ochrany kůže pracovní halenou. Díky této metodě svařování a kvalitním přístrojům nedocházelo k tvorbě zplodin v podobě kouře.



Obrázek 4.8 Průběh svařování

Na některé vzorky byla využita celá délka spáry mezi destičkami, u některých vzorků byly provedeny dva svary na jednom páru zkušebních destiček. Po každém provedeném svaru byl vzorek chlazen vodou, aby nedocházelo ke kroucení materiálu a předežhátí při dalším svařování. Vzorky byly také důkladně popisovány, aby nedošlo k záměně vzorků –



Obrázek 4.9 Ukázka zkušebního vzorku

Při volbě správných parametrů se vycházelo ze zkušeností technologů ze společnosti Migatronic CZ a.s., z odborné literatury a ze zkušebních návarů – Tabulka 4.8.

Hlavními svařovacími parametry byla svařovací rychlost v_s , základní proud I_1 a průtok plazmového plynu PP. Svařovací rychlost byla nastavována na traktoru a pohybovala se od 20 do 30 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzorky byly svařovány pulzním proudem s hodnotou základního

proudu od 158 do 240 A. Doba trvání t_1 základního proudu a t_2 dolního proudu byla nastavena na 0,2 s u všech vzorků. Hodnota dolního proudu I_2 se volila 40 nebo 70 % základního proudu I_1 . Proud pilotního oblouku byl nastaven na 10 A. Průtok plazmového plynu se pohyboval od 1,0 do 1,8 l*min⁻¹ a používal se čistý argon pro všechny vzorky.

Svařovací proud a rychlost se volila na základě specifického vneseného tepla Q . Jelikož se při experimentu neměřilo svařovací napětí, byla do vztahu dosazena hodnota napětí vypočtená ze vztahu pro normalizované napětí: [19]

$$U_N = 20 + 0,04 \cdot I_p$$

Svařovací proud I_p je pro tento experiment hodnota efektivního proudu I_{ef} . Hodnota vneseného tepla je orientační a používá se jen na porovnání. Není předmětem bližšího zkoumání.

Hodnota průtoku ochranného plynu na svarovou lázeň OP byla nastavena na konstantní hodnotu 13 l*min⁻¹ u všech vzorků. Tato hodnota se ukázala jako dostatečná pro ochranu svaru i s ohledem na různé svařovací rychlosti. Průtoky formovacího plynu FP se pohybovali od 3 do 7 l*min⁻¹. Jako plyn byl použit čistý argon pro všechny vzorky.

Pro 3mm vzorky nebyl použit přídavný materiál. Pro vzorky o tloušťkách 4 a 5 mm použit byl. Při první volbě rychlosti podávání se vycházelo z materiálů společnosti Migatronic CZ a.s. Poté byla hodnota upravována na zkušebních svarech a návarech. Hodnoty rychlosti podávání drátu WFS se u vybraných vzorků pohybovala od 1,18 do 1,68 m*min⁻¹ a byly měněny v závislosti na rychlosti svařování.

Na každé destičce bylo červenou čarou vyznačeno místo, kudy byl pak proveden řez pro následnou metalografickou zkoušku. Fotografie vzorků byly doplněny o šipku, která znázorňuje směr svaru a označení čísla vzorku. Písmeno „k“ za číslem vzorku značí kořenovou stranu svaru. Fotografie makrostruktury byly také doplněny o číslo vzorku. Barevně byly v Tabulce 4.8 vyznačeny měněné parametry. U 3mm vzorků byl zkoumán vliv vneseného tepla, svařovacího proudu a rychlosti. U 4mm a 5mm byl zkoumán i parametr průtoku plazmového plynu PP – Tabulka 4.8.

č. vz.	V_s [cm*mm ⁻¹]	I_1 [A]	[%]	I_2 [A]	I_{ef} [A]	Q [kJ*mm ⁻¹]	PP	FP	WFS [m*min ⁻¹]	U_N [V]
							[l*min ⁻¹]			
43	30	178	40	71,2	124,6	0,4047	1,1	3		24,98
44	30	178	40	71,2	124,6	0,4047	1,1	3		24,98
45	29	178	40	71,2	124,6	0,4186	1,1	3		24,98
47	29	200	40	80	140	0,4820	1,1	3		25,60
48	35	240	40	96	168	0,5002	1,1	3		26,72
50	23	158	40	63,2	110,6	0,4580	1,1	3		24,42
51	26	178	40	71,2	124,6	0,4670	1,1	3		24,98
414	24	182	70	127,4	154,7	0,9804	1,2	7	1,32	26,19
415	24	182	70	127,4	154,7	0,9804	1,2	4	1,32	26,19
416	22	182	70	127,4	154,7	1,0695	1,2	5	1,32	26,19
417	20	182	70	127,4	154,7	1,1765	1,2	5	1,08	26,19
420	22	200	70	140	170,0	1,1753	1,2	5	1,18	26,80
423	22	182	70	127,4	154,7	1,0695	1	5	1,18	26,19
424	22	182	70	127,4	154,7	1,0695	1,4	5	1,18	26,19
425	22	166	70	116,2	141,1	0,9755	1,2	5	1,18	25,64
503	25	200	70	140	170	0,7107	1,6	5	1,5	26,80
510	23	200	70	140	170	0,7725	1,6	5	1,38	26,80
511	28	200	70	140	170	0,6346	1,6	5	1,68	26,80
512	25	200	70	140	170	0,7107	1,4	5	1,5	26,80
514	25	200	70	140	170	0,7107	1,8	5	1,5	26,80
515	25	178	70	124,6	151,3	0,6149	1,6	5	1,5	26,05
516	25	217	70	151,9	184,45	0,7878	1,6	5	1,5	27,38

Tabulka 4.8 Parametry svařování

4.5 Výsledky a diskuse

Vyhodnocení je rozděleno do 3 částí podle tloušťky vzorků. Důraz byl kladen na vizuální vyhodnocení kvality svaru. Zkoumala se velikost svarové housenky a kořene. Dále jestli byl kořen provařen a zkoumán byl i tvar svaru v řezu. Při vyhodnocování byl svar zkoumán převážně ve dvou třetinách délky od začátku svaru. V této poloze byl i prováděn řez pro metalografickou zkoušku. Začátek a konec svarového procesu a samotného svaru nebyl předmětem zkoumání. Šířka svarové housenky b a kořene b_k byla odečtena z makrostruktury vzorků.

4.5.1 Plechy o tloušťce 3 mm

Tato skutečnost se však odrazila na kvalitě svarů. Skoro u všech vzorků je patrný propad svarové lázně (Obrázek 4.10 a 4.11). To je dáno nedostatkem materiálu ve svarové lázni. Pokud má být docíleno provařeného kořene a zároveň kvalitní svarové housenky, měl

by být použit přídatný materiál. Nevylučuje se však, že při vyhledání ideálních svarových parametrů se tohoto cíle nedosáhne.

č. vz.	kořen	b/b _k [mm]
43	NE	4,5/-
44	NE	4,5/-
45	NE	4,5/-
47	ANO	5/2
48	ANO	5/3
50	NE	6,5/-

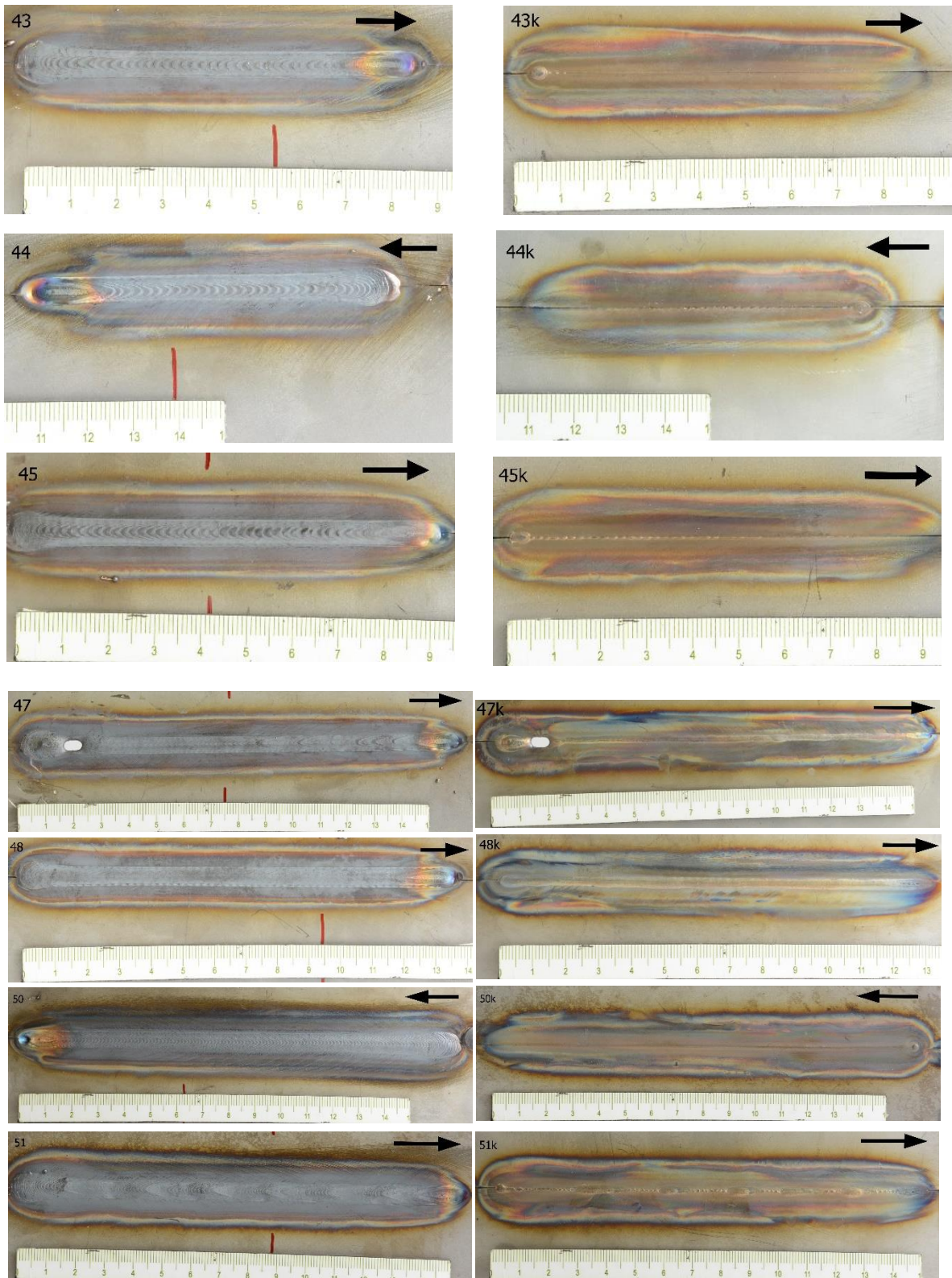
Tabulka 4.9 Vyhodnocení svaru 3 mm

Na vzorcích 43 a 44 – Obrázek 4.11 je vidět chyba při provádění experimentu v podobě přesazení destiček u vzorku 44. U obou vzorků byly nastaveny stejné parametry, výsledné svary se však od sebe tvarem liší. Vzorek 43 má výraznější propad svarové housenky a symetričtější tvar než vzorek 44.

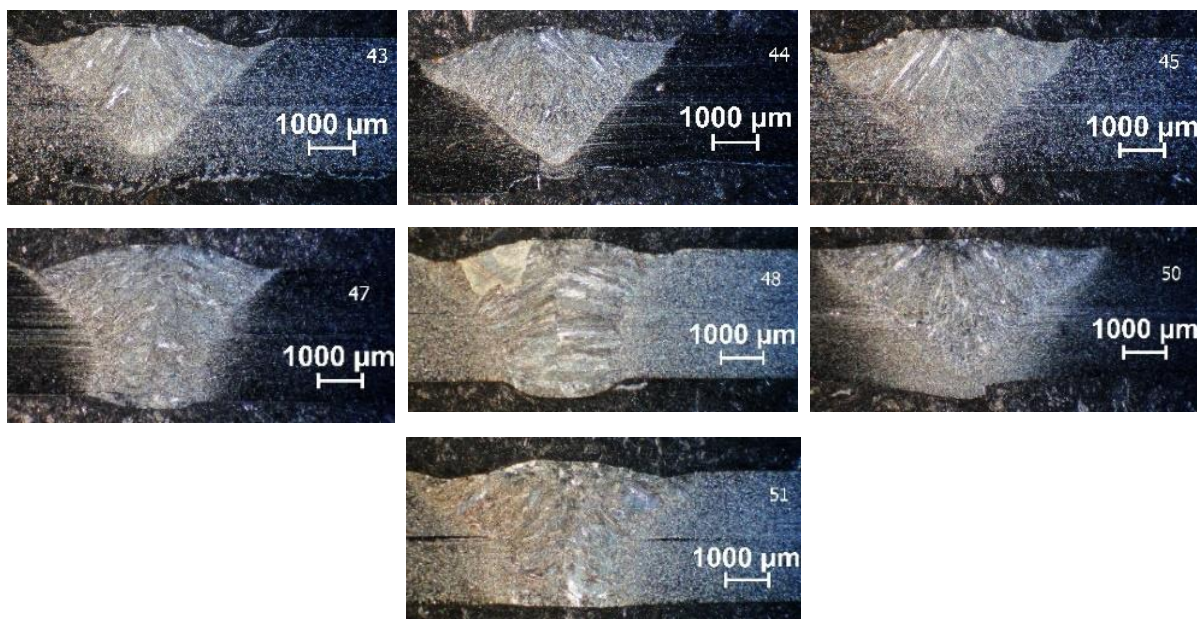
U vzorků 43 až 45 byla hodnota Q nižší a nedošlo k plnému provaření materiálu. Hodnota vneseného tepla se proto u následujících vzorků zvýšila – Tabulka 4.8. Při zvýšení této hodnoty došlo k plné penetraci materiálu u vzorků 47 a 48. U vzorku 50 k provaření kořene nedošlo. – Tabulka 4.9. Důvodem je nižší hodnota vneseného tepla a svařovacího proudu. U vzorku číslo 51 je provaření kořene nestabilní. Na svaru je patrný tzv. „humping“. Parametry tohoto vzorku jsou tedy hraničními hodnotami pro provaření kořene.

Ukázalo se, že nižší hodnota proudu a nižší svařovací rychlost mají při zachování stejné hodnoty vneseného tepla nižší stupeň provaření. Pro vysokou efektivitu svařovacího procesu je toto zjištění pozitivní. Tedy vyšší rychlost a proud poskytuje lepší kvalitu svaru, při zachování stejného průtoku plazmového plynu. Toto zjištění však platí jen do určitých hodnot. U vzorku 47 je ideální tvar svaru a šířka kořene přibližně 2 mm. Vzorek 48 má šířku kořene 3 mm, což vzhledem k šířce svarové housenky 6 mm je příliš vysoká hodnota. Vzorek 48 má také poměrně velkou tepelně ovlivněnou oblast.

U vzorku 45 lze pozorovat hraniční stav, kdy při horním pulzu byl materiál provařen a při dolním pulzu k provaření nedošlo. Proto byl zvýšen proud, aby se dosáhlo plného provaření jako u vzorku 47.



Obrázek 4.10 Vzorky o tloušťce 3 mm



Obrázek 4.11 Makrostruktura vzorků o tloušťce 3 mm

4.5.2 Plechy o tloušťce 4 mm

U vzorku 416 při experimentu došlo k chybě a hodnota rychlosti podávání drátu nebyla přenastavena úměrně k rychlosti svařování. Na Obrázcích 4.12 a 4.13 je vidět, že u vzorku 416 je přebytek přídavného materiálu ve svaru oproti ostatním vzorkům.

č. vz.	kořen	b/bk [mm]
414	ANO	8/1,5
415	ANO	8/1,5
416	ANO	8,5/2
417	ANO	10/3
420	ANO	10/3
423	ANO	9/2
424	ANO	9/3
425	NE	7,5/-

Tabulka 4.10 Vyhodnocení 4 mm

U vzorků 414 a 415 byl zkoumán vliv průtoku formovacího plynu. U prvního vzorku byl nastaven průtok na $7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a u druhého na $3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ (Tabulka 4.8). Šířku kořene svaru to nijak neovlivnilo. Na Obrázku 4.12 je vidět, že ochrana u vzorku 415 není dostatečná a dochází k částečné oxidaci. Pro další vzorky byla nastavena hodnota průtoku formovacího plynu na $5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a pro potřeby experimentu se ukázala jako ideální.

Svařovací parametry u vzorku 416 byly vybrány jako výchozí pro volbu parametrů pro další vzorky. Od této hodnoty se o cca 10 % navýšila a poté snížila hodnota parametru.

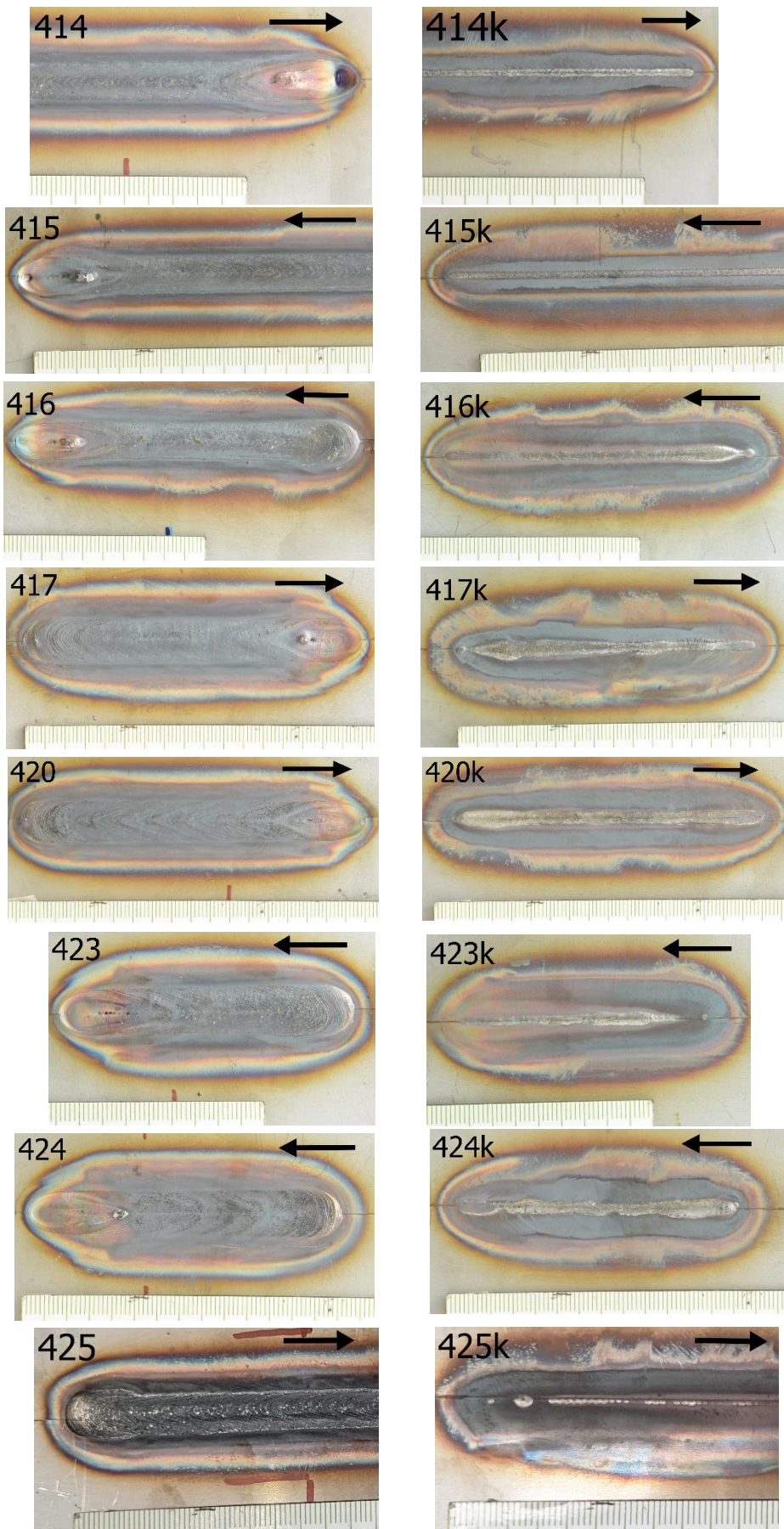
Díky tomu bylo možné srovnávat svařovací proud a rychlost při odpovídající hodnotě vneseného tepla.

U vzorků 415 a 417 byl zkoumán vliv svařovací rychlosti na tvar a velikost svaru. Lze si všimnout, že se snižující se svařovací rychlostí, roste hodnota vneseného tepla a také hodnota šířky svarové housenky a kořene. Svar má tendenci se zplošťovat a rozšiřovat.

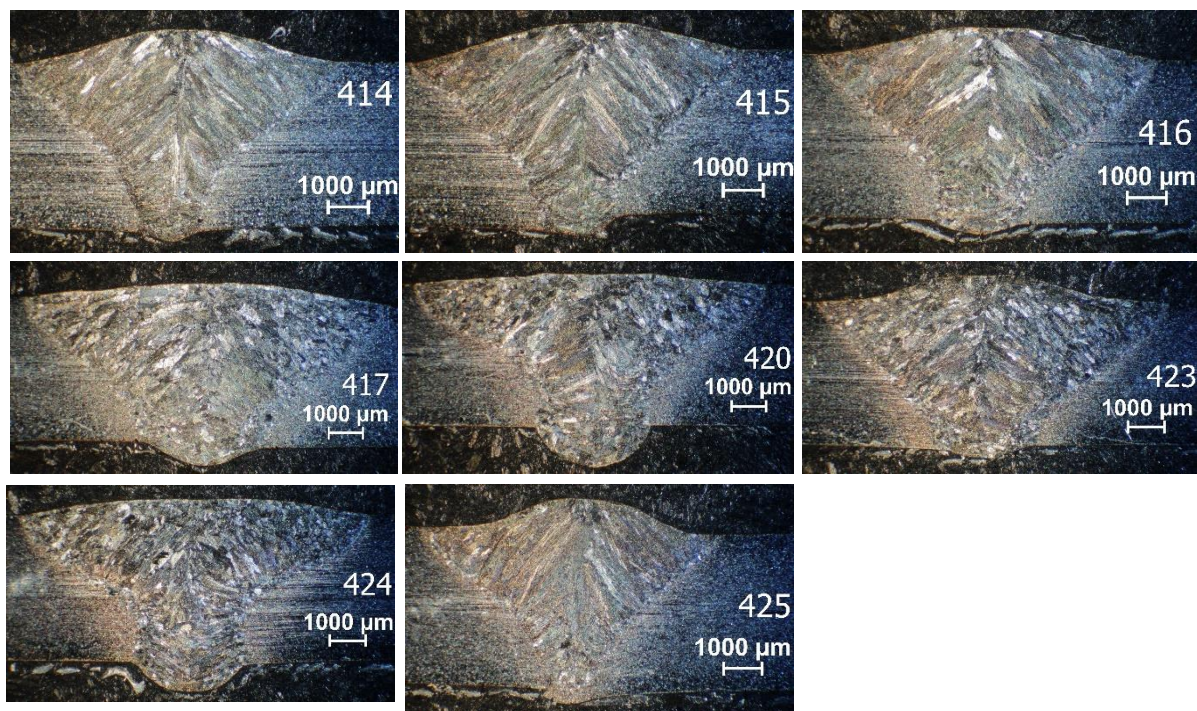
Pro zkoumání ovlivnění svaru svařovacím proudem byly provedeny svary 420 a 425. Vzorek 420 se velmi podobá vzorku 417 a to jak tvarem, tak šířkou svaru a kořene. Vzorek 417 měl však velmi nepravidelnou stavbu kořene. U vzorku 425 nebyl kořen provařen (Tabulka 4.10) a svarová housenka byla úzká a vystouplá. Je zajímavé, že se potvrzuje zjištění u vzorků o tloušťce 3 mm. Vyšší hodnoty rychlosti a proudu jsou lepší než nižší, při zachování stejné hodnoty vneseného tepla Q .

Vliv průtoku plazmového plynu byl zkoumán na vzorcích 423 a 424. Z tvaru svarů na Obrázku 4.13 je patrné, že tato hodnota výrazně ovlivňuje tvar svaru a šířku kořene. Ne však šíří svarové housenky, která se u všech třech vzorků pohybovala okolo 9 mm – Tabulka 4.10. U vzorku 423 je vidět, že dynamický účinek plazmy není dostatečný. Svar je vystouplý a na začátku svaru nebyl provařen kořen. U vzorku 424 je naopak vidět výrazné až nepravidelné provaření kořene. Je zde i typický trychtýřovitý tvar svaru.

Makrostruktura vzorků, u kterých nebyl měněn průtok plazmového plynu, ukazuje, jak ovlivňuje vnesené teplo výslednou strukturu svaru. Při nižších hodnotách vneseného tepla Q (Tabulka 4.8) je makrostruktura svaru jemnější (Obrázek 4.13). Při vyšší hodnotě naopak hrubší.



Obrázek 4.12 Vzorky o tloušťce 4 mm



Obrázek 4.13 Makrostruktura vzorků o tloušťce 4 mm

4.5.3 Plechy o tloušťce 5 mm

U těchto vzorků byl také použit přídavný materiál a volba parametru rychlosti podávání přídavného drátu probíhala stejně jako u vzorků o tloušťce 4 mm. Stejně tak byly voleny ostatní svařovací parametry. Tentokrát byly zvoleny parametry vzorku 503 jako výchozí a u každého svarového parametru se provedly dva svary s hodnotami o cca 10 % vyššími a nižšími – Tabulka 4.8. Ukázalo se, že vzhledem k vyšším svarovým parametrům než u vzorků o tloušťce 4 mm je tento rozsah hodnot příliš velký.

Kromě propadů svarové lázně a nepravidelnosti některých svarů, nebyly pozorovány žádné další vady ve svarech.

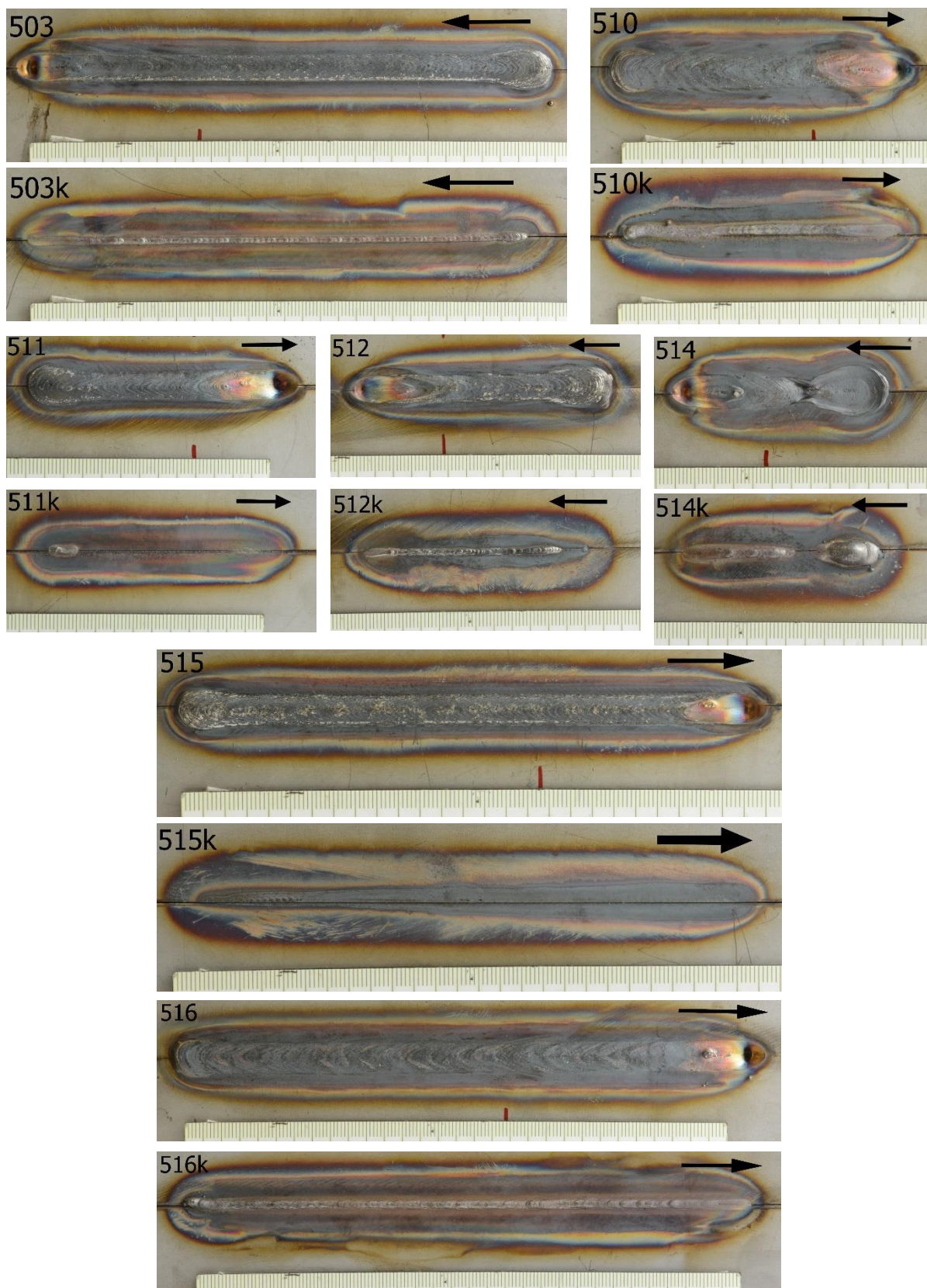
č. vz.	kořen	b/bk [mm]
503	ANO	6,5/2
510	ANO	8/2,5
511	NE	6,5/-
512	ANO	6/2
514	ANO	8,5/3
515	NE	6,5/-
516	ANO	8/2,5

Tabulka 4.11 Vyhodnocení 5 mm

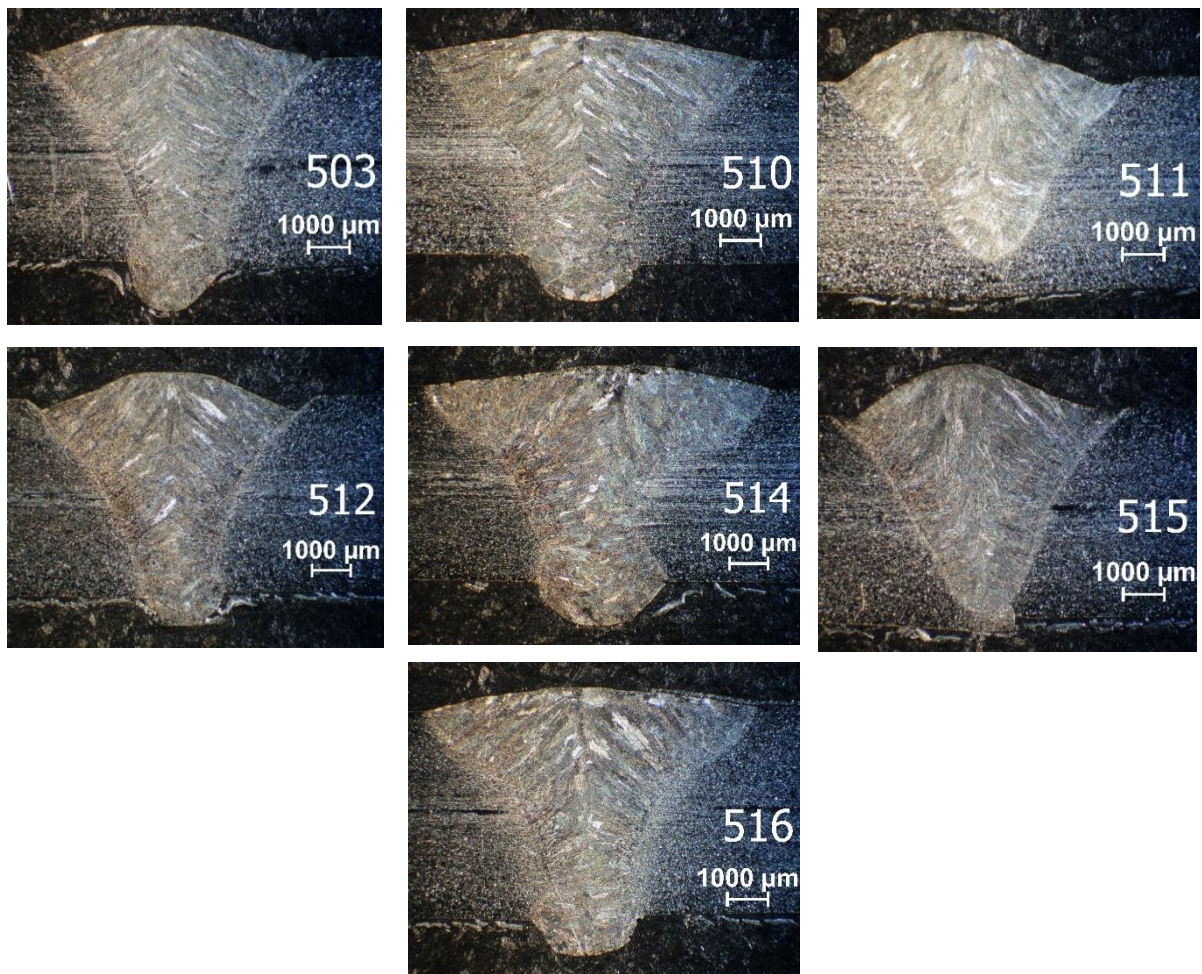
U vzorků 510 a 511 byl zkoumán vliv svařovací rychlosti. Při příliš vysoké svařovací rychlosti u vzorku 511 nedošlo k plné penetraci materiálu – Tabulka 4.11. Naopak při menší svařovací rychlosti je tvorba kořene svaru nepravidelná – Obrázek 4.14.

Podobný byl vliv svařovacího proudu. Při zachování stejné hodnoty vneseného tepla jsou vzorky 510 a 516 tvarem i rozměry svaru téměř totožné. Vzorek 516 má však rovnoměrnější pravidelný kořen. Na druhé straně při nízké hodnotě proudu je u vzorku 515 pozorován neprovařený kořen stejně jako u vzorku 511.

Při porovnání vzorků 503, 512 a 514 vidíme podstatu chování průtoku plazmového plynu. Při nízké hodnotě průtoku u vzorku 512 není vytvořen dostatečný tlak a mohutnost plazmového paprsku. Svar je příliš vypouklý a svarová lázeň se dostatečně nerozlila do krajů – Obrázek 4.15. To způsobilo vznik propadů svarové lázně. U vzorku 514 je pozorován podobný tvar svaru jako u vzorku 424 v předchozí podkapitole. Trychtýřovitý tvar je dokonce v místě nad kořenem mírně zúžený.



Obrázek 4.14 Vzorky o tloušťce 5 mm



Obrázek 4.15 Makrostruktura vzorků o tloušťce 5 mm

ZÁVĚR

V práci byla teoreticky zpracována problematika svařování s vysokou hustotou energie se zaměřením na svařování plazmatem. Svařování plazmatem se v porovnání s metodou TIG jeví jako technicky výhodnější vzhledem k možnosti svařování průchozím paprskem („key-hole“). Na rozdíl od metody svařování laserem a elektronovým paprskem je tato metoda levnější a méně náročná na přípravu svarových ploch.

Bylo navrženo a sestaveno testovací pracoviště osazené plazmovým zdrojem a posuvem vzorku při zachování stacionární polohy hořáku. Vzorky tlouštěk 3, 4 a 5 mm byly plazmově svařeny s i bez přídavného materiálu. Z výsledků lze vyvodit, že svařování 3mm plechů bez přídavného materiálu lze využít pouze při precizní přípravě svarových ploch a optimálním nastavení svařovacích parametrů. Svary 4 a 5 mm byly svařeny s přídavným materiálem. Změnou průtoku plazmového plynu při zachování zbylých parametrů se měnila hloubka a intenzita penetrace. Při hodnocení bylo zjištěno, že při zachování přibližně stejných hodnot vneseného tepla Q , má vzorek svařovaný vyšším svařovacím proudem a rychlostí příznivější tvar, provaření a celkový vzhled.

Zjištěné vlivy parametrů se jeví jako velice užitečný základ pro zavedení technologie svařování plazmatem ve výrobním procesu ve společnosti PFT, s.r.o. při svařování korozivzdorné kanalizační techniky a prokazují užitečnost technologie.

Vzhledem k ovlivnění výsledků svařování mnoha parametry je téma této práce možné dále rozvíjet. Nabízí se zkoumání různých procesních plynů, měření stability průchozího paprsku či proměření skutečných svarových parametrů při procesu svařování.

5 Bibliografie

- [1] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 978-80-7082-697-3.
- [2] MESSLER, JR., Robert W. *Joining of materials and structures*. 1. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 978-0-7506-7757-8.
- [3] KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984, .
- [4] KOŘÁN, Pavel. Využití laseru v průmyslu – minulost a současnost. In: *LAO - průmyslové systémy s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/vyuziti-laseru-v-prumyslu--minulost-a-soucasnost-313>
- [5] HECHT, Jeff. *Understanding lasers: an entry-level guide: an entry-level guide*. Fourth. Piscataway, NJ; Hoboken, New Jersey: IEEE Press, 2019, .
- [6] KOŘÁN, Pavel. Základní princip laseru a jejich dělení. In: *LAO - průmyslové systémy s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [7] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. Cambridge: Woodhead, 2003. ISBN 18-557-3689-6.
- [8] Diodové lasery s užší fokusací. *MM* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/diodove-lasery-s-uzsi-fokusaci.html>
- [9] KAŠPAR, Jan a Stanislav NĚMEČEK. Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. *MM* [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>
- [10] PÍŠKA, Miroslav. EBM - průlomová technologie výroby exponovaných součástí. In: *MM* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:

<https://www.mmspektrum.com/clanek/ebm-prulomova-technologie-vyroby-exponovanych-soucasti.html>

- [11] History of electron beam technology. In: *Steigerwald Strahltechnik GmbH* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.sst-ebeam.com/en/electron-beam-technology/history-of-eb-technology.html>
- [12] Electron beam machining (EBM) principles. In: *Basic mechanical engineering* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://basicmechanicalengineering.com/electron-beam-machining-ebm-principles/>
- [13] MELEKA, A.H. *Electron-beam Welding: Principles and Practice*. London: McGRAW-HILL, 1971. ISBN 07-094218-8.
- [14] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. In: *Svět svaru* [online]. [cit. 2020-05-4]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8914220-Svarovani-plazmovym-obloukem.html>
- [15] MUSIL, Miloslav. Kvalifikace svářečů dle ISO 9606-1. In: *ATZ - Asociace pracovníků tlakových zařízení* [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://atz.cz/?p=342>
- [16] LIU, Zu Ming, ShuangLin CUI, Zhen LUO, ChangZhen ZHANG, ZhengMing WANG a YuChen ZHANG. Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2016, 23, 315-327 [cit. 2020-06-07]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2016.04.004
- [17] TENDERO, Claire, Christelle TIXIER, Pascal TRISTANT, Jean DESMAISON a Philippe LEPRINCE. Atmospheric pressure plasmas: A review: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2006, 61(1), 2-30. ISSN 0584-8547. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.003>
- [18] CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozi-vzdorných ocelí* [online]. 1. Brusel: Euro Inox, 2007 [cit. 2020-06-12]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf

- [19] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN isbn80-85771-81-0.
- [20] METCALFE, J.C. a M. B. C. QUIGLEY. Keyhole Stability in Plasma Arc Welding. *Welding Research Supplement*. 1975.
- [21] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II. část svařování, díl 2: Speciální metody tavného svařování, Tlakové svařování* [online]. In: . Brno, 2006 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te__technologie__2__specialni__metody__svarovani__kubicek.pdf
- [22] DAVID, Zášková. *Parametrické zkoušky plazmového svařování kořene svaru* [online]. Brno, 2010 [cit. 2021-07-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www__base/zav__prace__soubor__verejne.php?file__id=29327. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [23] *The orbital welding handbook* [online]. olysoude Nantes France SAS, 2009 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: https://static1.squarespace.com/static/54becf2ae4b09fae314e6e56/t/57a89018c534a5bcfbe978da/1470664738648/Orbital__Welding__Handbook__EN__LR.PDF
- [24] Volba parametrů a řízení svařovacího procesu. *Institute of Scientific Instruments AS CR* [online]. 2011 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/en/node/750/volba-parametru-rizeni-svarovaciho-procesu>
- [25] MÁŠOVÁ, P. *Možnosti regulace tepla vneseného do svaru při MIG/MAG svařování* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-08-05]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [26] OCHODEK, Vladislav. Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů-I. *VŠB TU Ostrava Katedra mechanické technologie-ústav svařování* [online]. 2011 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z:

https://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv__tepl__rezi_mu__a1.pdf

- [27] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [28] HRIVŇÁK, I. a P. TKÁČ. *Theory of Weldability of Metals and Alloys: Materials Science Series*. Elsevier, 1992. ISBN 9788090048607. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=GfNTAAAAMAAJ>
- [29] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická, č. spisu 471, roč. 104 (1999). ISBN 80-200-0671-0.
- [30] KOUKAL, Jaroslav. *Svařování ocelových konstrukcí*. 1. vyd. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí, 2010. ISBN 978-80-904535-4-8.
- [31] *Migatronic CZ a.s.* [online]. [cit. 2021-07-03]. Dostupné z: <https://www.migatronic.com/cz/>
- [32] Cr-Ni austenitická ocel odolná korozi. *TECHportal* [online]. [cit. 2021-07-22].
- [33] AISI 304 (1.4301) Stainless Steel: Properties. *Matmatch* [online]. [cit. 2021-07-20].
- [34] OK Autrod 347Si. *ESAB* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-347si.cfm>

6 Seznam tabulek

Tabulka 4.1 Parametry svařovacího invertoru PI 350 PLASMA	28
Tabulka 4.2 Parametry podavače drátu CWF MULTI	28
Tabulka 4.3 Parametry chladící jednotky FLEX MCU.....	28
Tabulka 4.4 Složení oceli 1.4301 [32].....	32
Tabulka 4.5 Naměřené složení vzorku	32
Tabulka 4.6 Vlastnosti oceli 1.4301 [33; 32]	32
Tabulka 4.7 Složení přídatného materiálu [34].....	33
Tabulka 4.8 Parametry svařování	37
Tabulka 4.9 Vyhodnocení svaru 3 mm.....	38
Tabulka 4.10 Vyhodnocení 4 mm	40
Tabulka 4.11 Vyhodnocení 5 mm.....	43

7 Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Srovnání svařovacích metod podle hustoty energie [3].....	13
Obrázek 2.2 Schéma laseru [6].....	14
Obrázek 2.3 Schéma EBW zařízení [12].....	16
Obrázek 2.4 Štěpení plynů a) disociace, ionizace b) přímá ionizace [1].....	19
Obrázek 2.5 Schéma plazmového hořáku [18].....	20
Obrázek 2.6 Porovnání metod TIG a PAW [19].....	21
Obrázek 4.1 Pracoviště: 1 - Podavač drátu, 2 - Tlaková láhev, 3 - Vozítko, 4 - Hořák, 5 - Vzorek, 6 - Stůl, 7 - Hliníková konstrukce, 8 - Chlazení, 9 - Svařovací invertor	27
Obrázek 4.2 Upnutí vzorku.....	29
Obrázek 4.3 Zajištění posuvu.....	30
Obrázek 4.4 Redukční ventil a průtokoměr.....	31
Obrázek 4.5 Žlábek pro vedení formovacího plynu.....	31
Obrázek 4.6 Metalografické pracoviště.....	33
Obrázek 4.7 Mikroskopické pracoviště.....	34
Obrázek 4.8 Průběh svařování.....	35
Obrázek 4.9 Ukázka zkušební vzorku.....	35
Obrázek 4.10 Vzorky o tloušťce 3 mm.....	39
Obrázek 4.11 Makrostruktura vzorků o tloušťce 3 mm.....	40
Obrázek 4.12 Vzorky o tloušťce 4 mm.....	42
Obrázek 4.13 Makrostruktura vzorků o tloušťce 4 mm.....	43
Obrázek 4.14 Vzorky o tloušťce 5 mm.....	45
Obrázek 4.15 Makrostruktura vzorků o tloušťce 5 mm.....	46