



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

Porovnání ochranných plynů při TIG svařování

Influence of shielding gases on TIG welding

Bakalářská práce

Studijní program: B 2343 VÝROBA A EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ

Studijní obor: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

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

Autor: Petr Syrový

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Syrový** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **438605**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání ochranných plynů při TIG svařování

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of shielding gases on TIG welding

Pokyny pro vypracování:

Ochranné plyny používané pro svařování korozivzdorných ocelí.
Princip svařování metodou TIG.
Svařování korozivzdorných ocelí.
Porovnání ochranných plynů při svařování.

Seznam doporučené literatury:

Normy, skripta, 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.

10.5.

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Porovnání ochranných plynů při TIG svařování“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Kovandy Ph.D., IWE, s použitím literatury, uvedené na konci bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Petr Syrový

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Karlu Kovandovi Ph.D., IWE za vedení práce, a také za cenné náměty a rady v průběhu její tvorby. Dále bych chtěl poděkovat Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT za poskytnutí vybavení potřebného k realizaci experimentu a firmě Linde za dodání ochranných plynů.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá oblastí TIG svařování korozivzdorných ocelí, konkrétně ochrannými plyny. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V teoretické části seznamuje s korozivzdornými oceli, principy TIG svařování, metodikou svařování tenkých plechů, a ochrannými plyny používanými pro TIG svařování korozivzdorných ocelí. Část praktická popisuje a zaznamenává experiment, který byl v rámci práce proveden, porovnává ochranné plyny (argon 4.8, argon + 30 % helia, argon + 6 % vodíku, argon + 10 % vodíku) použitelné pro TIG svařování plechů o tloušťce 1 mm z oceli 1.4301. Hlavní důraz je kladen na porovnání výše uvedených plynů z hlediska dosažení co nejvyšší svařovací rychlosti.

Vysoká škola:	ČVUT Fakulta strojní v Praze
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	Doc. Ing Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Název bakalářské práce:	Porovnání ochranných plynů při TIG svařování
Školní rok vyhotovení:	2016/2017
Jméno autora:	Petr Syrový
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE
Klíčová slova:	TIG svařování, ochranný plyn, vlečná ochrana, korozivzdorná ocel, automatizace

Abstract

This bachelor thesis looks into a topic of TIG welding. The thesis is divided into two main parts. In the theoretical part introduces with stainless steels, principles of TIG welding, methodic of welding thin plates and shielding gases used for TIG welding of stainless steels. Practical part describes and records experiment, which has been done, compares shielding gases with thickness of 1 mm made of 1.4301 steel and interests itself in increasing of welding speed in TIG welding of stainless steel plates.

University:	CTU Faculty of mechanical engineering in Prague
Institute:	Institute of engineering technology
Head of the institute:	Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Name of bachelor thesis:	Influence of shielding gases on TIG welding
Year:	2016/2017
Author:	Petr Syrový
Supervisor:	Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE
Keywords:	TIG welding, shielding gas, towing protection, stainless steel, automatization

Obsah

1	Úvod	11
2	Korozivzdorné oceli	12
2.1	Chromové korozivzdorné oceli	12
2.2	Chromniklové korozivzdorné oceli	12
2.3	Feritické korozivzdorné oceli	12
2.4	Martensitické korozivzdorné oceli.....	13
2.5	Austenitické korozivzdorné oceli	14
2.6	Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli	15
3	Korozivzdorná ocel 1.4301	15
3.1	Značení a chemické složení.....	15
3.2	Mechanické vlastnosti	15
3.3	Korozní odolnost.....	16
3.4	Technologická zpracovatelnost	16
3.5	Využití	16
4	Metoda TIG.....	17
4.1	Princip a popis metody	17
4.2	Parametry charakterizující svařování metodou TIG	17
4.3	Svařovací elektrody a zdroje při metodě TIG.....	20
4.4	Svařování tenkých plechů	24
4.4.1	Lemové spoje	24
4.4.2	Svařování s použitím přídavného materiálu	25
4.4.3	Ustavení a upnutí vzorků	25
4.5	Automatizace.....	26
5	Ochranná atmosféra pro svařování metodou TIG.....	28
5.1	Inertní plyny.....	29
5.1.1	Argon.....	29
5.1.2	Helium	30
5.1.3	Směsi argon – helium.....	31
5.2	Redukční plyny.....	31
5.2.1	Směsi argonu s heliem, vodíkem a dusíkem	31
5.3	Sekundární ochrana.....	32
5.4	Vlečná ochrana	33

5.5	Zásady při výběru ochranného plynu	34
5.6	Tepelná vodivost plynů	35
6	Experimentální část	36
6.1	Úvod.....	36
6.2	Základní materiál	36
6.3	Přídavný materiál.....	36
6.4	Příprava vzorků	37
6.5	Zařízení a pracoviště experimentu	38
6.5.1	Upínací přípravek	39
6.6	Postup a parametry svařování	40
6.7	Argon 4.8	42
6.8	Varigon H6	44
6.9	Varigon He30	46
6.10	Varigon H10	47
6.11	Porovnání naměřených hodnot	50
6.11.1	Dosažená svařovací rychlost	50
6.11.2	Svařovací proud	51
6.11.3	Vnesené teplo.....	52
6.11.4	Metalografické vyhodnocení	54
7	Závěr	56
8	Seznam použité literatury	57

Seznam tabulek

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti oceli DIN 1.4301 [4]	15
Tabulka 2: Chemické složení a barevné značení wolframových elektrod [7]	21
Tabulka 3: Chemické a fyzikální vlastnosti plynů pro metodu TIG dle [12]	28
Tabulka 4: Značení a čistota dodávaného argonu [7,12]	30
Tabulka 5: Doporučené plyny pro TIG svařování různých typů korozivzdorných ocelí [13]	32
Tabulka 6: Vybrané charakteristiky přídavného materiálu (firma ESAB) [16]	37
Tabulka 7: Svařovací parametry – Argon 4.8	42
Tabulka 8: Svařovací parametry Varigon H6	44
Tabulka 9: Svařovací parametry - Varigon He30	46
Tabulka 10: Svařovací parametry Varigon H10	48
Tabulka 11: Porovnání dosažené svařovací rychlosti pro použité ochranné plyny	50
Tabulka 12: Porovnání použitých ochranných plynů z hlediska dodávaného svařovacího proudu	51
Tabulka 13: Údaje pro vyhovující vzorky	53

Seznam grafů

Graf 1: Závislost svařovacího proudu na svařovací rychlosti	41
Graf 2: Závislost rychlosti posuvu přídavného drátu na svařovací rychlosti	41
Graf 3: Závislost svařovacího proudu na svařovací rychlosti při použití různých ochranných atmosfér	52

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip metody TIG [8]	17
Obrázek 2: Princip hoření oblouku při různých zapojeních, a) DC+, b) DC- c) AC [9].....	18
Obrázek 3: Průběh proudu TIG – AC [9].....	20
Obrázek 4: Změna frekvence polarity - AC proud [9]	20
Obrázek 5: Schéma broušení špičky TIG elektrody [10].....	23
Obrázek 6: Bruska na wolframové elektrody [10]	23
Obrázek 7: Vliv geometrie a excentricity broušení na e. oblouk [10].....	24
Obrázek 8: Vliv směru broušení elektrody na elektrický oblouk [10]	24
Obrázek 9: Lemový spoj [9].....	25
Obrázek 10: Schematické zobrazení upínání plechů [7]	26
Obrázek 11: Model upínacího přípravku pro svařování tenkých plechů s vlečnou ochranou [7]	33
Obrázek 12: Schematický model upínacího přípravku s podložkou pro sekundární ochranu kořene v řezu	34
Obrázek 13: Model podložky pro sekundární ochranu kořene.....	34
Obrázek 14: Grafy tepelné vodivosti základních plynů užívaných při svařování [17]	35
Obrázek 15: Pracoviště pro úpravu vzorků	38
Obrázek 16: Vlečná ochrana s přívodem příd. drátu a drátěnkou.....	38
Obrázek 17: Vlečná ochrana použitá pro experiment s přívodem plynu (zelená hadička) a svař. hořákem	38
Obrázek 18: Pracoviště experimentu.....	39
Obrázek 19: Upínací přípravek pro experiment.....	40
Obrázek 20: TIG 10 - nevyhovující vzorek, $v_{sv} = 250$ cm/min	43
Obrázek 21: TIG 5 - vyhovující vzorek, $v_{sv} = 200$ cm/min	43
Obrázek 22: TIG 22 - nevyhovující vzorek, $v_{sv} = 400$ cm/min	45
Obrázek 23: TIG 20 - vyhovující vzorek, $v_{sv} = 330$ cm/min	45
Obrázek 24: TIG 32 - nevyhovující vzorek, $v_{sv} = 270$ cm/min	47
Obrázek 25: TIG 31 - vyhovující vzorek, $v_{sv} = 230$ cm/min	47
Obrázek 26: TIG 43 - nevyhovující vzorek, $v_{sv} = 330$ cm/min	49
Obrázek 27: TIG 47 - vyhovující vzorek, $v_{sv} = 330$ cm/min	49
Obrázek 28: TIG 20, Varigon H6, 330 cm/min, zvětšení 25x.....	54
Obrázek 29: TIG 5, Ar 4.8, 200 cm/min, zvětšení 25x	54
Obrázek 30: TIG 47, Varigon H10, 330 cm/min, zvětšení 25x.....	54
Obrázek 31: TIG 31, Varigon He30, 230 cm/min, zvětšení 25x.....	54

1 Úvod

TIG svařování je metodou obloukového svařování, která umožňuje svařovat širokou škálu materiálů od legovaných ocelí až po neželezné kovy. Principem této metody svařování hoří elektrický oblouk mezi neodtavující se wolframovou elektrodou a základním materiálem, v ochranné atmosféře inertního plynu.

Materiál, jehož vlastnosti a svařování jsou v práci zkoumány, je korozivzdorná austenitická ocel 1.4301. Tato ocel je dnes využívána především ve stavebnictví a potravinářství. Práce se zabývá především ochrannými plyny použitelnými pro tuto svařovací aplikaci a optimalizací svařovacího procesu.

Přípravky a ochranný plyn použitý při svařování mají zásadní vliv na parametry a kvalitu svarového spoje (zejména na tepelně ovlivněnou oblast, ochranu kořene svarové lázně, stabilitu elektrického oblouku, výslednou kvalitu svarového spoje a mechanické vlastnosti). Právě svařovacím přípravkům a ochranným plynům se věnuje praktická část práce a laboratorní experiment.

Cílem práce je navázat na diplomovou práci Ing. Slabého [0], který se domívá, že změnou ochranného plynu, lze zvýšit svařovací rychlost a minimalizovat některé vady (neprůvar, propad svarové lázně, vruby). Práce má stanovený cíl porovnat ochranné plyny (argon a jeho směsi), které lze při svařování TIG austenitických korozivzdorných ocelí použít, vylepšit proces automatického svařování plechů o tloušťce 1 mm z materiálu 1.4301 a najít vhodnou kombinaci ochranného plynu, přípravků a svařovacích parametrů, aby se dosáhlo požadované kvality svarového spoje, při co nejvyšší svařovací rychlosti.

2 Korozivzdorné oceli

Korozivzdorná ocel je všeobecný název pro oceli nepodléhající korozi, a to především korozi elektrochemické v oxidačních prostředích. Jinak řečeno se jedná o oceli, které nepotřebují speciální povrchovou úpravu, aby byla zajištěna jejich korozní odolnost. Díky chemickému složení, především legujícím prvkům se na povrchu korozivzdorných ocelí vytváří takzvaná pasivní vrstva, které se neustále obnovuje a chrání ocel před oxidací.[1]

Podle chemického složení se dělí na oceli chromové a chromniklové, podle fázového složení na feritické, martenzitické a austenitické. Některé druhy těchto korozivzdorných ocelí jsou i dvojfázové [2,3]

2.1 Chromové korozivzdorné oceli

Tyto oceli obsahují více než 12% chromu, což vede ke zvýšení elektrochemického potenciálu z $-0,2\text{eV}$ na $+0,6\text{eV}$

2.2 Chromniklové korozivzdorné oceli

Tyto oceli jsou legovány 13-25% chromu, 4-40% niklu, dalšími feritotvornými prvky (niob, titan, molybden) a prvky austenitotvornými (mangan, měď). Na základě vhodné kombinace těchto prvků lze získat ocel požadovaného fázového složení (např. austenitická, austeniticko-feritická).

2.3 Feritické korozivzdorné oceli

Hlavním znakem feritických korozivzdorných ocelí je zachování feritické struktury i při teplotách běžného tepelného zpracování od 750°C do 900°C . V důsledku zachování feritické struktury, nejsou tyto oceli kalitelné, nedochází k přeměně feritu na austenit, a tudíž nelze v rámci kalení vyloučit martenzitickou strukturu (předpoklad kalitelnosti). Za zachování feritické struktury jsou zodpovědné především legující prvky, konkrétně chrom. Chrom je obsažen ve feritické nerezové oceli podílem 17-26 %. Protože rozpustnost uhlíku ve feritu je nižší než v austenitu, uhlík není v přesycené martenzitické formě vylučován jako austenit, ale ve formě karbidů a nitridů chromu.[2]

Feritické korozivzdorné oceli křehnou při teplotách nad 700°C při dlouhodobém ohřevu a při teplotách kolem 475°C pomalým ochlazováním. Krátkodobě se žíhají cca 30 min při teplotě 750°C – 850°C a následně zrychleně ochlazují. Po žíhání mají sníženou mez kluzu (250 – 350MPa).[3]

Při teplotách 350°C až 500°C dosahovaných například při svařování dochází ke snížení jejich houževnatosti a tažnosti. Odolávají působení páry a zředěné HNO₃. Feritické nerezové oceli se dělí dle obsahu uhlíku a chromu.

- oceli s obsahem chromu 11,5- 13,5 %, uhlíkem do 0,08 %, jsou legovány feritotvornými prvky např. hliníkem, titanem nebo niobem, mají potlačenou austenitickou oblast a tedy i martenzitickou přeměnu.
- oceli s obsahem chromu 16-18 %, uhlíkem do 0,1 % se stabilizací titanem případně niobem a legované molybdenem.
- oceli s obsahem chromu 20-30 %, uhlíkem 0,002- 0,2 % mají jednu z nejvyšších odolností proti korozi; pokud jsou legovány 0,5-4 % molybdenem dosahují nízké přechodové teploty až při -40 °C. [2]

2.4 Martenzitické korozivzdorné oceli

Martenzitické oceli obsahují 0,1 až 1,0 % uhlíku a současně 12 – 18 % chromu. Podíl chromu postupně vzrůstá s rostoucím podílem uhlíku. Tyto oceli jsou samokalitelné, ale obvyklejším zpracováním je kalení z teplot 1000°C - 1050°C do oleje. Žíhají se při teplotách mezi 650°C – 750°C pro získání feritické struktury s karbidy. Popouští se při teplotách 650°C až 750°C pro martenzitické korozivzdorné oceli s obsahem uhlíku do 0,4 % a 200°C pro oceli s obsahem 0,4 – 1% uhlíku. Tyto oceli jsou obtížně svařitelné, protože vyžadují přehřev a ihned po svařování žíhání. Postupným kalením a popouštěním lze dosáhnout u těchto nerezových ocelí mezi pevnosti až 2000MPa. [2,3]

2.5 Austenitické korozivzdorné oceli

Austenitickými se tyto oceli nazývají především kvůli austenitické struktuře, kterou dosahují za normálních teplot, tak i při teplotách pod bodem mrazu. Vyznačují se nízkou mezí kluzu (230-300MPa) a poměrně vysokou tažností (45-65 %). Jsou proto vhodné především k tváření za studena, jehož vlivem lze dosáhnout zvýšení meze kluzu na 510–900 MPa, při snížení tažnosti o 10-25%. Jsou nemagnetické, avšak podíl zbytkového feritu (3-10%) může způsobit slabé magnetické vlastnosti.[2]

V důsledku tepelných vlivů, například svařování s následným pomalým ochlazením na vzduchu mohou na hranicích austenitických zrn precipitovat karbidy Cr_{23}C_6 , které jsou příčinou vzniku mezikrystalové koroze. Mezikrystalové korozi lze předejít například nízkým obsahem uhlíku (do 0,02%) v oceli nebo příměsí legur titanu a niobu.[2,3]

Aby se předešlo bodové a štěrbinové korozi, legují se austenitické nerezové oceli křemíkem, molybdenem a dusíkem. Korozivzdorné austenitické oceli se vyrábějí v následujících třech skupinách.

- chróm-niklové oceli s 0,01–0,15 % uhlíku, 12–25 % chrómu, 8–38 % niklu, s možnými dalšími legujícími prvky - dusík, molybden, měď, křemík a stabilizované titanem a niobem
- chróm-mangan-niklové s 0,02–0,15 % uhlíku, 12–22 % chrómu, 5–12 % manganu, 3–8 % niklu, s možnými dalšími legujícími prvky - dusík, molybden a měď, stabilizované titanem a niobem
- chróm-manganové s 0,02–0,08 % uhlíku, 10–18 % chrómu, 14–25 % manganu, 3–8 % niklu, s možnými dalšími legujícími prvky - dusík, molybden a měď, stabilizované titanem a niobem

Nejrozšířenější jsou korozivzdorné oceli s obsahem 0,08 % uhlíku, 18 % chrómu a 10 % niklu, které se nejčastěji používají v potravinářském průmyslu. Jsou dobře odolné vůči solným roztokům a živočišným produktům a mechanickému opotřebení. Zároveň jsou dobře čistitelné, například vodou, párou, alkalickými roztoky a kyselinou dusičnou.[2]

2.6 Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli

Vzhledem k tomu, že se tyto oceli skládají ze dvou charakteristických složek, často se označují jako oceli duplexní. Podíl jak feritu, tak austenitu se může pohybovat mezi 30-50% v závislosti na výsledné aplikaci a reguluje se feritotvornými popř. austenitotvornými prvky. Navíc kombinací těchto dvou složek můžeme dosáhnout žádoucího jemnějšího zrna ve struktuře. Tato duplexní ocel v omezené míře kombinuje výhody jak feritických tak austenitických ocelí. Rovněž vykazuje lepší svařitelnost a její mez kluzu je vyšší než u austenitických ocelí (400 – 500 MPa). [2,3]

3 Korozivzdorná ocel 1.4301

3.1 Značení a chemické složení

Tabulka 1: Procentuální zastoupení legujících prvků dle EN 10088 a značení oceli 1.4301 dle užívaných norem [4]

Chemické složení – obsah legujících prvků dle EN 10088 [%]							
C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	0,11	17,50-19,50	8,00-10,50
Značení dle užívaných norem							
EN 10088, DIN 17455	AISI (USA)		JIS (Japonsko)		ČSN		
X5CrNi18-10 (1. 4301)	304		SUS 304		17 240		

3.2 Mechanické vlastnosti

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti oceli DIN 1.4301 [4]

Označení	Pevnost	Mez skluzu		Tažnost	Svařování	Tažnost	Korozní odolnost
	R _m [Mpa]	R _{p0,1} [Mpa]	R _{p0,2} [Mpa]	A 50 [50%]			
1.4301	540-750	260	230	45	3	5	3

Kromě výše uvedených charakteristik je ocel nekalitelná a nemagnetická. Při tváření nebo nesprávném třískovém obrábění má sklon ke zpevnění. Zpevnění je zapříčiněno přetvoření austenitu na martensit, který zvyšuje pevnost a snižuje tažnost a houževnatost. U plechů do tloušťky do 4 mm je tato ocel nemagnetická. Od tloušťek nad 80 mm se může vyskytovat částečná magnetovatelnost v oblasti jádra. Deformační i zbytkový martensit lze odstranit žíháním. Změny po tváření nemají vliv na korozivzdornost a svařitelnost.[4]

3.3 Korozní odolnost

Ocel DIN 1.4301 odolává korozi v běžných korozních prostředích (voda, slabé kyseliny a alkálie, velkoměstské atmosféry). Je náchylná k mezikrystalické korozi v oblasti tepelného ovlivnění od teploty 450°C, například při svařování.[4]

3.4 Technologická zpracovatelnost

Ocel je svařitelná, ale v oblasti svaru náchylná k mezikrystalické korozi. U průvarů nad 5 mm je nutno svařenec vyžít. Lze ji zpracovat stříháním, ohýbáním a tažením. Vykazuje dobrou třískovou obrobitelnost a je lešitelná.[4]

3.5 Využití

Využívá se na běžné produkty k obecnému použití, například: gastronomická zařízení, vodárny, vnější konstrukce, externí architektura atd. Chemické složení této oceli vyhovuje normě pro použití na práci s potravinami a pitnou vodou.[4,5]

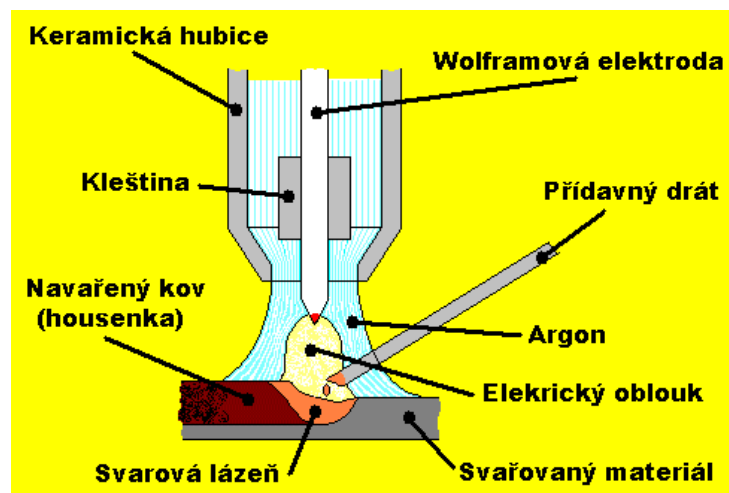
4 Metoda TIG

4.1 Princip a popis metody

Metoda TIG neboli metoda svařování netavící se elektrodou v atmosféře ochranného, inertního plynu je jednou z metod tavného obloukového svařování. Při obloukovém svařování hoří elektrický oblouk mezi elektrodou a materiálem, který je svařován v důsledku elektrického oblouku a ionizace plynu atmosféry, ve které se svažuje. [6,7,8,14]

Terminologie z hlediska názvů a označení metody TIG je v několika jazycích rozdílná. Zkratka TIG pochází z angličtiny a znamená tungsten inert gas (Thungsten - wolfram, Inert – inertní, Gas – plyn). Často se v praxi lze setkat i s označením WIG (Wolfram Inert Gas), které pochází z němčiny. V USA se pro tuto metodu vžilo označení GTAW (Gas Thungsten Arc Welding). Dle normy ISO 4063 se tato metoda značí číslem 141. Původně se metoda nazývala Heliarc, a to podle helia, které se dříve používalo jako ochranná atmosféra. [8]

Jak už bylo řečeno, je metoda TIG metodou obloukového svařování, při kterém hoří elektrický oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem v prostředí inertního plynu, viz obrázek 1.



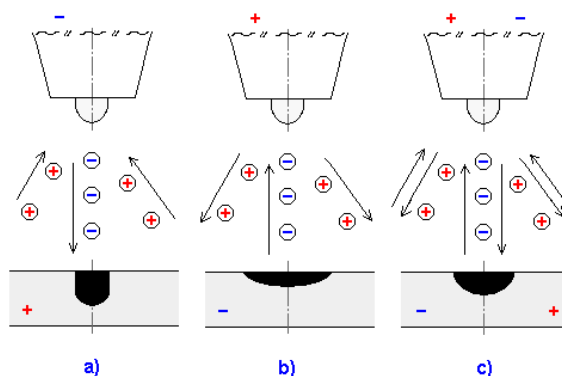
Obrázek 1: Princip metody TIG [8]

4.2 Parametry charakterizující svařování metodou TIG

Volba vhodných svařovacích parametrů má zásadní vliv na výslednou stabilitu hoření oblouku, velikost průvaru a také na dosaženou svařovací rychlost při zachování požadované kvality svaru. [7,8]

Základními parametry při svařování metodou TIG jsou svařovací napětí, svařovací proud, svařovací rychlost, materiál, ze kterého je zhotovena neodtavující se elektroda a samozřejmě volba ochranné atmosféry. Pokud svařujeme za pomoci přídavného materiálu, patří mezi základní svařovací parametry také rychlost podávání drátu, jelikož určuje množství dodaného materiálu do svarové lázně a tím výrazně ovlivňuje její objem a stabilitu. Svařovací proud ovlivňuje hloubku závaru. Čím vyšší je proud, tím hlubší je závar. Závislost svařovacího proudu a hloubky závaru není lineární, ale téměř exponenciální. Velikostí proudu je také ovlivněna velikost svařovacího napětí. Pokud je udržován oblouk o konstantní délce a zvyšuje se proud, roste i napětí. [8]

Pro svařování metodou TIG lze využít zdroj stejnosměrného (DC) i střídavého (AC) proudu. Podmínkou pro použití je strmá statická volt-ampérová charakteristika. Pokud se volí stejnosměrný proud, je možno svařovat s použitím takzvané přímé a nepřímé polarity. Při svařování přímou polaritou je netavící se elektroda hořáku připojena na minus pól zdroje a svařovaný materiál na plus pól zdroje. V případě nepřímé polarity je zapojení opačné. Plus pól zdroje je připojen na netavící se elektrodu hořáku a minus pól na svařovaný materiál. Dále je možno použít stejnosměrný proud s konstantním nebo pulsujícím průběhem v čase. Pokud je použit střídavý proud, polarita se v čase mění. Na níže uvedeném obrázku je znázorněno, jak polarita ovlivňuje hloubku závaru. [9]



Obrázek 2: Princip hoření oblouku při různých zapojeních, a) DC+, b) DC- c) AC [9]

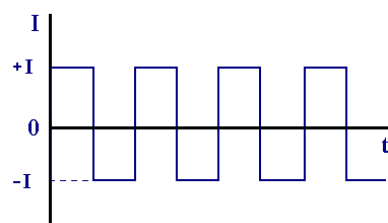
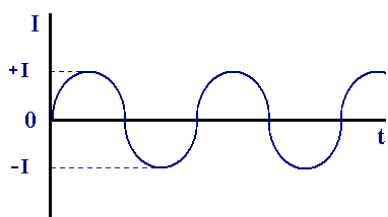
Pokud se svařuje stejnosměrným proudem, používá se téměř výhradně zapojení s přímou polaritou. Na záporné elektrodě (svařovacím hořáku) vzniká 1/3 celkového tepla oblouku a na kladné elektrodě (základním materiálu) vznikají zbylé 2/3 tepla. Více tepla je tudíž vneseno do základního materiálu. V praxi to znamená vyšší průvar v důsledku lepšího tavení základního materiálu a tvorbu úzkých svarů s velkou hloubkou závaru. Wolframová elektroda není při tomto zapojení tolik tepelně namáhána. Hlavní nevýhodou zapojení metodou přímé polarity je, že neumožňuje takzvaný čistící efekt oblouku, proto ji nelze použít pro kovy, které na povrchu tvoří vrstvy oxidů (např.: hliník). Přímá polarita se využívá pro svařování většiny ocelí, od konstrukční až po korozivzdornou a také pro materiály z niklu, titanu a mědi.[7,9]

Při zapojení s nepřímou polaritou je netavící se elektroda vystavena vyššímu tepelnému namáhání, cca 1/2 veškerého tepla a může se stát, že se elektroda začne odtavovat. V praxi se v omezené míře využívá především proto, že poskytuje výše zmíněný čistící efekt. Díky této metodě je možno svařovat i materiály tvořící oxidickou vrstvou na povrchu, kterou lze obloukem odstranit. Touto metodou zapojení lze svařovat pouze tenké materiály, jelikož není možné použít vysoký svařovací proud a je nutno dbát na chlazení wolframové elektrody. Svary zhotovené zapojením s nepřímou polaritou jsou mělké a široké, viz obrázek 2.[7,9]

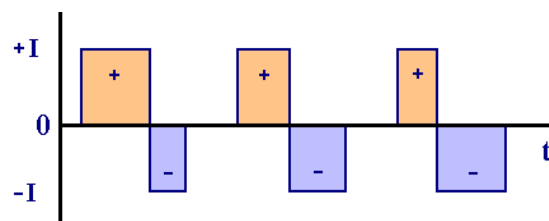
Čistící efekt odstraňuje z povrchu svařovaného materiálu oxidy, které se zde nacházejí v důsledku korozní oxidace. Typickým příkladem materiálu s oxidickou vrstvou je hliník. Oxidy na povrchu mají cca 3x vyšší teplotu tavení než samotný materiál a jsou nevodivé. Aby byl vytvořen svar odpovídající kvality, je třeba tyto oxidy odstranit. V případě zapojení s nepřímou polaritou na základním materiálu je příčinou odstranění oxidů při čištění elektrickým obloukem katodová skvrna. Skvrna se pohybuje po základním materiálu, vyhledává místo s nejnižší emisní energií a nakonec oxidy odpaří. [9]

Při svařování střídavým (AC) proudem dochází ke konstantní změně polarity. Střídavý proud kombinuje výhody čistícího efektu nepřímého DC zapojení a hlubokého průvaru přímého DC zapojení. Jednoduše řečeno se při hoření oblouku střídají fáze „čištění“ a „svařování“.

Dříve se využívalo sinusového průběhu proudu v čase s frekvencí 50 Hz. Zdroje neumožňovaly měnit poměr mezi kladnou a zápornou polaritou (obrázek 3). Důsledkem byl zbytečně velký čistící efekt a zbytečné namáhání netavící se elektrody. Dnešní svařovací zdroje jsou schopny dosáhnout obdélníkového průběhu sinusoidy a umožňují měnit frekvenci polarity, viz obrázek 4. [9]



Obrázek 3: Průběh proudu TIG – AC [9]



Obrázek 4: Změna frekvence polarity - AC proud [9]

4.3 Svařovací elektrody a zdroje při metodě TIG

Pro svařování metodou TIG se používají elektrody z čistého wolframu nebo z wolframu legovaného oxidy lanthanu, zirkonu a ceria. Pro snadné rozlišení jednotlivých druhů elektrod se používá barevné označení, které je na jednom konci elektrody. [7,10]

Tabulka 2: Chemické složení a barevné značení wolframových elektrod [7]

Označení elektrody	Barva	Legování
WP	zelená	čistý wolfram 99,8%
WT 10	žlutá	thorium 1% ThO ₂
WT 20	červená	thorium 2% ThO ₂
WT 30	fialová	thorium 3% ThO ₂
WT 40	oranžová	thorium 4% ThO ₂
WC 20	šedá	cerium 2,0% CeO ₂
WL 10	černá	lanthan 1,0% LaO ₂
WL 15	zlatá	lanthan 1,5 % LaO ₂
WL 20	modrá	lanthan 2,0% LaO ₂
WZ 08	bílá	zirkon 0,8% ZrO ₂

Elektroda „WP“ je vyrobena z čistého wolframu. Vhodná je především pro svařování hliníku při použití AC proudu, jelikož udržuje dobrou stabilitu oblouku. Nevhodná je při použití DC proudu. Jako jediný druh elektrody se nebrousí do špičky.

Elektroda „WT“ obsahuje kromě wolframu 1-4 % thoria ve formě ThO₂. Se stoupajícím obsahem thoria se zlepšuje zapalování oblouku, trvanlivost elektrody a velikost možného proudového zatížení. Využití tyto elektrody nacházejí při svařování korozivzdorných a vysoce legovaných ocelí. Nevýhodou je zdravotní riziko při použití. Se vzrůstajícím obsahem thoria, roste i radioaktivita. Při svařování „WT“ elektrodami a při jejich broušení dochází k uvolňování alfa částic, které se usazují na plicích a zvyšují riziko vzniku rakoviny. Právě vlivem nežádoucích zdravotních dopadů při používání „WT“ elektrod se pomalu přechází na elektrody „WC“ a „WL“. [10]

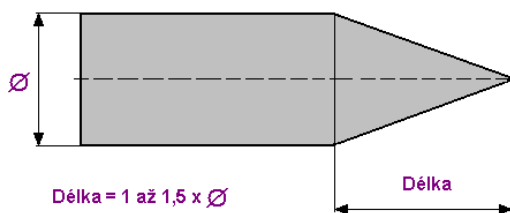
Elektroda „WC“ neboli cerovaná elektroda je univerzální elektrodou téměř pro všechna použití. S „WC“ elektrodami lze svařovat AC i DC proudem legované i nelegované oceli, slitiny titanu, hliníku niklu a mědi. Tyto elektrody mají podobné vlastnosti jako „WT“ elektrody, ale nezatěžují zdraví svářeče. [10]

Elektroda „WL“ neboli elektroda s příměsí lanthanu má stejně jako elektroda „WC“ univerzální použití. S touto elektrodou lze svařovat AC i DC proudem. V oblastech svařování při nízkém proudu dokonce svými vlastnostmi převyšují i elektrody cerované. Elektroda „WL“ je vhodná především pro automatizované svařování. [10]

Elektroda „WZ“ s příměsí zirkonu minimalizuje tvorbu wolframových vměstků ve svarovém kovu. Tato elektroda je vhodná pro svařování AC proudem a to zejména hliníku a jeho slitin. Často se využívá jako náhrada za „WP“ elektrody. [10]

Wolframové elektrody se vyrábějí v průměrech 1,0 - 1,6 - 2,0 - 3,2 - 4,0 - 4,8 - 6,0 a 6,4 mm. Běžně vyráběné délky elektrod jsou 50, 75, 150 a 175 mm. Většina výrobců doporučuje, aby vzdálenost elektrody od svařovaného materiálu byla stejná jako průměr elektrody. Po celou dobu svařování by měla být vzdálenost mezi základním materiálem a elektrodou konstantní. [7,10]

Tvar konce wolframové elektrody ovlivňuje zásadním způsobem kvalitu výsledného svaru. Délka špičky by měla být 1 – 1,5 násobek průměru elektrody. Po broušení by měla být špička elektrody otupena a to zhruba tak, aby byla otupená ploška 10 % průměru elektrody. Otupení na špičce elektrody prokazatelně snižuje zatížení špičky, předchází jejímu upalování a zvyšuje životnost elektrody. Před samotným broušením je nutné zkontrolovat, aby nebyl konec elektrody nalomen nebo naříznut. Samotné broušení se neprovádí ručně, ale na speciálních bruskách, které jsou vybaveny kotouči s co nejjemnějším zrnem, aby se předešlo poškození hranic zrn. Nejlepší pro broušení elektrod je diamantový kotouč s umělohmotnou nebo kovovou texturou. Čím vyšší jemnosti povrchu se při broušení elektrody dosáhne, tím vyšší je její životnost. [10]



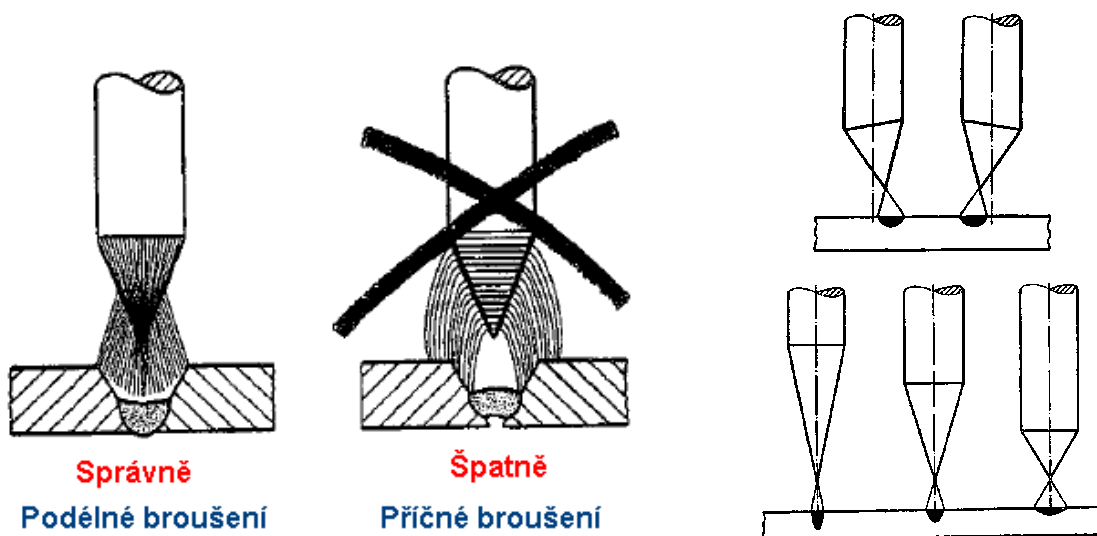
Obrázek 5: Schéma broušení špičky TIG elektrody [10]



Obrázek 6: Bruska na wolframové elektrody [10]

Při samotném broušení je nutné, aby byla elektroda broušena podélně a vrypky po broušení byly rovnoběžné s osou elektrody. Pokud se brousí příčně, rýhy způsobují nestabilní oblouk a dochází k vylamování částiček wolframu. Navíc je zde reálné riziko přelomení elektrody. [10]

Dalším zásadním parametrem při broušení špičky elektrody je vystředění. Pokud není špička elektrody v ose, dochází ke vzniku nestabilního oblouku, což může zejména při automatickém svařování způsobit převedení energie oblouku na nesprávné místo. Spolu s vystředěním je zásadní také úhel nabroušení špičky. Ostrý úhel způsobuje hluboké natavení základního materiálu při poměrně malé ploše svarové lázně. Zatímco tupý úhel přenáší energii na relativně velkou plochu s poměrně malým natavením. Jak bylo výše uvedeno, doporučená délka špičky je asi 1 – 1,5 násobek jejího průměru. [10]



Obrázek 8: Vliv směru broušení elektrody na elektrický oblouk [10]

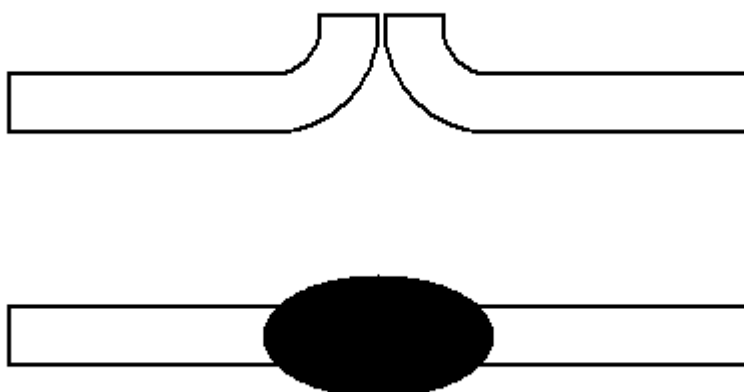
Obrázek 7: Vliv geometrie a excentricity broušení na el. oblouk [10]

4.4 Svařování tenkých plechů

4.4.1 Lemové spoje

Při svařování tenkých materiálů metodou TIG se nemusí nutně používat přídavný materiál, který má obvykle chemické složení podobné materiálu, který je svařován. Pokud jsou svařovány takzvané lemové spoje slabých materiálů, funguje metoda TIG na podobném principu jako svařování plamenem bez přídavného materiálu.

Lemy svařovaného materiálu se v důsledku vysoké teploty, která je v oblouku roztaví, vytvoří svarovou lázeň a po vychladnutí pevné spojení. Hlavní výhodou svařování metodou TIG bez přídavného materiálu je, že do původního materiálu nevnášíme žádný materiál jiného chemického složení. Svar více celistvý, nedochází k vnesení chemických prvků, které původní materiál neobsahuje, a nezmění se ani vlastnosti materiálu. Nevýhodou je především riziko propadu svarové lázně. Tento problém řeší použití podložek. [9]



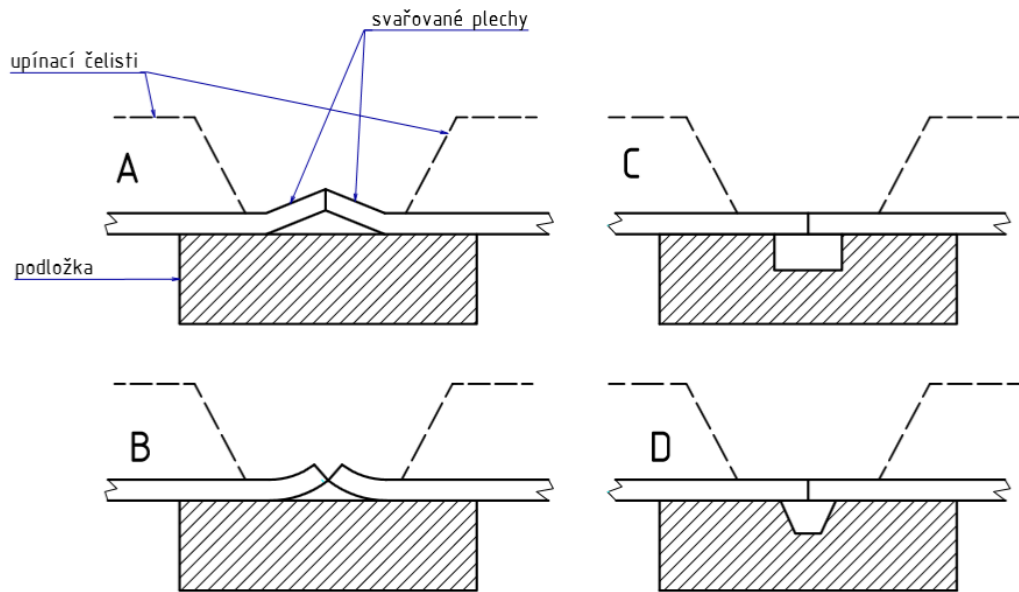
Obrázek 9: Lemový spoj [9]

4.4.2 Svařování s použitím přídavného materiálu

Při svařování za použití přídavného materiálu je do svarové lázně dodáván přídavný materiál většinou ve formě drátu. Tento materiál by měl být chemickým složením co nejbližší materiálu svařovanému. Schéma svařování lze vidět na obrázku 1. Po zapálení oblouku a jeho stabilizaci je do lázně dodáván přídavný materiál. Při chladnutí dochází k tuhnutí a vytvoření svaru. [8]

4.4.3 Ustavení a upnutí vzorků

Vzhledem k deformacím při svařování tenkých plechů je nutno plechy zafixovat do konstantní polohy, aby se při jejich svaření a vnášení tepla do jejich základní struktury nedošlo k jejich deformaci a zároveň aby byly plechy při samotném svařování pevně fixovány a bylo docíleno konstantní vzájemné polohy. Vzájemnou polohu plechů lze zajistit pomocí stehování nebo pomocí upínacích přípravků. Schematické zobrazení přípravků pro upínání plechů je vidět na obrázku 10. [7]



Obrázek 10: Schematické zobrazení upínání plechů [7]

Při upínání plechů do upínacího přípravku je vhodné dodržovat tyto zásady.:

- a. Šířka mezery mezi plechy by měla být konstantní.
- b. Tenké plechy je doporučeno upínat na kovovou podložku.
- c. Tenké plechy vyrobené z materiálů s nízkou tepelnou vodivostí je doporučeno upínat do masivnějších přípravků.
- d. Tenké plechy vyrobené z materiálů s vysokou tepelnou vodivostí je doporučeno upínat na vhodně tvarované podložky, aby se snížil odvod tepla do podložky.
- e. Tenké plechy z feromagnetických materiálů vyžadují speciální upnutí.
- f. Při upínání je doporučeno používat ustavovací přípravky, dorazy a mezerníky.

4.5 Automatizace

Hlavní výhodou automatizovaného svařování metodou TIG oproti svařování ručnímu je tří až pětinasobně vyšší produktivita. Zvýšení produktivity je dáno vyšší postupovou rychlostí hořáku a úsporou doprovodných (obslužných) činností svářeče (například: kontrola svarů nebo změna pozice svářeče). Další výhodou svařování TIG na robotizovaných pracovištích je výrazně lepší kvalita prováděných svarů, jejich pohlednost a kresba.

Nevýhodou robotizovaného svařování TIG jsou především vyšší nároky na přesnost svařovaných dílců. Například u metody MIG/MAG by měla být maximální tolerance velikosti svařovaných dílců $\pm 1,0$ mm. Oproti tomu u metody TIG by rozměrová tolerance neměla překročit $\pm 0,5$ mm lépe $\pm 0,3$ mm v závislosti na tloušťce materiálu. Pokud nejsou tolerance při realizaci robotizovaného procesu dodrženy, je třeba počítat s problémy při odladění technologie. Dosažení požadované přesnosti svařovaných dílců lze usnadnit především použitím CNC výrobních zařízení (děličky, ohýbačky apod.). [11]

Při samotné realizaci automatizovaného svařovacího procesu je třeba mít na paměti cíle, kterých by se při automatizaci mělo dosáhnout. [7]

1. Zvýšení kvality a užitečných vlastností svarových spojů odstraněním nebo snížením vlivu poruchových veličin svařovacího procesu, například kolísání délky oblouku, nepravidelnost postupné rychlosti svařování, nepřesnost vedení hořáku podél svarového spoje, nedostatečná plynná ochrana apod.
2. Zvýšení produktivity svařování TIG pomocí zvyšování svařovací rychlosti a snižování časů pro přípravu.
3. Zvýšení hospodárnosti procesu výroby svarů, například snížením spotřeby přídavného materiálu, případně spotřeby ochranných plynů.
4. Snížení podílu lidské práce a nahrazení prací strojovou. Jedná se především o problém hledání kvalifikovaných svářečů, kterých je v dnešní době nedostatek.
5. Rozšíření obsahu průmyslových aplikací automatizovaného svařování TIG a to především pro těžko svařitelné materiály a tenké materiály.

V následujících bodech lze shrnout proč je právě metoda TIG vhodnou metodou pro automatizované svařování. [7]

1. Svařovací oblouk metody TIG je efektivní a vysoce-koncentrovaný zdroj tepla, který je snadné zapálit, ovládat a vypnout.
2. Svařovací oblouk metody TIG je stabilním zdrojem tepla, jehož tepelný příkon nezáleží na vysokém počtu parametrů (napětí, proud, svařovací rychlost).
3. Svařování metodou TIG je „čistá metoda“ při které nevzniká povrchová struska.
4. Svařování metodou TIG není přímo závislé na množství přídavného materiálu dodávaného do svarové lázně.

5. Svařovací oblouk metody TIG pomocí pulsního proudu umožňuje velmi dobře regulovat množství vneseného tepla do svaru. Díky tomu lze svařovat i tenké materiály (0,25 – 1 mm).

5 Ochranná atmosféra pro svařování metodou TIG

Všeobecné chemické a fyzikální vlastnosti plynů užívaných při svařování metodou TIG jsou uvedeny v tabulce níže. [12]

Tabulka 3: Chemické a fyzikální vlastnosti plynů pro metodu TIG dle [12]

Druh plynu	Chemická značka	Hustota ^a (vzduch=1,293 kg/m ³)	Poměrná hustota ^a ke vzduchu	Bod varu při 0,101 MPa C°	Reaktivita při svařování
Argon	Ar	1,784	1,380	-185,9	Inertní
Helium	He	0,178	0,138	-268,9	Inertní
Oxid uhličitý	CO ₂	1,977	1,529	-78,5 ^b	Oxidační
Dusík	N	1,251	0,968	-195,8	Málo reaktivní ^c
Vodík	H	0,090	0,070	-252,8	redukční

^a Stanoveno při 0 C° a 0,101 MPa (1,013 bar)

^b Teplota sublimace (teplota přeměny z pevného do plynného skupenství)

^c Reakce dusíku je různá podle použití a použitých materiálů

Při svařování metodou TIG je prostřednictvím plynů zajištěna ochrana svarové lázně, netavící se elektrody a také základního materiálu před škodlivými účinky vzdušné atmosféry (naplynění, oxidace). Současně má ochranná atmosféra příznivý vliv na zapalování oblouku, jeho hoření a stabilitu. Ochranná atmosféra má také nezanedbatelný vliv na průvar, tepelný výkon a životnost svarového spoje. Dle [7,12], lze rozdělit plyny používané při TIG svařování do třech skupin.:

- | | | |
|----------------------|--------------------------------|----------|
| 1. inertní plyny | (argon, helium a jejich směsi) | značka I |
| 2. redukční plyny | (argon + vodík, vodík + dusík) | značka R |
| 3. nereagující plyny | (dusík) | značka N |

Inertní plyny se využívají především jako tzv. primární ochranná atmosféra. Nejčastěji se tato ochrana vytváří vytékáním plynu z dýzy hořáku. Nereagující plyny zabezpečují tzv. sekundární ochranu míst, která byla vyhřáta na vysoké teploty a primární ochrana je nemůže obsáhnout. Mezi tato místa patří nejčastěji kořen svaru. Sekundární ochrana je zabezpečována v některých případech i při chladnutí svaru a to především u materiálů náchylných k oxidaci. (např. titan, nikl). [7]

5.1 Inertní plyny

5.1.1 Argon

Argon (Ar) je inertní, jednoatomový plyn bez barvy, chutě či zápachu. Vykazuje malou tepelnou vodivost a ionizační potenciál je 15,8 eV. Právě tyto dvě charakteristiky velice příznivě ovlivňují hoření oblouku v argonové ochranné atmosféře. Oblouk v argonové atmosféře vykazuje snadné zapalování a dobrou stabilitu. Tento plyn má navíc vyšší hustotu než atmosférický vzduch, což například při svařovací poloze PA nebo PB zvyšuje efektivitu. Argon je dodáván v následujících čistotách: [7, 14, 15]

Tabulka 4: Značení a čistota dodávaného argonu [7,12]

Označení:	Procentuální podíl argonu:
Argon 4,6	99,996 %
Argon 4,8	99,998 %
Argon 5,0	99,999 %

Argon s nižší čistotou se vyrábí také, ale jeho používání při svařování metodou TIG se nedoporučuje. Se vzrůstající čistotou Ar roste i cena.

Technický argon je vyráběn ze vzduchu, kde je obsažen přibližně jako 0,94% složka. Dodávám je v lahvích s plnicím tlakem 200 až 300MPa vnitřním objemem 20, 40 a 50 litrů.

5.1.2 Helium

Helium (He) je stejně jako argon jednoatomový plyn bez barvy, chutě a zápachu. Hlavní veličinou charakterizující helium je jeho hmotnost. Je přibližně 7x lehčí než vzduch a 10x lehčí než argon. Rovněž vykazuje vyšší tepelnou vodivost a vyšší ionizační potenciál (24,6 eV) než argon. Tyto vlastnosti zhoršují zapalování a stabilitu oblouku v porovnání s ochrannou atmosférou tvořenou argonem. Oblouk v ochranné atmosféře hélia navíc vykazuje nižší teplotu a je možné ho stabilně udržet jen v malých délkách.

Čisté helium se při svařování používá jen zřídka. Z důvodu vyvynutí vysokého tepelného výkonu lze využít pouze pro TIG svařování vysokovodivých hrubých materiálů. Další jeho nevýhodou je nutnost použít zdroj s vysokým napětím naprázdno (nad 100 V), což vyžaduje i specifická bezpečnostní opatření. Vzhledem ke své malé hustotě (0,178 kg/m³) je nutné k ochraně svaru přivádět do svarové lázně ve vysokém množství, což je z ekonomického hlediska poměrně nevýhodné. V praxi se proto používá téměř výhradně v kombinaci s argonem.

Helium je nejčastěji dodáváno v čistotě stupně 4.6 (99,996 %) v 50l ocelových lahvích. Plnicí tlak je přibližně 20 MPa a v lahvi je 9m³ helia. [7.13]

5.1.3 Směsi argon – helium

Směsi argon – helium tvoří ve svařování samostatnou skupinu inertních plynů. Obsah helia v těchto směsích se pohybuje od 1 % až do 95 % He. Poměr argonu a helia se vybírá především dle typu materiálu, který se svařuje. Nejčastěji využívané poměry směsi jsou tyto:

1. Ar – He 70/30 (70% Ar, 30% He)
2. Ar – He 50/50 (50% Ar, 50% He)
3. Ar – He 30/70 (30% Ar, 70% He)

S narůstajícím obsahem helia ve směsi se při svařování TIG zvyšuje napětí na oblouku, tekutost svarové lázně a tepelný výkon. Tuto vlastnost lze využít zejména při mechanizovaném TIG svařování. V důsledku vyššího tepelného výkonu lze totiž svařovat vyšší rychlostí než za použití pouze čistého argonu.[7,13]

5.2 Redukční plyny

5.2.1 Směsi argonu s heliem, vodíkem a dusíkem

Čistý argon a směsi argon-helium mohou být využity jako ochranná atmosféra pro téměř všechny druhy ocelí. Ve specifických aplikacích se do ochranné atmosféry přidává v malém množství i dusík případně vodík.[7]

Přidáním 2-8% vodíku nebo 5-10% dusíku do argonu namísto helia lze dosáhnout vyšší tekutosti svarové lázně a vyššího tepelného výkonu než ve směsi argon-helium, což zvyšuje rychlost svařování. Nevýhodou je, že lázeň je náchylná k propadání. Vodík/dusík se jako složka ochranného plynu využívá především při automatizovaném svařování. Vodík jako příměs však nelze použít pro feritické, martenzitické a duplexní oceli. Dusík jako prvek v austenitických korozivzdorných ocelích působí austenitotvorně a stabilizuje chemické složení, tudíž je výhodné ho do svarové lázně dodávat. Při svařování austenitických ocelí, totiž dochází k destabilizaci chemického složení a obsah chromu se může snížit až o 3 %.[7]

Tabulka 5: Doporučené plyny pro TIG svařování různých typů korozivzdorných ocelí [13]

Typ korozivzdorné oceli					
	Austenitická	Duplexní	Super-duplexní	Feritická	Austenitická – vysoce legovaná
Ar	•	•	•	•	•
Ar + He ^a	•	•	•	•	•
Ar+2-5 % H ₂ ^{a,b}	• ^b	-	-	-	• ^b
Ar+1-2 % N ₂	-	•	•	-	-
Ar+30 % He +1-2% N ₂	-	•	•	-	-
<p>Pozn.: ^a – zlepšuje tok plynu v porovnání s čistým Ar</p> <p>^b – preferované pro automatizované svařování, vyšší svařovací rychlost</p>					

5.3 Sekundární ochrana

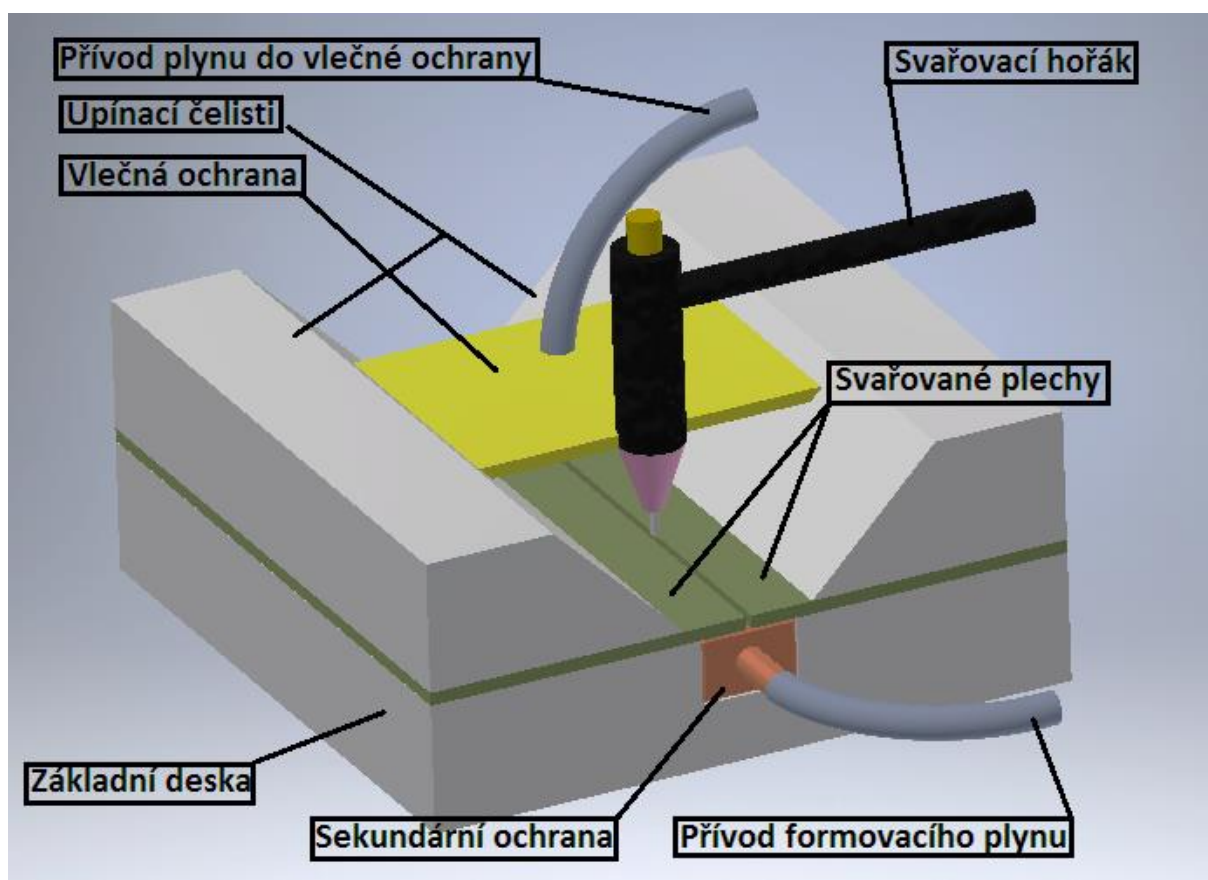
Pro sekundární ochranu kořene nebo vysoce ohřivané oblasti základního materiálu při svařování TIG lze využít všechny druhy ochranných plynů (inertní, redukční, nereagující).[7]

Především z hlediska cenové výhodnosti se často používá tzv. formovací směs, která je přiváděna do kořenové vrstvy. Tuto směs tvoří nejčastěji 95 % dusíku + 5 % vodíku. Často je také používán čistý argon, který je do kořenové oblasti svaru přiváděn za pomoci specifických přípravků. Pro austenitické oceli je výbornou alternativou čistého argonu směs argonu s malým obsahem vodíku nebo dusíku.[13]

Použití jiné sekundární atmosféry, než je atmosféra primární je nejčastěji podmíněno ekonomickými aspekty. [13]

5.4 Vlečná ochrana

Při svařování vysokými svařovacími rychlostmi dochází často k tomu, že ochranný plyn vytékající z dýzy hořáku nestačí chránit natavenou svarovou lázeň a okolí svaru, ty jsou tak vystaveny vlivu okolní atmosféry. Aby se podařilo zvýšit svařovací rychlost a zároveň zabránit přístupu atmosférického vzduchu ke svarové lázni, je často používána tzv. vlečná ochrana neboli „vlečka“. Schéma upínacího přípravku ke svařování tenkých plechů včetně vlečné ochrany lze vidět na obrázku 11.

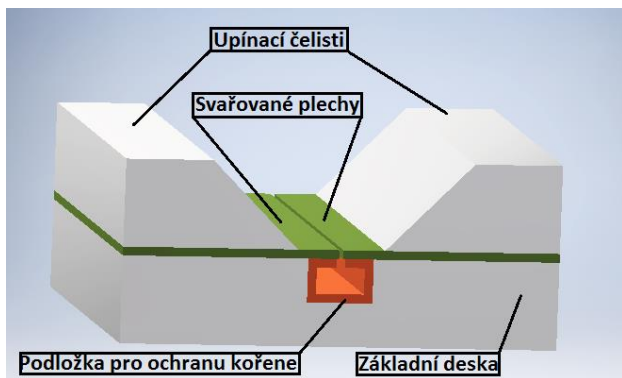


Obrázek 11: Model upínacího přípravku pro svařování tenkých plechů s vlečnou ochranou [7]

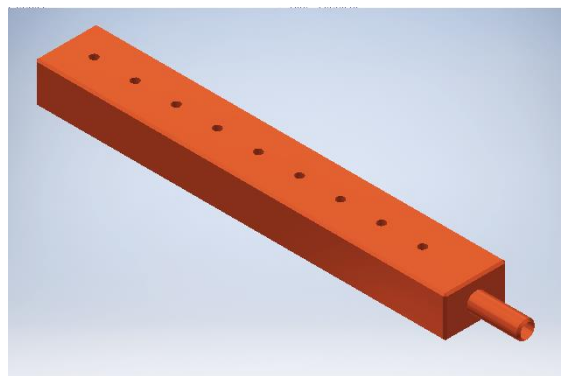
5.5 Zásady při výběru ochranného plynu

Při výběru vhodného ochranného plynu pro vybranou aplikaci svařování metodou TIG je třeba respektovat níže uvedené zásady:[7]

1. Druh a čistota ochranného plynu se volí dle náchylnosti základního materiálu k oxidaci a naplynění.
2. Jako primární ochrana při svařování TIG se používají argon-helium, jejich směsi případně směsi argonu s redukčními prvky. (Pokud je přívod primární ochrany zajišťován pouze výtokem plynu z dýzy hořáku.)
3. Pokud se svařují materiály s vyšší tloušťkou než 5mm je výhodné použít směs argon-helium.
4. Pokud se svařuje metodou TIG plech do tloušťky 5mm používá se jako primární ochrana technický argon přiměřené čistoty. Dle [12] se nepoužívá menší čistota než Argon 4.6.
5. Množství ochranného plynu je třeba vybírat s ohledem na výslednou kvalitu svaru a hospodárnost svařovacího procesu
6. Množství plynu vytékajícího z dýzy hořáku určuje také šířka tepelně ovlivněné oblasti. (pokud není použita vlečná ochrana)
7. Sekundární ochrana se používá především k ochraně kořenové vrstvy svaru, aby zde nedošlo ke vzniku oxidických vrstev.
8. Pokud je sekundární ochrana použita, je třeba její složení přizpůsobit podmínkám svařování a požadavkům na užité vlastnosti svaru (obrázek 12,13).

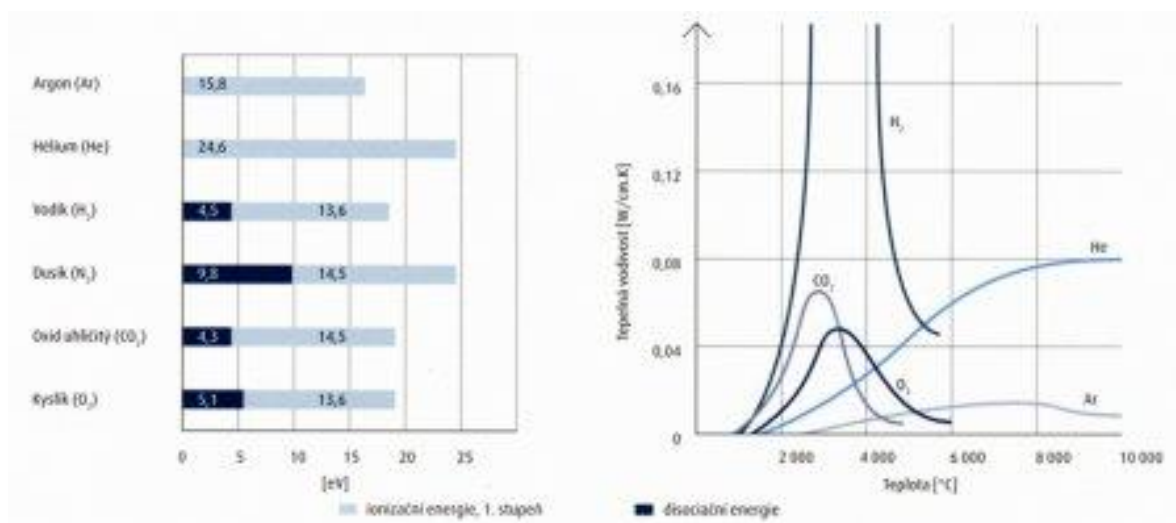


Obrázek 12: Schematický model upínacího přípravku s podložkou pro sekundární ochranu kořene v řezu



Obrázek 13: Model podložky pro sekundární ochranu kořene

5.6 Tepelná vodivost plynů



Obrázek 14: Grafy tepelné vodivosti a ionizačních potenciálů základních plynů užívaných při svařování [17]

Běžně užívané plyny při svařování nejen metodou TIG vykazují různou tepelnou vodivost. Čím nižší má plyn tepelnou vodivost, tím nižší má ionizační potenciál. Lze tedy usoudit, že při použití plynu s nízkou tepelnou vodivostí (argon) hoří oblouk stabilně, snadno se zapaluje, avšak neumožňuje přenést vysoký svařovací výkon. Zatímco při použití například argonu s příměsí vodíku bude oblouk méně stabilní, avšak z důvodu vysoké tepelné vodivosti se do materiálu vnese menší teplo a přeneše se vyšší sv. výkon, což umožní svařovat vyšší sv. rychlostí. [17]

6 Experimentální část

6.1 Úvod

Experimentální část bakalářské práce volně navazuje na diplomovou práci Ing. Slabého „Svařování tenkých korozivzdorných plechů metodou TIG“[0] a na bakalářkou práci p. Švorce „Vliv geometrie elektrody u TIG svařování“, realizovanou současně s experimentem.

Cílem experimentu bylo porovnat ochranné plyny (argon 4.8, argon + 30 % helia, argon + 6% vodíku, argon + 10% vodíku) použitelné pro svařování tenkých plechů z austenitické korozivzdorné oceli, s cílem dosáhnout co nejvyšší svařovací rychlosti.

6.2 Základní materiál

Jako základní materiál byla použita korozivzdorná ocel 1.4301 (dle ČSN 17240), ve formě plechů o tloušťce 1 mm. S využitím posuvného měřítka bylo u získaných vzorků ověřeno, že tloušťka plechu odpovídá s odchylkami maximálně $\pm 0,01$ mm, podrobnosti o chemickém složení materiálu a jeho mechanických vlastnostech jsou uvedeny v kapitole č. 3.

6.3 Přídavný materiál

Jako přídavný materiál byl použit drát od firmy ESAB s označením OK Autrod 347Si. Jedná se o přídavný materiál stabilizovaný pomocí niobu, vhodný ke svařování ocelí řady AISI 347 a 321 např.: 1.4301, 1.4306, 1.4541. Dle informací od výrobce přídavný materiál 347Si zajišťuje odolnost svarového kovu proti mezikrystalické korozi, na kterou je daný typ oceli náchylný. Podrobnější informace o chemickém složení tohoto materiálu a mechanických vlastnostech lze dohledat v tabulce 6.

Tabulka 6: Vybrané charakteristiky přídavného materiálu (firma ESAB) [16]

Chemické složení drátu – OK Autrod 347 Si [%]					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
0,06	0,8	1,80	20,0	10,0	0,70
Použití					
Drát typu 18Cr8Ni pro svařování korozivzdorných ocelí, odpovídajících AISI 347, AISI 321. Svarový kov je odolný proti MKK.					
Vhodnost pro svařování např.: 1.4301, 1.4306, 1.4541, 1.4550, 1.4878					
Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty					
Průměr	Proud	Napětí	Spotřeba plynu	Rychlost podávání	Výkon svařování
[mm]	[A]	[V]	[l*min ⁻¹]	[m*min ⁻¹]	[kg*hod ⁻¹]
0,8	55 - 160	15 - 24	12	4,0 – 17,0	1,0 – 4,1

6.4 Příprava vzorků

Nastříhání a příprava vzorků probíhala v laboratořích Ústavu strojírenské technologie. Plech ve formě tabule o rozměrech 2000 x 1000 mm, byl nastříhán na padacích nůžkách NTE 2000 na vzorky o rozměrech 150 x 70 mm. Následně byly vzorky zbaveny otřepů pomocí pilníku určeného výhradně k úpravě korozivzdorných ocelí. Tím bylo zamezeno kontaminaci svarových ploch částicemi jiného materiálu, viz obrázek 14. Dále byly vzorky

odmaštěny pomocí technického lihu a uskladněny. Bezprostředně před samotným svařováním proběhlo opětovné odmaštění vzorků technickým lihem.

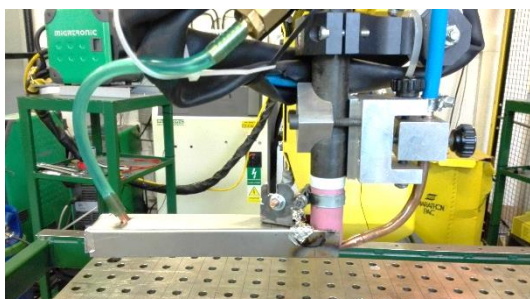


Obrázek 15: Pracoviště pro úpravu vzorků

6.5 Zařízení a pracoviště experimentu

Experiment byl proveden v laboratořích Ústavu strojírenské technologie, konkrétně na pracovišti pro robotické svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. Konkrétní pracoviště je vybaveno 6-ti osým svařovacím robotem Fanuc ArcMate 100iC v kombinaci s otočným stolovým polohovadlem a svařovacími zdroji Migatronic Sigma 400 Pulse pro MIG/MAG svařování a Migatronic Pi 320 AC/DC pro TIG svařování, viz obrázek 18.

Při experimentu byla také použita vlečná ochrana, aby se zajistilo přívod plynu do svarové lázně a jejího okolí i při vysokých svařovacích rychlostech. Vlečná ochrana byla vyrobena z korozivzdorné oceli a uvnitř vybavena drátěnkou, která zabraňuje turbulencím ochranného plynu (obrázek 16,17).



Obrázek 17: Vlečná ochrana použitá pro experiment s přívodem plynu (zelená hadička) a svař. hořákem



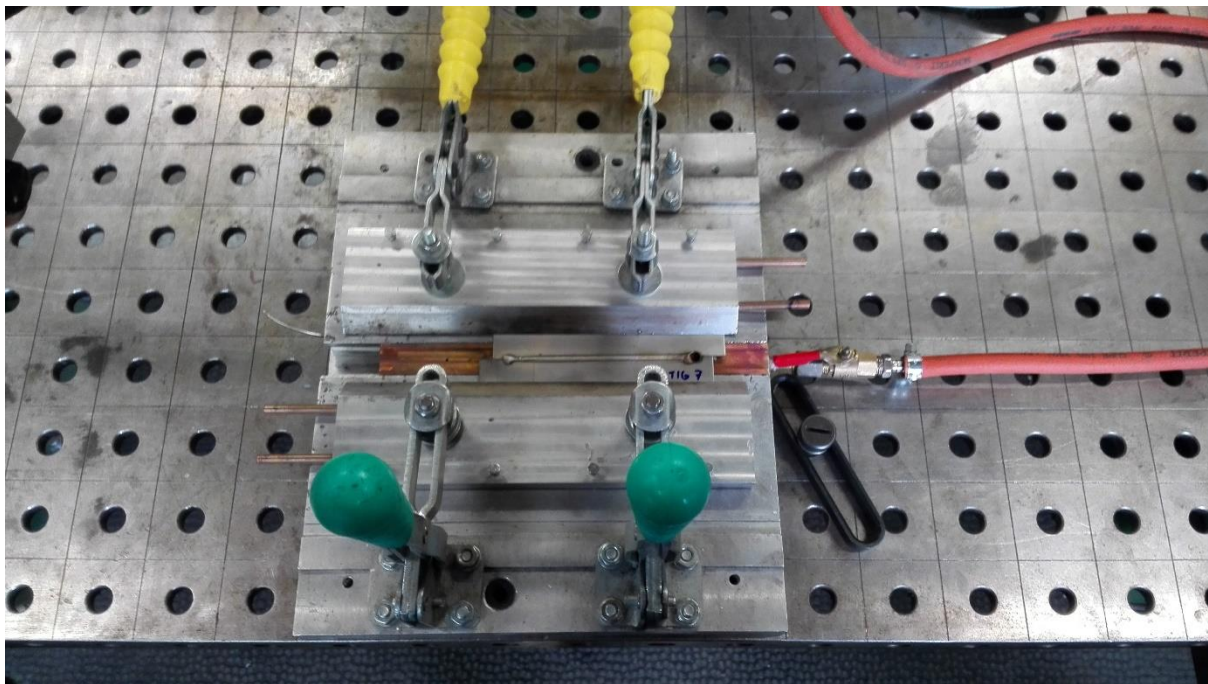
Obrázek 16: Vlečná ochrana s přívodem příd. drátu a drátěnkou



Obrázek 18: Pracoviště experimentu

6.5.1 Upínací přípravek

Jelikož při svařování tenkých plechů je základním problémem jejich sesazení a deformace, která vzniká při svařování, byl sestaven upínací přípravek. Přípravek se skládá z vysouvací měděné podložky, sloužící k přívodu plynu pro ochranu kořene, základní desky, dvojice upínacích čelistí a stavěcím kolíčkům, díky nimž je možné plechy opakovaně sestavit a upnout do stejné pozice, viz obrázek 19.



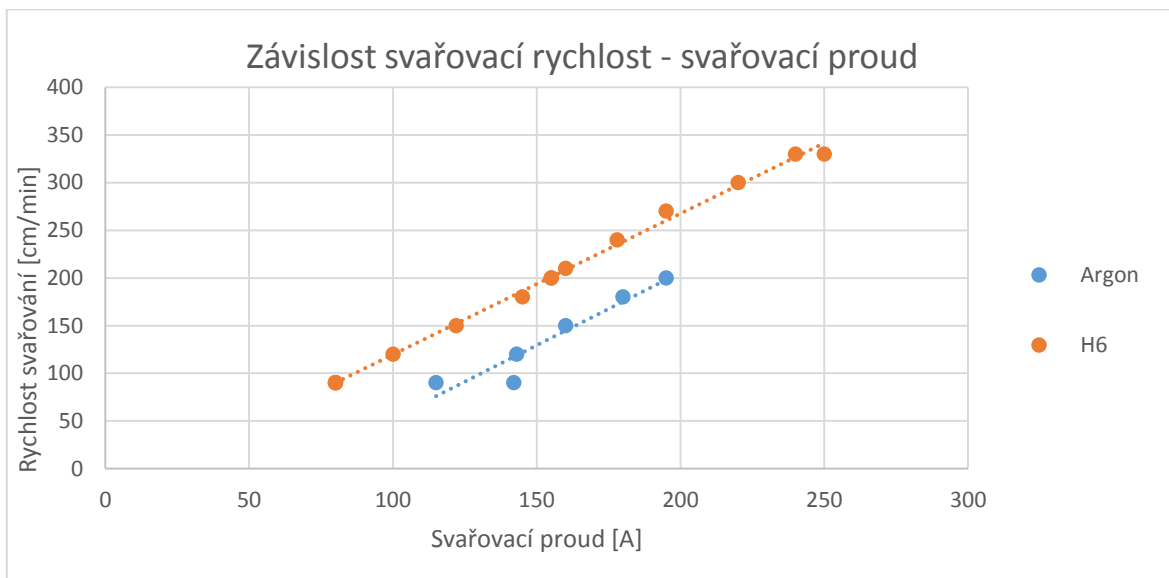
Obrázek 19: Upínací přípravek pro experiment

6.6 Postup a parametry svařování

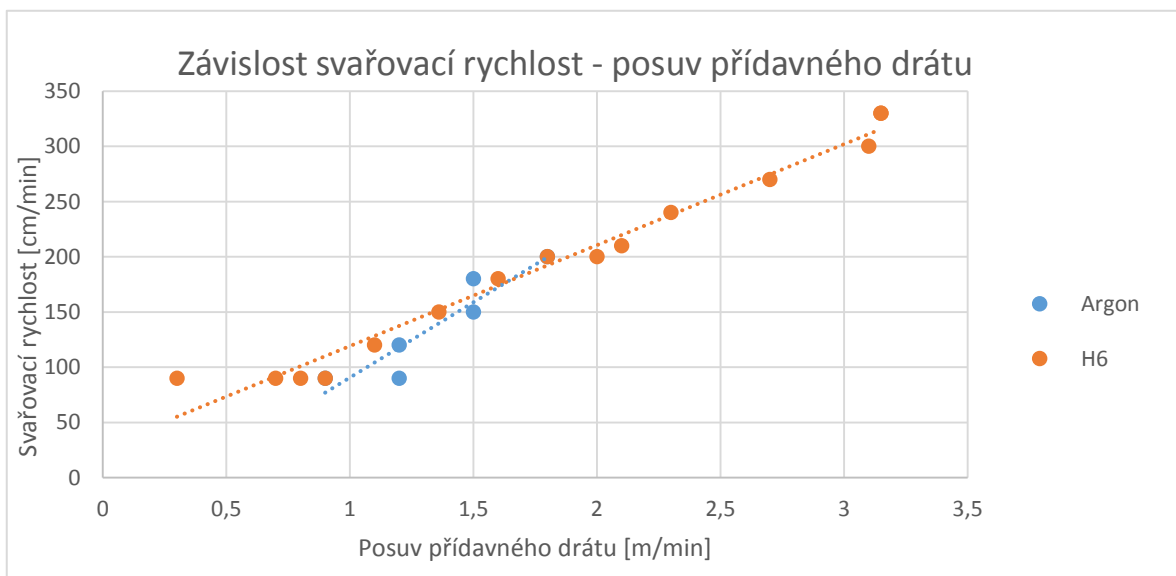
Základní svařovací parametry byly voleny, dle grafické závislosti, která byla vytvořena na základě předchozích experimentů, jenž v rámci svařování tenkých korozivzdorných plechů metodou TIG probíhaly v minulých letech. Jako nezávisle proměnná byla zvolena svařovací rychlost, jako závisle proměnné byly zvoleny svařovací proud a posuv přídatného drátu. Výsledné lineární závislosti lze vidět na grafech níže (graf 1, graf 2). Závislost byla vypracována pro plyny, které byly součástí předešlých experimentů. Jedná se Argon o čistotě 4.8 s označením Varigon S a směs argonu – 94% a vodíku 6%, značenou výrobcem Linde jako Varigon H6.

Veškeré vzorky byly svařeny při pokojové teplotě (21°C) a na všechny byla použita netavicí se elektroda WL20, která byla nabroušena do tvaru 30° + 90° dvojité kužely, radius 8, 90° + nožové ostří (tabulka 7 – vysvětlivky). Prívod přídatného materiálu byl nastaven 1 mm od osy špičky elektrody, aby nedošlo k její kontaminaci.

Základním cílem, bylo dosáhnout co nejvyšší svařovací rychlosti (300 - 400 cm/min). Bylo provedeno několik měření při nižší svařovací rychlosti. Následně u vyšších svařovacích rychlostí byly měněny parametry (svařovací proud, posuv přídavného drátu) a další faktory (geometrie WL20 elektrody – viz popisek tabulek 7, 8), v rámci kterých byla předpokládána zrychlení svařovacího procesu a odstranění vad (vruby).



Graf 1: Závislost svařovacího proudu na svařovací rychlosti



Graf 2: Závislost rychlosti posuvu drátu na svařovací rychlosti

6.7 Argon 4.8

Jako první ochranná atmosféra byl použit argon o čistotě 4.8 s obchodním označením Varigon S. Jako formovací směs byl při použití Varigonu S, i všech následujících plynů použit argon, který byl také přiváděn do vlečné ochrany.

Tabulka 7: Svařovací parametry – Argon 4.8

Plyn v dýze hořáku: Argon 4.8							
Označení vzorku	V _{sv} [cm/min]	I [A]	V _d [m/min]	Průtok plynu vlečkou [l/min]	Průtok plynu podložkou [l/min]	Průtok plynu do dýzy [l/min]	Geometrie elektrody
TIG 1	90	115	0,7	5	5	10	DK
TIG 2	150	160	1,5	5	5	10	DK
TIG 3	150	170	1,5	5	5	10	DK
TIG 4	200	195	1,8	5	5	10	DK
TIG 5	200	205	1,8	5	5	10	DK
TIG 6	250	230	2,2	5	5	10	DK
TIG 7	250	215	2,2	5	5	10	DK
TIG 8	250	215	2,2	5	5	10	R8
TIG 9	250	215	2,2	5	5	10	NO
TIG 10	250	220	2,2	5	5	10	NO
TIG 11	250	215	2,2	5	5	10	NO
TIG 12	250	225	2,2	5	5	10	NO
TIG 13	250	235	2,2	5	5	10	NO
TIG 14	250	250	2,2	5	5	10	NO

*Barevné značení vad na svarech při vizuální kontrole

- Vzorky vyhovující
- Vzorky s neprůvarem kořene
- Vzorky s částečným neprůvarem kořene
- Vzorky s propadem svarové lázně

* Použité geometrie neodtavujících se elektrod

30° + 90° dvojitý kužel (DK)

Radius 8° (R8)

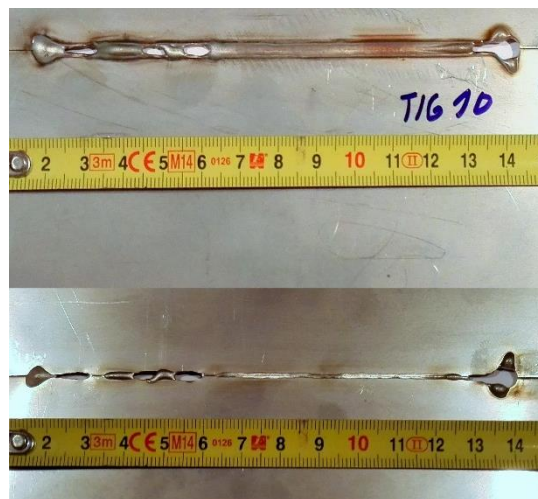
30° + nožové ostří (NO)

* Jelikož změnou svařovacích parametrů nebylo docíleno zvýšení svařovací rychlosti, byla vyzkoušena změna geometrie elektrody.

V tabulce 6 lze pozorovat, že maximální dosažená hodnota svařovací rychlosti při použití Ar 4.8 je 200 cm/min. Při dalším zvyšování svařovací rychlosti vykazovala svarová lázeň nestabilitu a docházelo k neprůvaru kořene, nebo propadu svarové lázně. Svarovou lázeň se nepodařilo stabilizovat ani po změně geometrie wolframové elektrody.



Obrázek 21: TIG 5 - vyhovující vzorec, $v_{sv} = 200$ cm/min



Obrázek 20: TIG 10 - nevyhovující vzorek, $v_{sv} = 250$ cm/min

Vzorkem, který vyhověl vizuální kontrole, je vzorek: TIG 5 (obrázek 20). Lze pozorovat provaření kořene svarové lázně a pravidelnou kresbu svaru. Zároveň lze vidět, že kořenová strana je kovově čistá, protože byla zabezpečena vhodná ochrana.

Vzorkem, který vizuální kontrole nevyhověl, avšak lze na něm pozorovat všechny vady je vzorek TIG 10 (obrázek 19). V pásmu 2 až 6 na přiloženém měřítku došlo k nestabilitě svarové lázně a jejímu propadu. Následně lze mezi ukazateli 6 a 7 pozorovat krátké pásmo neprůvaru kořene. Mezi body 7 a 12 došlo ke stabilizaci svarové lázně a svar lze označit dle vizuální kontroly za vyhovující. Při zhášení oblouku došlo k propadu.

Při experimentu za použití Varigonu S bylo dosaženo maximální svařovací rychlosti 200 cm/min. Lze pozorovat, viz vzorek 10, že svařovací rychlost lze nepatrně zvýšit. Při výšší rychlosti však dochází k nestabilitě oblouku a propadu svarové lázně.

Pro dosažení vyšší svařovací rychlosti, je třeba obloukem přenést vyšší svařovací výkon než při použití argonu. Z toho důvodu se další části experimentu svařovalo s použitím směsných plynů

6.8 Varigon H6

Tento plyn představuje směs 94 % argonu a 6 % vodíku s obchodním označením Varigon H6. Jako ochrana kořene byl při experimentu opět použit čistý argon a zároveň byl tento plyn přiváděn i do vlečné ochrany.

Tabulka 8: Svařovací parametry Varigon H6

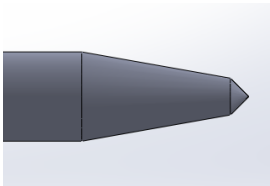
Plyn v dýze hořáku: Varigon H6							
Označení	v _{sv} [cm/min]	I [A]	v _d [m/min]	Průtok plynu vlečkou [l/min]	Průtok plynu podložkou [l/min]	Průtok plynu do dýzy [l/min]	Geometrie elektrody
TIG 15	90	80	0,8	5	5	10	DK
TIG 16	150	120	1,36	5	5	10	DK
TIG 17	200	155	2	5	5	10	DK
TIG 18	270	200	2,7	5	5	10	DK
TIG 19	270	215	2,7	5	5	10	DK
TIG 20	330	260	3,15	5	5	10	DK
TIG 21	400	280	4	5	5	10	DK
TIG 22	400	280	4,5	5	5	10	DK
TIG 23	400	280	4,5	5	5	10	DK

*Barevné značení vad na svarech při vizuální kontrole

- Vzorky vyhovující
- Vzorky s neprůvarem kořene
- Vzorky s částečným neprůvarem kořene
- Vzorky s propadem svarové lázně

* Použité geometrie neodtavujících se elektrod

30° + 90° dvojitý kužel (DK)



Z tabulky 8 lze pozorovat, že maximální dosažená rychlost byla 330 cm/min u vzorku TIG 20. Při zvýšení svařovací rychlosti na 400 cm/min vykazovala svarová lázeň nestabilitu a docházelo k jejímu propadu, případně neprovaření kořene. Ani po změně svařovací rychlosti a rychlosti přívodu drátu, se nepodařilo lázeň stabilizovat.

Při porovnání hodnot z tabulek 6 a 7 lze pozorovat, že použití inertního plynu (argon) s příměsí plynu redukčního (vodík) umožňuje svařovat stejnou rychlostí při cca o 25% nižším svařovacím proudu.



Obrázek 23: TIG 20 - vyhovující vzorek,
 $v_{sv} = 330 \text{ cm/min}$



Obrázek 22: TIG 22 - nevhovující vzorek,
 $v_{sv} = 400 \text{ cm/min}$

Vzorek TIG 20 lze označit za vyhovující. Kořenová strana je kovově čistá bez oxidických vrstev a svrchní část svaru je na pohled rovnoměrná bez vrubů.

Na vzorku TIG 22, je mezi body 3-6 patrné propadnutí svarové lázně. Její následná stabilizace měla za následek neprůvar kořene pozorovatelný mezi body 6 a 13. Velmi pečlivým odladěním parametrů by se rychlosti 400 cm/min pravděpodobně dalo dosáhnout.

6.9 Varigon He30

Dalším použitým plynem byla směs argonu a 30 % helia s obchodním označením Varigon He 30.

Tabulka 9: Svařovací parametry - Varigon He30

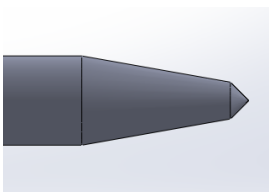
Plyn v dýze hořáku: Varigon He30							
Označení	v _{sv} [cm/min]	I [A]	v _d [m/min]	průtok plynu vlečkou [l/min]	průtok plynu podložkou [l/min]	průtok plynu do dýzy [l/min]	geometrie elektrody
TIG 35	90	80	0,8	5	5	13	DK
TIG 36	90	90	0,8	5	5	13	DK
TIG 37	90	100	0,8	5	5	13	DK
TIG 25	150	122	1,5	5	5	13	DK
TIG 27	200	175	2	5	5	13	DK
TIG 28	200	190	2	5	5	13	DK
TIG 26	200	155	2	5	5	13	DK
TIG 31	230	180	2,2	5	5	13	DK
TIG 30	230	200	2,2	5	5	13	DK
TIG 32	270	200	2,5	5	5	13	DK
TIG 33	270	210	2,5	5	5	13	DK
TIG 34	270	210	2,6	5	5	13	DK
TIG 29	270	220	2,7	5	5	13	DK

*Barevné značení vad na svařech při vizuální kontrole

- Vzorky vyhovující
- Vzorky s neprůvarem kořene
- Vzorky s částečným neprůvarem kořene
- Vzorky s propadem svarové lázně

* Použité geometrie neodtavujících se elektrod

30° + 90° dvojitý kužel (DK)





Obrázek 25:TIG 31 - vyhovující vzorek,
 $v_{sv} = 230 \text{ cm/min}$



Obrázek 24:TIG 32 - nevhovující vzorek,
 $v_{sv} = 270 \text{ cm/min}$

Při svařování plynem Varigon He 30 se podařilo dosáhnout nejvyšší svařovací rychlosti 230 cm/min na vzorku TIG 31 (obrázek 25). Svar vykazuje pravidelnou kresbu, bez viditelně znatelných vrubů. Kořenová část svaru je čistá, provařená a bez oxidických vrstev.

Na vzorku TIG 32 (obrázek 24) lze pozorovat, že došlo ke střídaní propadu svarové lázně a neprůvaru kořene. Změnou svařovacích parametrů (tabulka 9) se nepodařilo dosáhnout zlepšení. Docházelo k propadání svarové lázně a při navýšení rychlosti přívodu přídatného drátu k neprovaření kořene.

6.10 Varigon H10

Jako poslední ochranná atmosféra byl použit plyn označením Varigon H10. Jedná se o směs 90 % argonu a 10% vodíku. Při experimentu se vycházelo především z pozitivních výsledků, dosažených při svařování za použití směsi Varigon H6. Předpokladem bylo, že vyšší procento vodíku ve směsi umožní ještě více zvýšit tepelný výkon v oblouku a dosáhne se vyšší svařovací rychlosti než za použití Varigonu H6.

Tabulka 10: Svařovací parametry Varigon H10

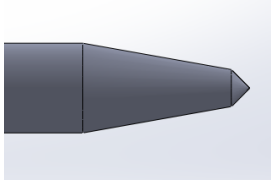
Plyn v dýze hořáku: Varigon H10							
Označení	v _{sv} [cm/min]	I [A]	v _d [m/min]	Průtok plynu vlečkou [l/min]	Průtok plynu podložkou [l/min]	Průtok plynu do dýzy [l/min]	Geometrie elektrody
TIG 38	90	60	0,8	5	5	10	DK
TIG 39	150	100	1,5	5	5	10	DK
TIG 40	200	130	2	5	5	10	DK
TIG 41	270	190	2,7	5	5	10	DK
TIG 42	270	180	2,7	5	5	10	DK
TIG 43	330	210	3,3	5	5	10	DK
TIG 44	330	200	3,2	5	5	10	DK
TIG 45	330	205	3,2	5	5	10	DK
TIG 46	330	205	3,6	5	5	10	DK
TIG 47	330	215	3,6	5	5	10	DK

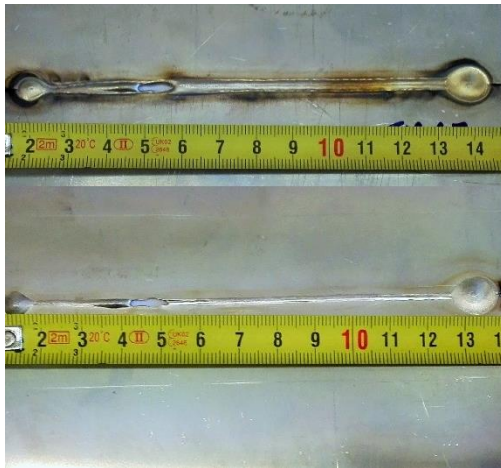
*Barevné značení vad na svařech při vizuální kontrole

- Vzorky vyhovující
- Vzorky s neprůvarem kořene
- Vzorky s částečným neprůvarem kořene
- Vzorky s propadem svarové lázně

* Použité geometrie neodtavujících se elektrod

30° + 90° dvojité kužel (DK)





Obrázek 27: TIG 47 - vyhovující vzorek,
 $v_{sv} = 330 \text{ cm/min}$



Obrázek 26: TIG 43 - nevyhovující vzorek,
 $v_{sv} = 330 \text{ cm/min}$

Při použití plynu Varigon H10 bylo dosaženo svařovací rychlosti 330 cm/min na vzorku TIG 47 (obrázek 27).

Při vyšší svařovacích parametrech (obrázek 26) docházelo k nestabilitě svarové lázně a jejímu propadu. Tento problém se podařilo vyřešit změnou svařovacích parametrů a lázeň stabilizovat (obrázek 27).

6.11 Porovnání naměřených hodnot

Po dokončení svařování bylo provedeno porovnání vybraných ochranných plynů dle vneseného tepla do oblouku a dle svařovacího proudu. Jako konstantní parametr byla zvolena svařovací rychlost.

6.11.1 Dosažená svařovací rychlost

Tabulka 11: Porovnání dosažené svařovací rychlosti pro použité ochranné plyny

Maximální dosažená rychlost svařování					
Označení plynu	Ar 4.8	Varigon H6	Varigon He30	Varigon H10	
Chemické složení plynu	99,998 % Ar	94 % Ar + 6 % H ₂	70 % Ar + 30 % He	90 % Ar + 10 % H ₂	
Rychlost svařování [cm·min ⁻¹]	90	TIG 1	TIG 15	TIG 37	TIG 38
	150	TIG 2	TIG 16	TIG 25	TIG 39
	200	TIG 5	TIG 17	TIG 27	TIG 40
	230	*	X	TIG 31	X
	270	*	TIG 19	*	TIG 42
	330	*	TIG 20	*	TIG 47
* - Dané rychlosti svařování se nedosáhlo					
X - Daná rychlost svařování nebyla testována					

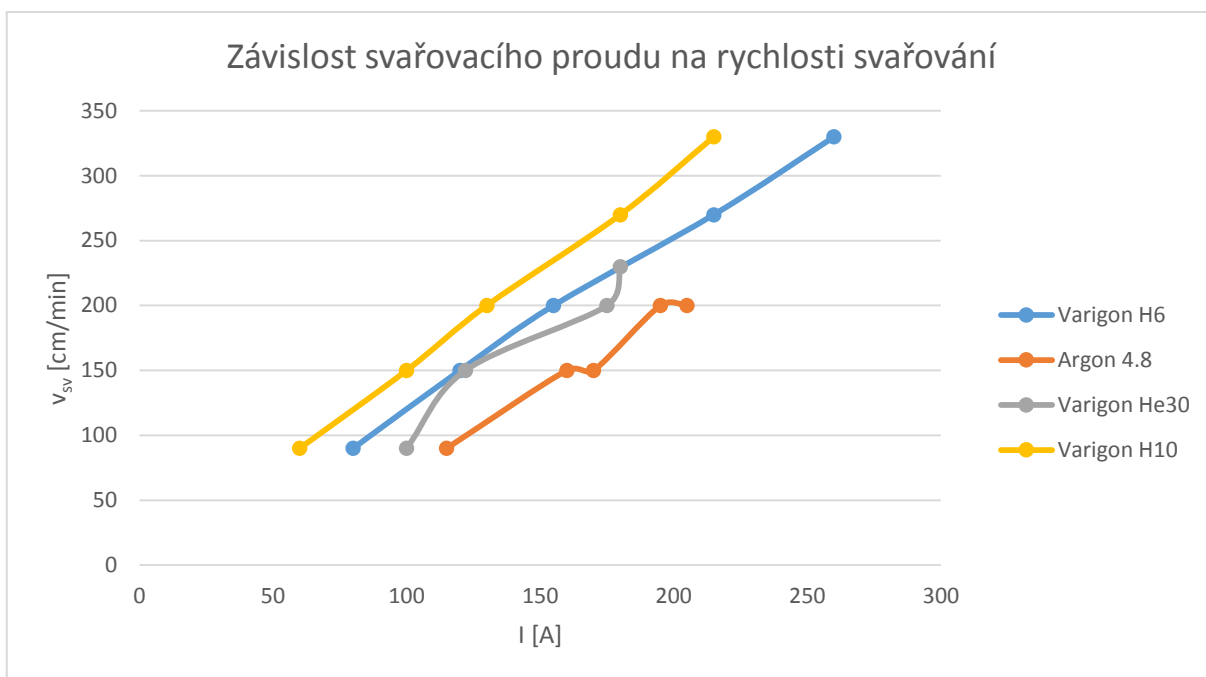
V tabulce 11 lze vidět, že nejvyšší rychlosti svařování bylo dosaženo při použití ochranného plynu Varigon H6 a Varigon H10. Což odpovídá původnímu předpokladu, že nejvyšší rychlosti se dosáhne s použitím plynu Varigon H10 s 10 % vodíku, jelikož dokáže do oblouku vnést vyšší výkon. Při vyšších rychlostech (330 cm/min) bylo však obtížné lázeň v atmosféře plynu H10 stabilizovat a vyšší rychlosti (400 cm/min) půjde pravděpodobně snadněji dosáhnout s plynem H6.

6.11.2 Svařovací proud

Na grafu 3 lze pozorovat, jak se mění dodávaný svařovací proud v závislosti na svařovací rychlosti. Lze vidět, že ochranný plyn má vliv na spotřebu elektrické energie. Například při použití argonu 4.8 je třeba dodávat cca o 27 % vyšší el. proud než při použití plynu Varigon H6. Další údaje lze najít v tabulce 12.

Tabulka 12: Porovnání použitých ochranných plynů z hlediska dodávaného svařovacího proudu

Porovnání potřebného svařovacího proudu pro použité plyny				
v_{sv} [cm/min]	Varigon S	Varigon H6	Varigon He30	Varigon H10
	I [A]			
90	115	80	100	60
150	170	120	122	100
200	195	155	175	130
v_{sv} [cm/min]	Procentuálně vyjádřený poměr potřebného sv. proudu k Ar 4.8 pro ostatní plyny [%]			
90	100,00	69,57	86,96	52,17
150	100,00	70,59	71,76	58,82
200	100,00	79,49	89,74	66,67
Průměr [%]	100,00	73,21	82,82	59,22
* Porovnání bylo provedeno pro hodnoty svařovací rychlosti, při níž byly svařeny vyhovující vzorky				



Graf 3: Závislost svařovacího proudu na rychlosti svařování při použití různých ochranných atmosfér

6.11.3 Vnesené teplo

V souvislosti se změnami svařovacího proudu, svařovací rychlosti a napětí se mění i teplo vnesené do oblouku. Tyto změny lze pozorovat v tabulce č. 13.

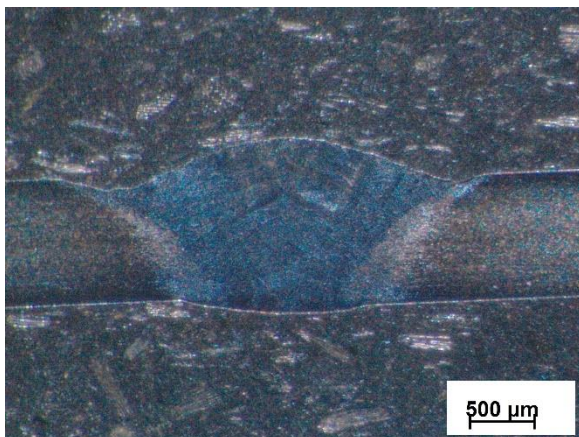
Tabulka 13: Údaje pro vyhovující vzorky

v_{sv} [cm/min]	I [A]	U [V]	Q [J/cm]
Varigon S			
90	115	14,6	671,6
150	170	16,8	685,6
200	195	17,8	624,9
Varigon H6			
90	80	13,2	422,3
150	120	14,8	426,2
200	155	16,2	452,0
270	215	18,6	533,4
330	260	20,4	578,9
Varigon He30			
90	100	14,0	559,9
150	122	14,9	435,7
200	175	17,0	535,6
230	180	17,2	484,7
Varigon H10			
90	60	12,4	297,5
150	100	14,0	336,0
200	130	15,2	355,7
270	180	17,2	412,9
* Hodnoty byly vypočteny pro vyhovující vzorky			

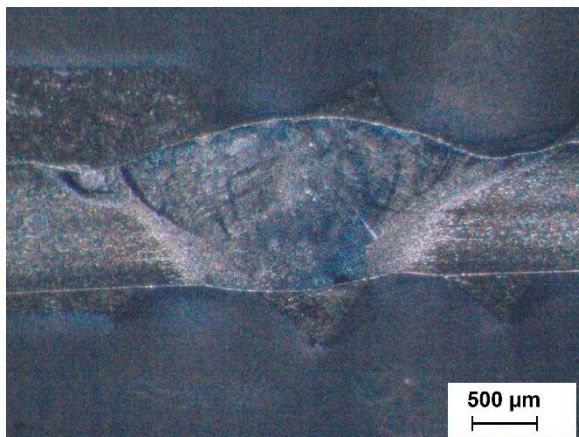
Z tabulky 13 je vidět, že nejnižší vnesené teplo vykazuje Varigon H10, zároveň lze pozorovat stabilní lineární nárůst hodnot, zatímco například He30 růst nepravidelný. Vzhledem k volbě svařovacích parametrů je svařování s použitím He 30 časově náročné, jelikož je obtížné stanovit vhodné svařovací parametry.

6.11.4 Metalografické vyhodnocení

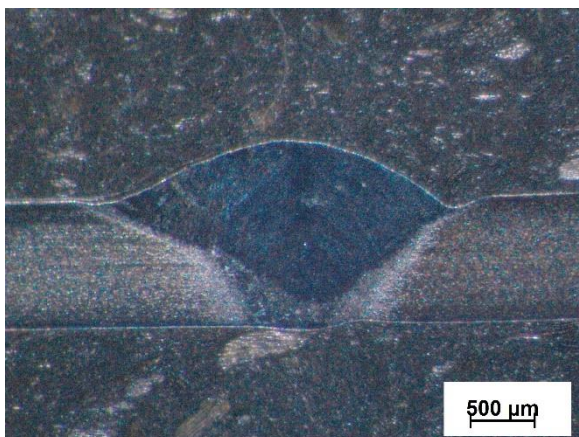
U vybraných vzorků, které vyhověly vizuální kontrole, byl proveden metalografický výbrus v laboratořích Ústavu strojírenské technologie. Snímky jsou vidět na obrázcích níže.



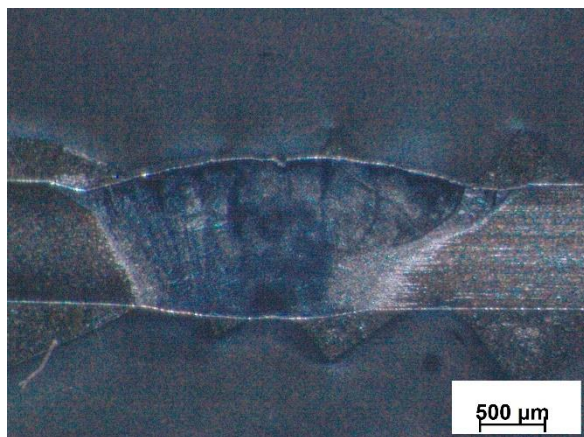
Obrázek 29: TIG 5, Ar 4.8, 200 cm/min, zvětšení 25x



Obrázek 28: TIG 20, Varigon H6, 330 cm/min, zvětšení 25x



Obrázek 31: TIG 31, Varigon He30, 230 cm/min, zvětšení 25x



Obrázek 30: TIG 47, Varigon H10, 330 cm/min, zvětšení 25x

Na obrázku 29 lze vidět vzorek TIG 5, který byl svařen s ochrannou atmosférou Varigon S. Ze snímku je patrná hlavní výhoda použití čistého argonu. Díky jeho nízkému ionizačnímu potenciálu 15,8 eV vykazuje oblouk při svařování vysokou stabilitu, tudíž je souměrný podle osy svaru. Svar je provařen v celé hloubce, avšak jsou na něm patrné vady jako převýšení a vruby, které nebyly po vizuální kontrole viditelné. Jinak lze vidět, že vlečná ochrana fungovala při svařovací rychlosti 200 cm/min dobře, jelikož na vzorku není patrné zbarvení (obrázek 20), ani cizí zrna ve výbrusu.

Na obrázku 28 je vzorek TIG 20, u kterého bylo dosaženo nejvyšší svařovací rychlosti 330 cm/min. Lze pozorovat, že vlečná ochrana při vyšší rychlosti nefunguje stoprocentně, protože přestože byl vzorek při vizuální kontrole kovově čistý, na výbrusu jsou patrná cizí zrna. Díky vyššímu tepelnému výkonu, který je Varigon H6 schopný přenést je svar širší a oproti vzorku TIG 5 vykazuje menší převýšení a vruby.

Na obrázku 31 je vidět vzorek TIG 31 svařený s použitím Varigonu He30. Na první pohled je patrný neprůvar kořene, který nebyl při vizuální kontrole vidět a také výrazné převýšení. Tyto vady jsou způsobeny špatným nastavením svařovacích parametrů a nedostatečným průtokem ochranného plynu. Lze usoudit, že při vyšších svařovacích rychlostech helium vykazuje nízkou schopnost obklopit okolí svaru, proto je patrné převýšení a neprůvar kořene. V důsledku nedostatečného přívodu helia pravděpodobně nedošlo k přenesení dostatečného svařovacího výkonu potřebného k provaření.

Na obrázku 30 je vzorek TIG 43 svařený Varigonem H10. Na první pohled je patná větší šířka svaru oproti ostatním vzorkům, způsobená vysokým svařovacím výkonem, který je Varigon H10 schopen přenášet. Svar je ovšem nesymetrický s výraznou přechodovou oblastí, protože výkon je nesnadné efektivně regulovat.

7 Závěr

Bakalářská práce měla za cíl porovnat ochranné plyny při automatizovaném TIG svařování korozivzdorné oceli, 1.4301, s ohledem na získání maximální svařovací rychlosti. Experimentální část navazuje na diplomovou práci Ing Slabého [0] a rozšiřuje poznatky o použití směsných plynů argonu s 30 % helia a argonu s 10 % vodíku. Dále byly využity poznatky z práce p. Švorce, na základě které byla použita geometrie elektrody 30° + 90° dvojitý kužel, aby se snížilo riziko vzniku vrubů.

V rámci experimentu byly svařeny vzorky s použitím 4 druhů ochranných plynů (čistý argon a směsi argonu s 30 % helia, 6 a 10 % vodíku), aby bylo možné dosáhnout co nejvyšší svařovací rychlosti. Nejvyšší dosaženou svařovací rychlostí bylo 330 cm/min na vzorku TIG 20 při použití ochranného plynu argon s 6 % vodíku a na vzorku TIG 47 při použití plynu argon s 10 % vodíku.

Z hlediska hledání vhodných parametrů při experimentu vykazovala vyšší potenciál zvýšení svařovací rychlosti směs argon + 6 % vodíku, s kterou by se pečlivým odladěním svařovacích parametrů dalo dosáhnout svařovací rychlosti 400 cm/min, ovšem odladit parametry správně je obtížné. Směs argon + 10% vodíku vykazovala nestabilitu již při svařovací rychlosti 330 cm/min. Směsi s vodíkem vykazují nižší potřebu svařovacího proudu a lépe přenášejí svařovací výkon, zároveň se do materiálu díky jejich použití přenáší nižší vnesené teplo. Z hlediska praxe lze změnou ochranného plynu dosáhnout úspory energií a snížit nároky na svařovací zdroj při zvýšení svařovací rychlosti.

Z hlediska budoucího pokroku v oblasti svařování tenkých plechů z austenitické korozivzdorné oceli bude nutné vyvinout nové přípravky, které zajistí lepší ustavení plechů a zrychlí jejich upínání a nové směsi ochranných plynů, které zajistí lepší vedení tepla a ochrany svaru.

8 Seznam použité literatury

- [0] SLABÝ, Ondřej. *Vysokorychlostní TIG Svařování austenitické oceli metodou TIG* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-08-08]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/23386325-Vysokorychlostni-tig-svarovani-austeniticke-oceli-metodou-tig.html>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE.
- [1] *Astralpool* [online]. Doubravice: Astralpool, 1995 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://www.astralpool.cz/o-firme.php>
- [2] Hlavní skupiny nerezových ocelí. *Terapol: nerez ocel* [online]. Chomutov: Terapol, 2014 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>
- [3] MACEK Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [4] Nerezová ocel 1.4301. *Inoxspol* [online]. Praha: Inoxspol, c2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [5] Rady pro výběr materiálu. *Nerezmaterial* [online]. Tišnov: Nerezmaterial [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.nerezmaterial.cz/rady>
- [6] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 9788022731676.
- [7] ORSZÁGH, Viktor a Peter ORSZÁGH. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 1998. ISBN 8088780217
- [8] TIG svařování I - základní principy. *SVARINFO* [online]. SWARWEB, 2009 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>
- [9] TIG svařování II - AC nebo DC? *SVARINFO* [online]. SWARWEB, 2009 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008122801>
- [10] Wolframové elektrody pro TIG svařování. *SVARINFO* [online]. SWARWEB, 2006 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>
- [11] *Svět Svaru*. Ostrava: Hadyna - International, 2014, **2014**(2). ISSN 12144983.
- [12] ČSN EN ISO 14175. *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [13] SHIELDING THE WELD. *Sandvik* [online]. Stockholm: Sandvik AB [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://smt.sandvik.com/en/products/welding-products/shielding-gases/>
- [14] CUNAT, Pierre. *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. Brusel: Euro Inox, 2007 [cit. 2017-02-14]. ISBN 9782879971773. Dostupné z:

[http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/BrochureWeldability CZ.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf)

[15] MIG nebo MAG? Jaký je rozdíl? *Swarinfo* [online]. Svarweb, 2005 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007101501>

[16] OK AUTROD 347Si. *ESAB* [online]. Vamberk: Esab, 2017 [cit. 2017-08-04]. Dostupné z: [http://www.okweld.cz/PDF/draty-mig-mag/vysokolegovane-nerozavejicic/OK AUTROD 347Si.pdf](http://www.okweld.cz/PDF/draty-mig-mag/vysokolegovane-nerozavejicic/OK_AUTROD_347Si.pdf)

[17] KOLAŘÍK, Ladislav. Svařování hliníku v ochranných atmosférách. *Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2017-08-07]. DOI: 130430. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-atmosferach.html>