



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## POROVNÁNÍ SVAŘOVÁNÍ TIG A SVAŘOVÁNÍ PLAZMOU

COMPARISON OF GTAW AND PLASMA WELDING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Hotárek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jan Hotárek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

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

## Porovnání svařování TIG a svařování plazmou

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porovnání dvou srovnatelných svařovacích technologií. Hodnocení tvaru závazu a specifického vneseného tepla.

### Cíle bakalářské práce:

U obou technologií stanovit specifické vnesené teplo, makrostruktury svarů (tvar a plochy návaru a závazu, rozměry TOO), průběh tvrdosti v příčném řezu.

### Seznam doporučené literatury:

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

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-3-2-3.

KŘÍŽ, R. a P. VÁVRA. Strojírenská příručka. Praha: SCIENTIA. 1998. Svazek 8. 251 s. ISBN 80-718-054-2.

MESSLER, R. Principles of welding. USA 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

MINAŘÍK V. Obloukové svařování. Praha: SCIENTIA. 1998, 229 s. ISBN 80-7183-119-0.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

HOTÁREK Jan: Porovnání svařování TIG a svařování plazmou.

---

Práce předkládá porovnání dvou srovnatelných svařovacích metod, a to svařování plazmou a svařování metodou TIG. Princip fungování obou svařovacích metod byl popsán v teoretické části. Pro experimentální část byl zvolen základní materiál – chrom-niklová ocel s označením X5CrNi 18-10 a přídavný materiál ve formě drátu OK TIGROD 16.95. Pro každou svařovací metodu byly vytvořeny 3 vzorky. U vzorků bylo hodnoceno vnesené specifické teplo, které se u vzorků vytvořených pomocí svařování plazmou nelišilo, zato u metody TIG bylo pro každý vzorek jiné. Dále byl u vzorků hodnocen průběh tvrdosti, kdy u svařování plazmou jsou hodnoty na okraji svaru výrazně vyšší než u kořene svaru, ale u metody svařování TIG se hodnoty na okraji svaru a u kořene svaru téměř neliší. Tepelně ovlivněná oblast nebyla u vzorků dostatečně zřetelná. Ověření konečné struktury svařovaného materiálu bylo provedeno pomocí Shaefflerova diagramu. Pro metodu svařování plazmou, u které byl použit přídavný materiál ve formě drátu, bylo určeno zředění svarového kovu.

Klíčová slova: Chrom-niklová ocel, plazma, TIG, průběh tvrdosti, vnesené specifické teplo

## **ABSTRACT**

HOTÁREK Jan: Comparison of GTAW and Plasma Welding.

---

The work presents a comparison of two welding methods: plasma welding and GTA W. The principle of both welding methods was described in the theoretical part of this work. For the experimental part a base material was chosen - chrome-nickel steel labeled X5CrNi 18-10 and added material in the form of rod OK TIGROD 16.95. Three samples were made for each welding method. Samples were assessed according to applied specific heat which didn't vary in case of the samples made by plasma welding but was different for each sample made by GTA W. Further, the samples were assessed according to a development of hardness: in case of plasma welding the values at the edge of the weld were significantly higher than at the root of the weld but in case of GTA W the values at the edge and at the root of the weld were almost the same. The area affected by heat was not adequately distinctive with any of the samples. The check of the final structure of the welded material was performed with the help of the Shaeffler diagram. For plasma welding method, for which added material in the form of rod was used, dilution of the welding metal was determined.

Keywords : chrome-nickel steel, plasma, GTA W, development of hardness, applied specific heat

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOTÁREK, Jan. *Porovnání svařování TIG a svařování plazmou*. Brno, 2017. 40s, 3 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daňěk, CSc.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26.5.2017

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, za podporu během celého mého studia.

# OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 PLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ</b> .....	<b>10</b>
1.1 Vlastnosti technické plazmy .....	11
1.2 Svařitelnost materiálů plazmovým svařováním a výhody.....	13
1.3 Možnosti využití plazmy a oblasti využití plazmy .....	14
<b>2 SVAŘOVÁNÍ METOU TIG</b> .....	<b>15</b>
2.1 Druhy svařovacích proudů .....	17
2.2 Svařovací hořáky TIG.....	19
2.3 Netavící se wolframové elektrody .....	21
2.4 Ochranné inertní plyny .....	22
2.5 Formovací plyny .....	23
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE</b> .....	<b>24</b>
3.1 Vlastnosti základního a přídatného materiálu .....	24
3.1.1 Schaefflerův diagram .....	25
3.2 Metoda svařování plazmou.....	27
3.3 Hodnocení tvrdosti .....	28
3.4 Výpočet zředění svarového kovu.....	32
3.5 Metoda svařování TIG .....	33
3.6 Hodnocení tvrdosti .....	34
3.7 Porovnání svařování TIG a Plazmy.....	37
<b>4 ZÁVĚRY</b> .....	<b>39</b>
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	



## ÚVOD [15], [16]

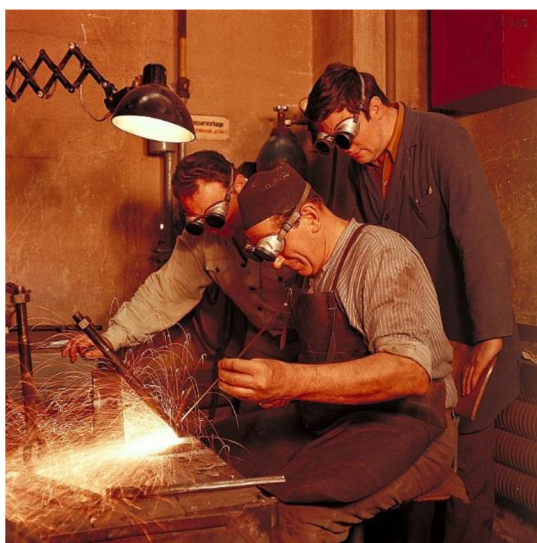
Technologie tavného svařování jsou z tzv. horkých technologií prokazatelně nejmladší. Zatímco archeologické nálezy tvářených a odlévaných předmětů (zbraní, náradí, nástrojů i šperků) dokazují jejich původ v dávné minulosti, technologií tavného svařování se začalo používat až po objevení vhodného tepelného zdroje, schopného relativně rychle lokálně natavit povrch spojovaných částí. Tím objeveným zdrojem se stal v 19. století kyslíkoacetylenový plamen na obr. 1. Do té doby se používalo svařování kovářské nebo slévárenské. Výkon svařování plamenem je malý, ale tato metoda je pro své výhody využívána dodnes. Elektrický oblouk na obr. 2 se začal používat o něco později, jeho výhodou byl vyšší výkon navaření, počáteční nevýhodou pak složitá výroba vhodných přídavných materiálů (elektrod). Ruční svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou bylo donedávna technologií nejvíce využívanou. Dnes toto prvenství zaujímá svařování v ochranné atmosféře plynů.

Největšího rozvoje svařování bylo vždy dosahováno v období válek, kdy byly do výzkumu, vývoje a nasazení technologie vkládány mimořádné prostředky. Pro zbrojní výrobu byly zpracovány postupy a technologie umožňující svařovat i materiály považované dosud za tavně nesvařitelné.

V současnosti je zaznamenáván prudký rozvoj metod vhodných pro svařování jak malých tlouštěk (fólií), tak naopak tlouštěk značných. U obou nachází uplatnění technologie využívající vysokou plošnou hustotu (koncentraci) energie. Do této skupiny patří svařování plazmou, laserem a elektronovým paprskem. Pomocí těchto technologií je např. možné vytvářet i heterogenní svary, je možné svařovat s přídavným materiálem nebo bez něj, což mj. umožňuje v širokém rozsahu měnit zředění svarového kovu. Objem svarového kovu je malý, to příznivě ovlivňuje zbytková napětí ve svaru a zaručuje malou nebo minimální šířku tepelně ovlivněné oblasti.

Nevýhodou jsou prozatím poměrně vysoké pořizovací náklady na vybavení.

Svařování plazmou se podobá svařování TIG, plazma má však větší možnosti v regulaci rozsahu výkonu (vneseného tepla), a tím umožňuje svařovat i větší rozsahy svařovaných tlouštěk.



Obr. 1 Svařování Kyslíkoacetylenovým plamenem [16]



Obr. 2 Svařování elektrickým obloukem s obalenou elektrodou [15]

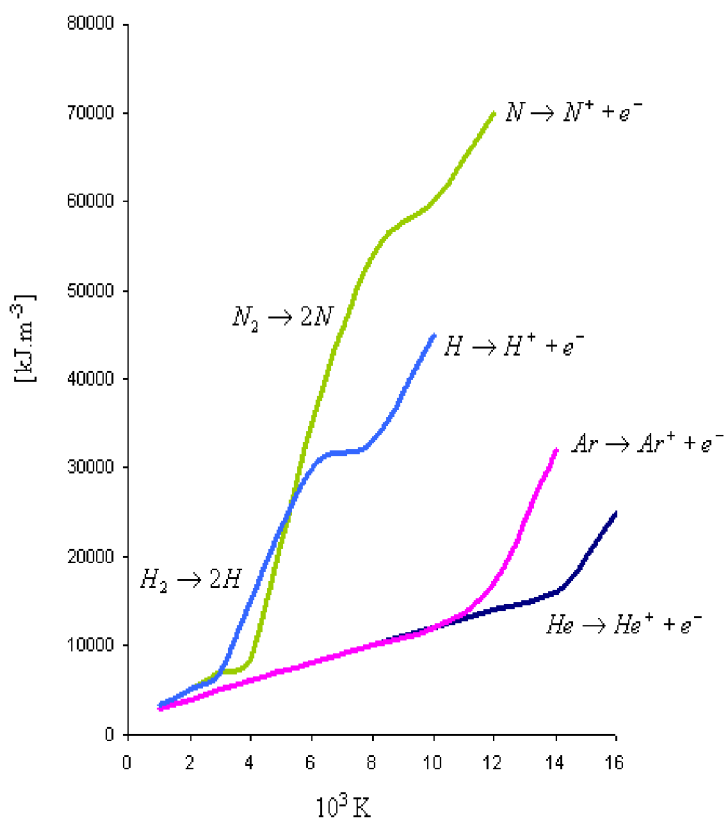
## 1 PLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ [1], [3], [7], [8], [9]

Plazmové svařování využívá plazmy jako zdroj tepelného a dynamického působení na materiál. V roce 1923 byl zaveden fyzikální pojem plazma, pro plynné prostředí nazývané také jako čtvrtý stav hmoty, fyzikem Irvingem Langmuirem. Plazma vzniká jen při ionizaci plynu, důsledkem ionizace plynu dochází k uvolnění elektronů z vnějších valenčních orbitů atomů. Pomocí uvolněných elektronů, které mají záporný náboj, se vede elektrický proud. Jádro atomu je ionizované, tudíž iont s neuvolněnými elektrony je kladný. Plazma se navenek tváří jako elektricky neutrální.

Na ionizaci plynů je potřeba značná energie. V technické praxi se často jako zdroj tepla používá elektrický oblouk, který je kontrahován (zúžen) a zvýšením teploty se dosáhne vyššího stupně ionizace. Při ionizaci se může odtrhnout více než jeden elektron z oběžné dráhy atomu. Když dojde k odtrhnutí více elektronů z oběžné dráhy atomu, jde o tzv. vícenásobnou ionizaci.

Princip svařování plazmou je tedy založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem.

Jednoatomové plyny jako argon, helium a neon mají uzavřenou valenční sféru, a proto probíhá jenom ionizace. U dvouatomových plynů jako dusík, vodík a kyslík musí nejdříve proběhnout disociace plynu, která způsobuje rozklad molekul plynu na atomy. Přibližně 40 % molekul je disociováno při teplotě 4000 K a při teplotě 10000 K je v disociovaném stavu 99 % molekul. Ionizaci lze rozdělit na více stupňů, které jsou závislé na teplotě. Teplotní ionizace začíná při teplotách okolo 8000 K. U teploty okolo 30000 K tvoří plazmu dusíku asi 60 % volných elektronů. Úplná ionizace probíhá za přibližné teploty 100000 K. U svařování se využívá plazmy nižších teplot a to do 35000 K. Plazma je jenom částečně ionizována. Na obr. 3



Obr. 3 Průběh disociace a ionizace plynů v závislosti na teplotě [8]

jsou zobrazeny teploty disociace a ionizace. Na základě těchto dvou procesů při vzniku plazmy se nejen navyšuje její teplota, ale značně se navyšuje i její tepelný obsah. Naopak k tzv. deionizaci a rekombinaci části plazmy dochází při jejím ochlazení v průběhu styku se základním chladnějším materiálem. Právě při tom se předtím vložená disociační a ionizační energie předává do materiálu. Předávání energie probíhá za poměrně vysokých teplot, viz obr. 3, která příznivě ovlivňuje intenzitu přenosu tepla z plazmy na materiál.

Teploty plazmy pro dané prostředí jsou znázorněny v tab. 1.

Plazmový paprsek v ose hořáku stabilizuje plyn, který není ionizován, a tudíž je chladnější. To způsobuje, že se plazma nedotýká stěn trysky.

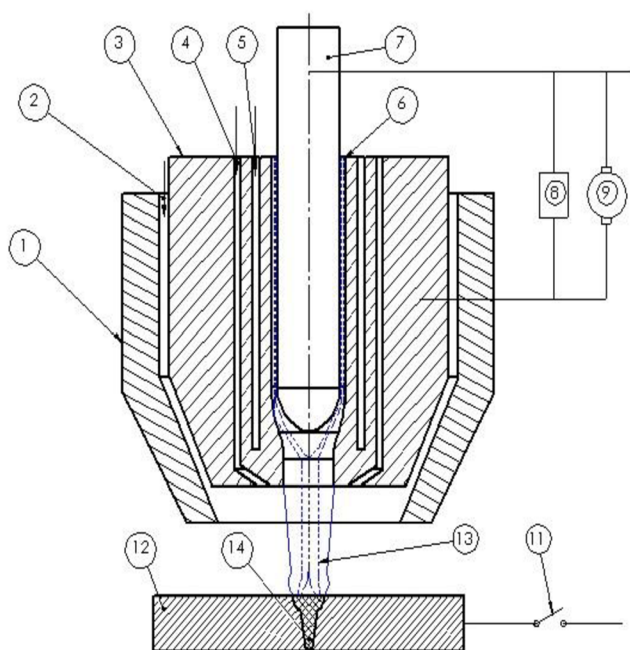
Tab. 1 Pro používaná prostředí platí tyto přibližné průměrné teploty plazmy [3].

<b>Dusíková plazma</b>	do 9 000 K
<b>Vodíková plazma</b>	10 000 K
<b>Argonová plazma</b>	16 000 K
<b>Heliová plazma</b>	20 000 K
<b>Plazma stabilizovaná vodou</b>	35 000 K

### 1.1 Vlastnosti technické plazmy [1], [3], [7], [9]

Zároveň probíhají srážky pružné, ale i nepružné mezi molekulami, které mají za následek disociaci a ionizaci plynu. Plazma je kvazineutrální, z toho vyplývá, že má téměř totožný počet kladných a záporných částic. Pohyblivost elektronů působí na elektrickou vodivost plazmy. Plazmu velmi ovlivňují elektrická a magnetická pole.

Princip plazmového svařování vychází z metody svařování TIG – oblouk hoří mezi netavicí se elektrodou a základním materiálem obvykle v ochranné atmosféře. Pro získání plazmového oblouku je zapotřebí zvýšení teploty oblouku, aby se docílilo vysoké hustoty výkonu v dopadové ploše. Řešením je zúžení elektrického oblouku, a to za použití kovové trysky a fokusačního plynu. U svařování plazmou se používá intenzivně chlazená kovová tryska menšího průměru, která nahrazuje keramickou hubici u metody TIG a je chlazená vodou nebo plynem. Menší průměr trysky zužuje oblouk na poměrně malou plochu svařence. Lze použít dva způsoby elektrického zapojení hořáku, a to zapojení závislé a zapojení nezávislé. U zapojení závislého je záporný pól připojen na wolframovou elektrodu a kladný pól na základní materiál. Ke kovové trysce je připojen VF ionizátor, který slouží k nastartování a zapálení pomocného oblouku. Pomocný oblouk vyprodukuje vodivé prostředí, které slouží k zapálení hlavního oblouku, a to i na relativně dlouhou vzdálenost. Závislé zapojení se využívá zejména u svařování, navařování a řezání. Na obr. 4 je v řezu znázorněn princip plazmového hořáku.

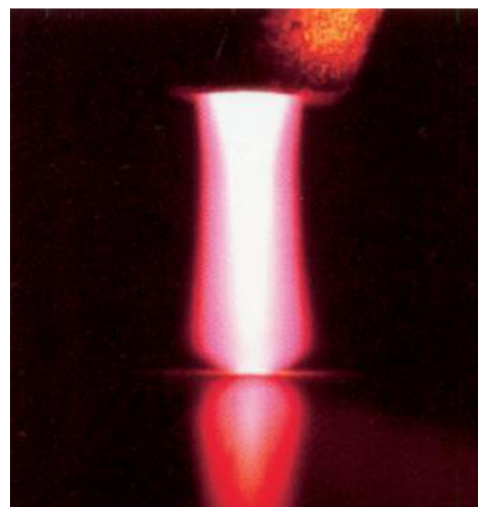


1. hubice pro přívod ochranného plynu
2. ochranný plyn
3. tryska hořáku
4. fokusační plyn
5. vodní chlazení
6. plazmový plyn
7. wolframová elektroda
8. vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor
9. zdroj pomocného oblouku
10. zdroj hlavního elektrického oblouku
11. spínač
12. základní svařovaný materiál
13. plazmový paprsek
14. provedený svar

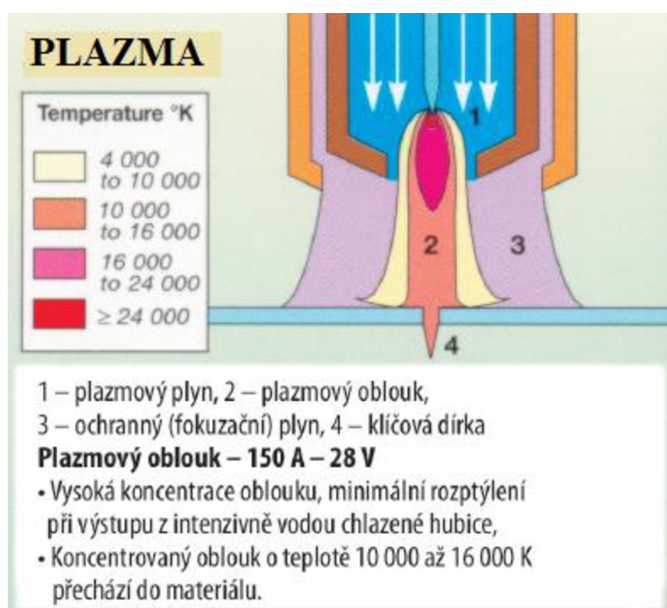
Obr. 4 Princip plazmového hořáku [1]

Nezávislé zapojení spočívá v připojení pólů zdroje pouze na elektrodu a kovovou trysku a používá se zejména u povrchového kalení a žárových nástříků.

Kontrakci plazmového paprsku (viz obr. 5) napomáhá zúžení výstupní trysky plazmového hořáku. Po výstupu z trysky je oblouk dále zužován fokusačním plynem, který je přiváděn k plazmovému paprsku. Mezi plyny využívající se jako fokusační plyny se zařadí směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Teplota plazmy se zvyšuje a tím i její stupeň ionizace i elektrická vodivost, aby byl splněn patřičný výkon z nastavených hodnot. Při kontaktu plazmy se svařovaným materiálem nastává ochlazení plazmy. Dochází k rekombinaci, při které se slučují elektrony s ionty na atomy. Rekombinací se akumulované teplo uvolňuje a vnáší do materiálu. Účinnost přenosu tepla se pohybuje kolem 70-80 %. Vysoké hodnoty výstupní rychlosti plazmy jsou způsobeny zvyšujícím se objemem při ohřevu plynu obloukem. Proniknutí paprsku v celém průřezu materiálu je zapříčiněno vysokou teplotou a dynamickou účinností dopadající plazmy. Koncentrované teplo zajišťuje dobré formování kořene, hluboké natavení základního materiálu



Obr. 5 Plazmový paprsek [7]



Obr. 6 Popis plazmového oblouku [7]

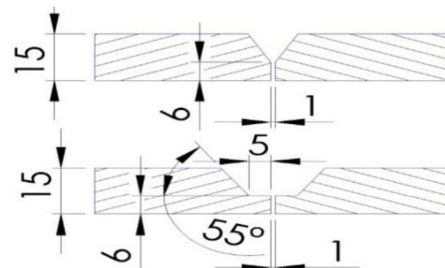
a charakteristický průřez svaru. Nežádoucí je vyfouknutí taveniny ze spáry, proto musí být dosažena rovnováha mezi povrchovým napětím taveniny a dynamickým účinkem. Výstupní rychlost plazmy při svařování a navařování se pohybuje mezi 200 až 500 m·s<sup>-1</sup>.

Plazmový oblouk má při srovnání s laserovým paprskem nižší koncentraci energie, ale energetická účinnost plazmy je nesrovnatelně vyšší. Provozní náklady plazmy jsou oproti laserovému paprsku celkově nižší. Na obr. 6 je znázorněno rozložení teplot u plazmového oblouku. Z obrázku je patrná vyšší koncentrace energie a tím i vyšší délka oblouku.

## 1.2 Svařitelnost materiálů plazmovým svařováním a výhody [1], [3], [7], [9]

Plazmové svařování má podobné parametry svařování i vliv na svařitelnost materiálů jako metoda TIG. Při plazmovém svařování nastává spolehlivé provaření kořene, dále dosahuje vysokých svařovacích rychlostí a také výhodnějšího poměru šířky k hloubce svaru (1:1,5 až 1:2,5). Svařují se všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl, molybden a jejich slitiny.

Provádí se různé úpravy svarových ploch. Pro tupé svary typu I se nemusí provádět úprava svarového úkosu i do větších tloušťek materiálu, protože dojde k spolehlivému provaření kořene, kvůli vysokému dynamickému účinku plazmového paprsku. Pro různé materiály nebo tloušťky materiálu se můžou úpravy svarového úkosu lišit. Na obr. 7 jsou zobrazeny úpravy svarového úkosu pro plazmové svařování Cr-Ni oceli. Na obr. 8 jsou porovnány úpravy svarových úkosů pro metody ručního svařování obalenou elektrodou, metodou TIG a svařování plazmou.



Obr. 7 Úprava svarových ploch pro Cr-Ni oceli [1]

Plazmové svařování se vyznačuje vyšší rychlostí svařování při zachování dobrých mechanických vlastností spoje a také zachováním příznivých mechanických hodnot základního materiálu.

TLOUŠŤKA	OBLOUKOVÉ SVAŘ.	TIG	PLAZMA
3 mm			
8 mm			
> 8 mm			

Obr. 8 Porovnání úprav svarových ploch pro různé metody [7]

Jednoduchou úpravou svarových ploch středních tloušťek do tloušťky 8 mm není nutné svarové plochy úkosovat. To má za důsledek snížení pracnosti přípravy svarových ploch. Při svařování plazmou se nemusí podkládat kořen. Při svařování se dosahuje velice dobrého průvaru, tvaru i vzhledu svaru. Plazmové svařování lze dobře mechanizovat. Dosahuje nadměrné čistoty svaru bez pórů a bublin (rentgenovou čistotu). Další výhodou jsou menší tepelně ovlivněné oblasti, což má za následek menší deformace svařovaného materiálu.

### 1.3 Možnosti využití plazmy a oblasti využití plazmy [1], [3], [7], [9]

Jednou z možností využití plazmy je mikroplazmové svařování. Mikroplazmové svařování využívá nízký proud, při kterém je i nadále vysoká stabilita hoření plazmového oblouku. Proud se pohybuje v rozmezí od 0,05 až do 20 A. Mikroplazmovým svařováním lze svařovat velmi rozdílné tloušťky materiálu, a to kovové fólie tloušťky 0,01 mm až kovový plech tloušťky 2 mm. Nevýhodou svařování tenkých fólií je složitá příprava svarové mezery, která se nachází mezi 10 až 20 % tloušťky fólie, což má za následek použití speciálních upínacích přípravků, které zajišťují odvod tepla z místa svaru a během svařování fixují polohu. Využití mikroplazmového svařování je v leteckém průmyslu, kosmickém průmyslu, mikroelektronice i v chemickém či potravinářském průmyslu.

Další využití plazmy je v systému Plazma – TIG. Systém spojuje výhody obou metod svařování. Z plazmy převzal zachování vysoké stability hoření i při vysoké délce oblouku. Výhodu automatického podávání tavicí se drátové elektrody převzal z metody TIG. Systém Plazma – TIG lze rozdělit na dvě hlavní metody:

- Plazmový oblouk hoří mezi pomocnou wolframovou elektrodou a proud plazmatu je usměřován hubicí.
- Plazmový oblouk hoří mezi hubicí a základním materiálem.

Obě metody využívají hoření hlavního oblouku mezi drátovou elektrodou a základním materiálem. Systém Plazma – TIG má klidný přenos kovu bez rozstříku a je usměřován proudícím plazmatem. Svařovacím proudem je ovlivněna hloubka závaru. Nízkým svařovacím proudem se dosahuje úzkého hlavního oblouku a hlubokého průvaru. Vysokým svařovacím proudem se získává širší hlavní oblouk, ale výrazně se zmenší hloubka závaru. Malá hloubka závaru je výhodou především pro navařování.

Plazmu lze využít i k dělení materiálů. Řezání plazmou umožňují vysoké teploty a rychlost výstupního plazmového paprsku. Zintenzivněním tlaku a průtoku plazmového plynu dochází k vyfoukávání nataveného materiálu z řezné spáry vystupující plazmou. Rychlosti výstupní plazmy se pohybují okolo 1500 až 2300 m·s<sup>-1</sup>. Veškeré vodivé kovové materiály lze řezat díky vysoké teplotě plazmového paprsku. Řeznou rychlost ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi ovlivňující faktory patří výkon zdroje, tloušťka, chemické a fyzikální vlastnosti materiálu. V současnosti se pro stabilizování plazmy využívají různé plyny (viz tab. 2).

Tab. 2 Plyny pro stabilizaci plazmy [3].

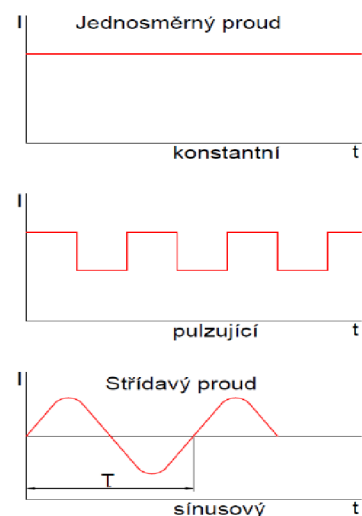
Typ plazmy	Rychlost řezání	Kvalita řezu
Vzduchová	Vysoká	Průměrná
Plynová	Nízká	Vysoká
Dusíková kombinovaná s vodou	Vysoká	Vysoká
Kyslíková	Vysoká	Vysoká

Svařování plazmou se využívá v oblastech, kde se dbá na vysokou kvalitu, produktivitu a minimální tepelné ovlivnění základního materiálu. Tyto požadavky nám ukazují použití této metody zejména pro svařování ušlechtilých materiálů v těchto oblastech průmyslu:

- Jaderný průmysl
- Chemický průmysl
- Potravinářský průmysl
- Elektronika
- Stavba lodí
- Letecký průmysl
- Automobilový průmysl

## 2 SVAŘOVÁNÍ METOU TIG [1], [2], [7], [9]

Svařování metodou TIG patří do tavného svařování. Svarové plochy základního materiálu se v určitém místě nataví a následuje odtavení přídavného materiálu v požadovaném množství. Smícháním nataveného základního materiálu a přídavného materiálu vzniká svarová koupel. Tato směs postupně tuhne a vytváří mezi svařovanými základními materiály požadovanou fyzikální vazbu. Svařování metodou TIG využívá jako zdroj tepla elektrický oblouk. Oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem v inertním plynném prostředí. Svařovací zařízení TIG se vyrábí ve třech základních sestavách a dělí se podle svařovacího proudu na sestavu na svařování TIG se stejnosměrným proudem, na sestavu na svařování TIG se střídavým proudem a na sestavu na svařování TIG univerzální s možností svařování stejnosměrným proudem i střídavým proudem. Na obr. 9 jsou znázorněny časové průběhy svářecího proudu.



Obr. 9 Časové průběhy svářecího proudu [9]

- Sestava na svařování TIG stejnosměrným proudem:

Sestava pro svařování metodou TIG je schematicky znázorněna na obr. 11.

Zdroj stejnosměrného proudu může být invertor se strmou statickou charakteristikou nebo lze použít usměrňovač se síťovým transformátorem. Napětí na prázdko obvykle nepřesahuje 75 V. Strmá charakteristika zdroje je na obr. 10 a je na ní vyznačená standardní charakteristika oblouku. Pro výpočet standardní pracovní přímky se využívá rovnice:

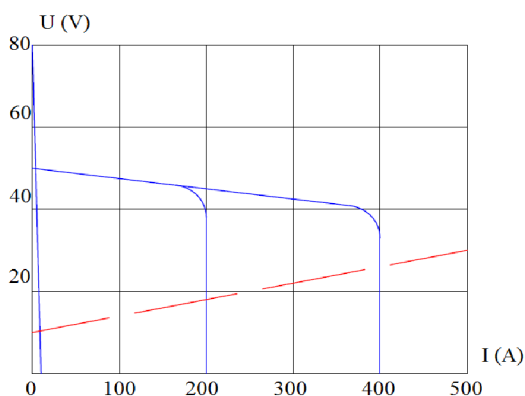
$$U = 10 + 0,04 \cdot I \quad (2.1)$$

kde:  $U$  – svařovací napětí [V]

$I$  – svařovací proud [A]

Řídicí jednotka nám umožňuje ovládat a upravovat prvky svařovacího procesu. Mezi prvky patří upravení začátku a ukončení svařování, náběh proudu na začátku svařování a jeho sestup na konci svařování.

Zapalovací jednotka využívá vysokofrekvenčního vysokonapěťového ionizátoru k jiskrovému zapálení bezkratového oblouku. Další možností je zapálení oblouku zkratem pomocí malého zapalovacího proudu maximálně o velikosti 6 A. Další vlastností je automatická regulace proudu na svařovací hodnotu při oddalování elektrody.



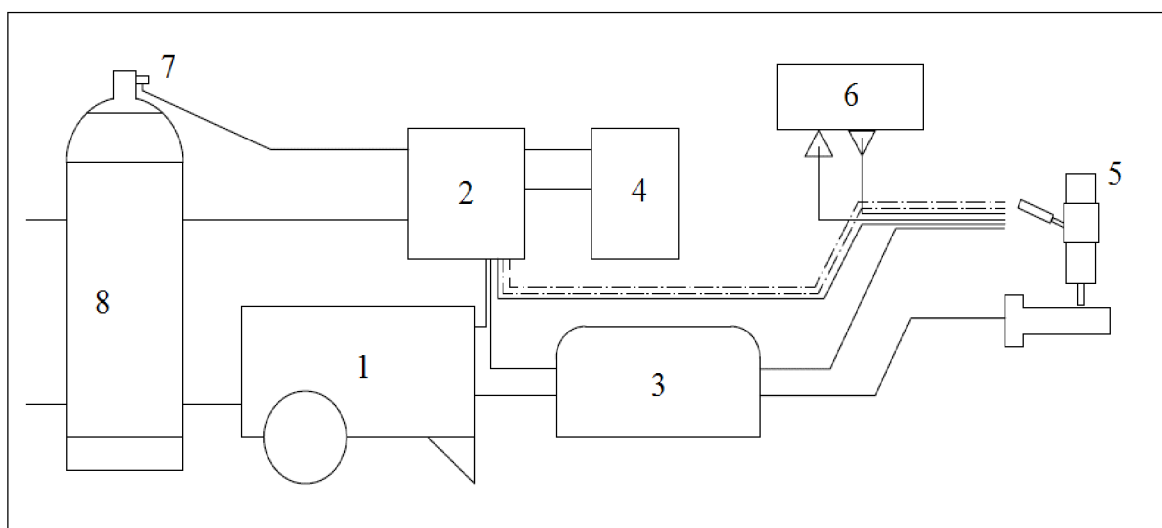
Obr. 10 Voltampérová charakteristika zdroje [1]

Programátor pomocí řídicí jednotky upravuje nastavení dalších potřebných úkonů jako předfuk a dofuk plynu, zapínání a regulaci chladicí vody. Při mechanickém svařování ovládá pohyb hořáku.

Chladicí jednotka udržuje aktivní oběh s chladicí vodou. Součástí je zásobník na vodu, čerpadla, ventilátor na ochlazení teplé vody a propojovací hadice.

Zásobník ochranného plynu a redukční ventil zajišťuje trvalý tlak plynu. Plyn je uchovávan v tlakových nádobách o různých velikostech, které jsou určeny podle využití

plynu (10, 40 nebo 50 l). Při nadměrném využití plynu je ekonomicky výhodné využívat kapalné plyny v mobilních odpařovacích nádobách.



Obr. 11 Základní sestava zařízení pro svařování TIG stejnosměrným proudem [9]

- |                                       |                      |
|---------------------------------------|----------------------|
| 1. zdroj stejnosměrného proudu        | 5. svařovací hořák   |
| 2. řídicí jednotka svařovacího proudu | 6. chladicí jednotka |
| 3. zapalovací jednotka                | 7. redukční ventil   |
| 4. programátor                        | 8. zásobník plynu    |

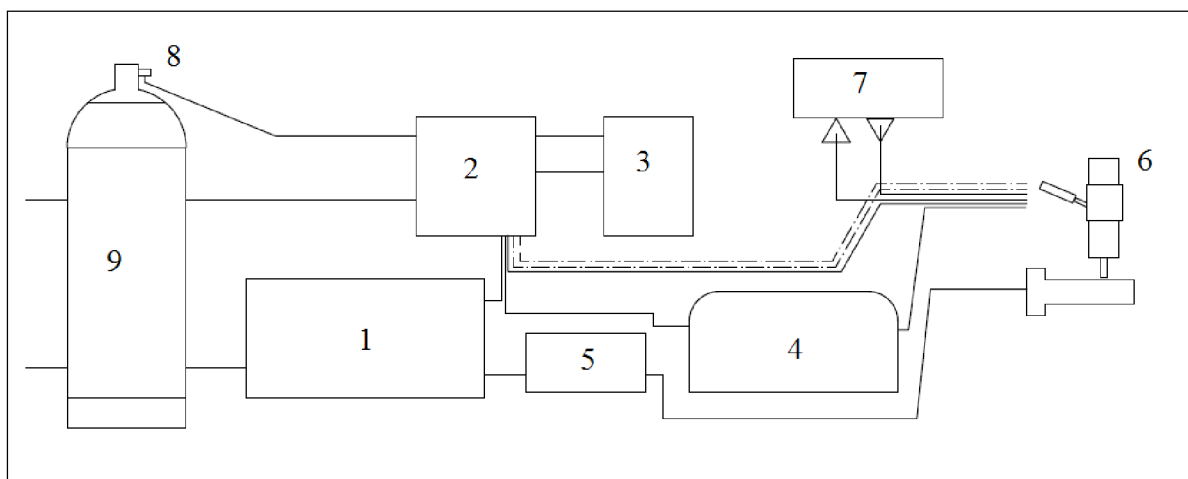
- Sestava na svařování TIG střídavým proudem:

Zařízení na svařování střídavým proudem je znázorněno schematicky na obr. 12. Sestava je poskládána z velké většiny z komponentů využitých při svařování stejnosměrným proudem, ale využívá i další nebo rozdílné komponenty. Používá se odlišný zdroj proudu, dále se využívá stabilizátor oblouku a baterie kondenzátorů.

Transformátor upravený na svařování TIG prostřednictvím výkonových elektronických prvků, které zvyšují strmost statické charakteristiky, je nejčastěji využíván jako zdroj střídavého proudu. Napětí zdroje naprázdno nemá být vyšší než 60 V.

Stabilizátor zabezpečuje stabilitu elektrického oblouku při svařování střídavým proudem. Plní funkci ionizátoru, který slouží jako pomocná zapalovací jednotka a vzniká pouze v čase změny polarit na elektrodě, když svařovací proud má nulovou hodnotu. Tehdy stabilizátor vytváří vysokonapěťové impulsy s vysokou frekvencí. Běžně využívaný stabilizátor indukuje proud o napětí 2500 až 6000 V a frekvenci 2 až 5 MHz do svařovacího obvodu. Baterie kondenzátorů se zapojuje do svářecí sestavy za účelem vylepšení čistícího účinku oblouku TIG. Využívá se především u svařování hliníku a hliníkových slitin. Rozdílný ionizační potenciál mezi hliníkem a wolframem způsobuje deformaci sinusového průběhu, kladná polovina se zmenšuje a záporná polovina roste. Nežádoucí deformace se vyrovnává pomocí baterie kondenzátorů. Novější svařovací zařízení využívají k modelaci sinusového průběhu střídavého proudu funkci „balance“. Tato funkce umožňuje navýšit čistící efekt při modelaci kladné periody, nebo umožňuje navýšit hloubku závaru při modelaci záporné periody.





Obr. 12 Základní sestava zařízení pro svařování TIG střídavým proudem [9]

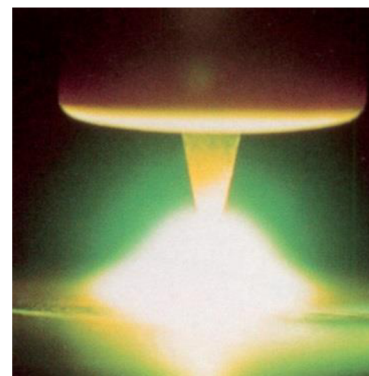
- |                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| 1. zdroj střídavého proudu | 6. svařovací hořák   |
| 2. řídicí jednotka         | 7. chladicí jednotka |
| 3. stabilizátor oblouku    | 8. redukční ventil   |
| 4. zapalovací jednotka     | 9. zásobník plynu    |
| 5. baterie kondenzátorů    |                      |

## 2.1 Druhy svařovacích proudů [1], [2], [7], [9]

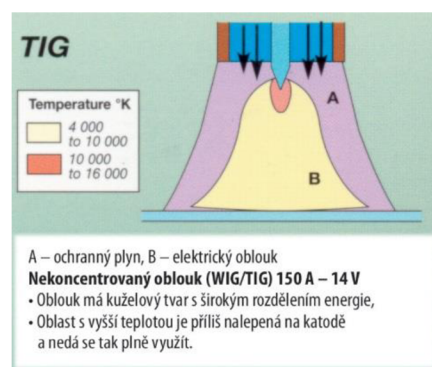
Základním způsobem zapojení pro metodu TIG je svařování stejnosměrným proudem. U tohoto zapojení je kladný pól připojen na svařovaný materiál a záporný pól je připojen na elektrodu. Teplo oblouku se nerovnoměrně přenáší mezi elektrodu a základní materiál. Základní materiál přijímá 2/3 tepla a elektroda zbylou 1/3 tepla. Důsledkem rozdělení tepla není elektroda tepelně přetěžována a svarová lázeň má velkou hloubku závaru. Hloubka závaru je kladně ovlivněna i dopadem elektronů, které při dopadu přeměňují svoji kinetickou energii na tepelnou.

Na obr. 13 je zobrazen svařovací oblouk metody TIG, který je detailně popsán na obr. 14.

Svařování střídavým proudem se využívá při svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin, protože při zapojení elektrody na kladný pól zdroje nastává čistící účinek. První forma čištění vytváří katodovou skvrnu na základním materiálu. Katodová skvrna není stabilní a pohybuje se na místa pokrytá oxidy. Oxidy po zasažení katodovou skvrnou se lépe odpaří. Druhá forma čistícího účinku je způsobena rozložením argonu na elektrony a kladné ionty. Argonové ionty jsou urychlené k tavné lázni, kde ovlivňují mechanickým účinkem oxidy. Při tom probíhá stažení vrstvy oxidu k okraji svarové lázně. Kladné zapojení elektrody ovlivňuje negativně hloubku závaru, vzniká malý závar. Pro dosažení větší hloubky závaru je nutné použít



Obr. 13 Svařování TIG [7]

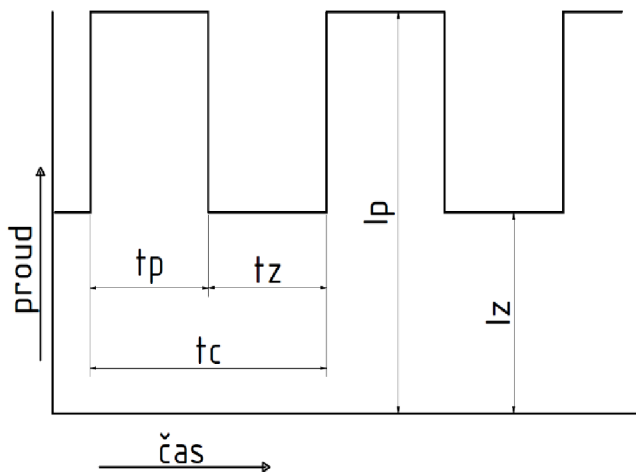


Obr. 14 Popis svařovacího oblouku [7]

zapojení elektrody na záporný pól. Při tomto zapojení urychlené elektrony dopadají do tavné lázně.

Nejmladší variantou TIG je svařování impulzním proudem, kdy se mění intenzita proudu mezi dvěma hladinami proudu. Prvním je základní proud  $I_z$  a druhým je impulzní proud  $I_p$ . Tvar průběhu impulsů proudu je závislý na charakteru zdroje. Jeden z tvarů může být pravoúhlý, ten je znázorněn na obr. 15. Dalšími tvary jsou sinusový, lichoběžníkový nebo jiný.

Základní proud  $I_z$  zajišťuje nepřetržitý obloukový proces a stálou ionizaci oblouku. Základní proud má všeobecně nízkou hodnotu (10-15 A). Doba působení základního proudu ovlivňuje rozměry svarové lázně. Pokud je čas působení doby základního proudu dvakrát delší než dvojnásobek času působení doby pulsu, dochází k ztuhnutí svarové lázně. Naopak pokud je čas působení doby základního proudu kratší, nedochází k ztuhnutí svarové lázně, ale dochází k zmenšení svarové lázně.



Obr. 15 Průběh pravoúhlého impulzního proudu [1]

Impulzní proud  $I_p$  zajišťuje natavení svarové lázně a přídavného materiálu v čase  $t_p$ . Amplituda impulzního proudu a doba trvání pulzu určuje rozměry svarové lázně. Dochází k přesné regulaci svařecího režimu, tvarování svarové lázně a hodnoty vneseného tepla. Svary mají výborné plastické vlastnosti, a to i menší deformace a nižší náchylnost na praskání. Svar má velmi malou tepelně ovlivněnou oblast.

Rychlost impulzního svařování je relativně malá, aby bylo docíleno kvalitního svarového spoje, je nutné překrývat jednotlivé bodové svary na straně povrchu i kořene. Pro dobrou optimalizaci je důležité sladit rychlost svařování s ostatními svařovacími parametry, a to amplitudou a frekvencí impulsů. Rychlost svařování může být zvýšena zvýšením frekvence impulsů.

Výhody impulzního svařování:

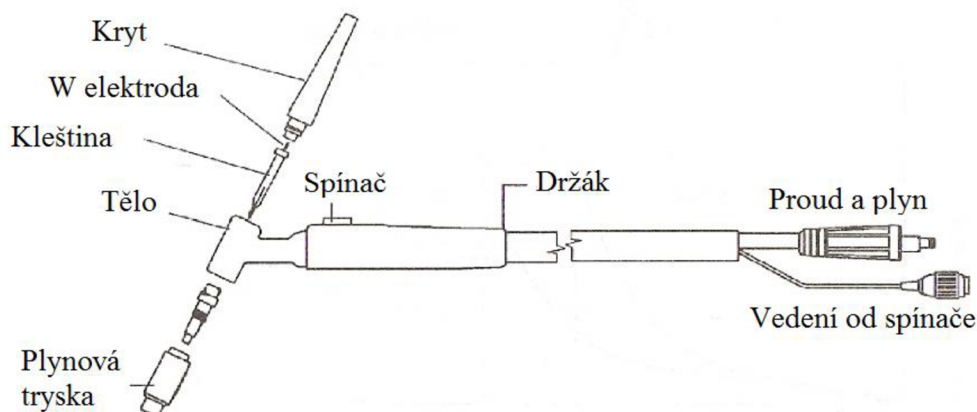
- Lepší celistvost, mechanické a plastické vlastnosti svarů
- Snížení tepelného ovlivnění materiálu a tím menší deformace
- Velmi dobré formování a vzhled svarové housenky
- Snížení náchylnosti svarů na vznik mezikrystalické koroze u vysokolegovaných ocelí
- Výhodný průřez svaru
- Možnost svařování plechů tloušťky 0,5 až 5 mm bez použití podložek
- Široká oblast regulace svařovacího proudu
- Snížení rozstříku

Výše uvedené výhody impulzního svařování TIG se využívají v těchto oblastech:

- Svařování tenkých plechů legovaných ocelí, mědi a měděných slitin
- Svařování různých tlouštěk
- Jednostranně přístupné svary
- Polohové svary
- Svařování materiálů citlivých na přehřátí
- Svařování kořene trubek větších tlouštěk

## 2.2 Svařovací hořáky TIG [1], [9]

Svařovací hořák (viz obr. 16) má více základních funkcí. Přivádí elektrický proud k netavící wolframové elektrodě, další funkcí je přivádění a usměrňování ochranného plynu do místa svaru, fixování polohy elektrody a v neposlední řadě přívod a odvod chladicí vody. Při svaření stejnosměrným a střídavým proudem se používají hořáky stejné konstrukce, ale liší se velikostí. Při svařování střídavým proudem je nutné zohlednit podstatně větší zatížení elektrody, a tím i hořáku, než u svařování stejnosměrným proudem. Hořáky se rozdělují na plynem chlazené do 150 A a vodou chlazené v rozmezí 350 až 500 A. Vodou chlazené hořáky se využívají nejčastěji ve strojním svařování, ale využití mají i při ručním svařování. Pro upnutí wolframových elektrod slouží vyměnitelné kleštiny zajišťující upnutí a proudové napájení. Pevné upnutí snižuje přechodový odpor mezi kleštinou a wolframovou elektrodou. Kleštiny se upevňují pomocí ručně šroubované matice s krytem na elektrodu do kuželového otvoru. Plynová tryska slouží k usměrňování proudu plynu do místa svařování. Podle materiálu použitého na výrobu trysky rozlišujeme její využití. Pro ruční hořáky chlazené plynem se využívají keramické trysky, pro strojní hořáky chlazené vodou pak kovové trysky. Kovové trysky mohou být měděné nebo pochromované. Podle velikosti plochy, která má být chráněna, se volí průměr plynové trysky. Možné průměry plynových trysek (tab. 3).

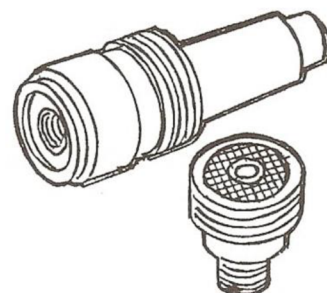


Obr. 16 Popis svařovacího hořáku TIG [1]

Tab. 3 Proudový rozsah a průměry plynových trysek [1].

Proudový rozsah (A)	Průměry plynové trysky (mm)
Do 70	6-9
70-150	9-11
150-250	11-13
250-300	13-15
300-500	15-18

Plynové čočky (sítka) (obr. 17) se využívají ke zlepšení plynové ochrany. Prodlužují laminární proudění plynu, které umožňuje lepší přístup k místu svařování vysunutím elektrody. Množství ochranného plynu se může snížit až o 50 % a vysunutí elektrody může dosáhnout 15 až 20 mm.

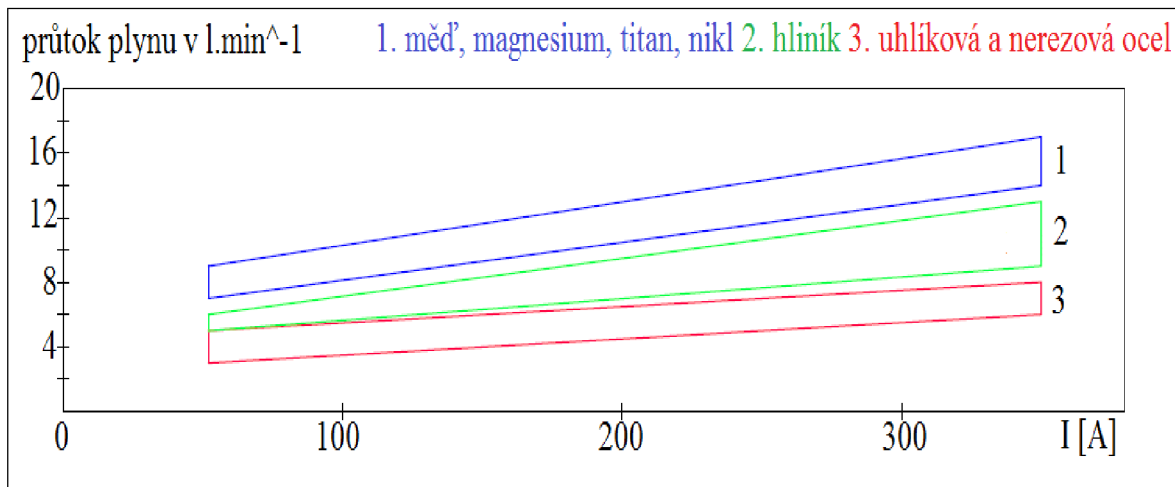


Obr. 17 Plynové sítko [1]

Optimální průtok plynu závisí na těchto parametrech:

- Druh svařovaného materiálu
- Typ ochranného plynu
- Hodnota proudu
- Velikost plynové trysky
- Úhel sklonu hořáku
- Rychlost proudění okolního vzduchu
- Typ spoje
- Svařovací poloha

Trubkové průtokoměry s kuličkou jsou využívány ke kontrole přiváděného množství ochranného plynu. Ochrana proti účinkům okolní atmosféry je docílena pomocí ochranného plynu, který zabraňuje kontaminaci svarové lázně před přístupem kyslíku nebo dusíku a v neposlední řadě chrání wolframovou elektrodu proti oxidaci. Závislost průtoku argonu v závislosti na svařovacím proudu je znázorněna pro různé materiály na obr. 18. Průtok plynu je třeba zvýšit přibližně o 30 % za použití směsi argonu s heliem. K vytvoření dokonalého plynového prostředí se využívá funkce předfuk. Proudění plynu začíná s předstihem 2 až 5 sekund před zapálením oblouku. Svařovací zařízení jsou také vybavena funkcí dofuku, která zajišťuje chlazení elektrody a svarového kovu prouděním ochranného plynu 5 až 10 sekund po vypnutí proudu. Funkce dofuku zajišťuje snížení na teploty, při kterých nehrozí oxidace. Délka trvání proudění plynu se při velké teplotě elektrody a nedostatečném ochlazení musí prodloužit.



Obr. 18 Závislost průtoku argonu na svařovacím proudu [1]

Hořáky jsou vybavené spínačem elektrického proudu, kterým se ovládá dvoutaktní nebo čtyřtaktní funkce spínání svařovacího proudu. Moderní hořáky mají možnost v průběhu svařování měnit svařovací proud na předem nastavené hodnoty, a to plynule nebo skokově. V některých případech se využívá zvonovitý kryt umístěný na hořáku k odsávání zplodin vznikajících při svařování. K příslušenství svařovacího zdroje patří také mechanický filtr, který slouží k čištění.

## 2.3 Netavící se wolframové elektrody [1], [9]

Při svařování TIG se využívají netavící wolframové elektrody. Vyrábějí se nelegované a mají obsah 99,9 % W, nebo se vyrábí rovnoměrně legované elektrody oxidy kovů thoria (Th), lanthanu (La), ceru (Ce), zirkonu (Zr) nebo yttria (Y). Oxidy kovů se využívají pro zvýšení životnosti, lepšího zapalování oblouku a jeho vyšší stabilitu, ale snižují teplotu ohřevu až o 1000 °C. Typ elektrody se volí podle typu proudu a oblasti využití. Elektrody jsou normalizované podle normy ČSN EN 26848. V tab. 4 je vyznačeno složení a barevné označení elektrod.

Vysvětlení označení wolframových elektrod:

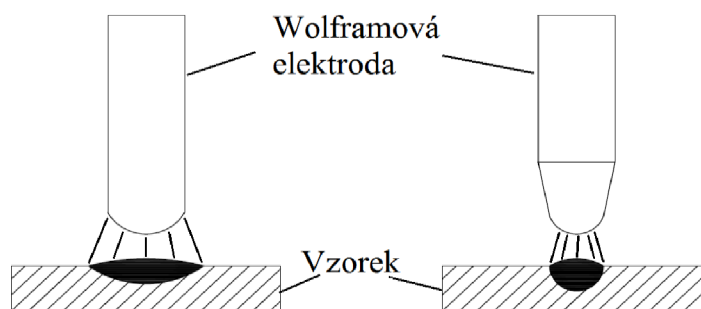
1. První písmenné označení: W (wolfram) – značí základní prvek
2. Další písmenné označení:
  - a. Přísady oxidů: T – oxid thoričitý, Z – oxid zirkoničitý, L – oxid lantaničitý, C – oxid ceričitý
  - b. Čistý wolfram: P
3. Číselné označení: znázorňuje desetinásobek koncentrace oxidů

Elektroda se označuje vždy na jednom konci barevným páskem v konkrétním barevném odstínu. Šířka barevného pásku je alespoň 3 mm.

Tab. 4 Vyráběné wolframové elektrody [1].

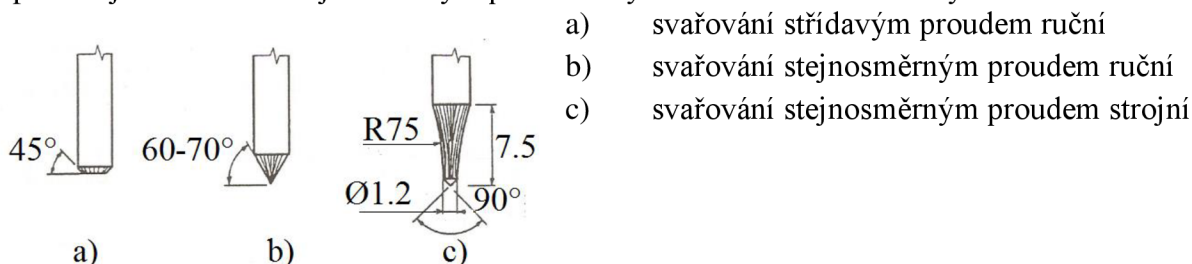
Označení	Hmotnost procento oxidů	Barevné označení
<b>WP</b>		Zelená
<b>WT 10</b>	ThO <sub>2</sub> 0,9 – 1,2	Žlutá
<b>WT 20</b>	ThO <sub>2</sub> 1,8 – 2,2	Červená
<b>WT 30</b>	ThO <sub>2</sub> 2,8 – 3,2	Fialová
<b>WT 40</b>	ThO <sub>2</sub> 3,8 – 4,2	Oranžová
<b>WZ 8</b>	ZrO <sub>2</sub> 0,7 – 0,9	Bílá
<b>WL 10</b>	LaO <sub>2</sub> 0,9 – 1,2	Červená
<b>WC 20</b>	CeO <sub>2</sub> 1,8 – 2,2	Šedá
<b>WL 20</b>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1,8 – 2,2	Modrá
<b>WS 2</b>	Vzácné zeminy	Tyrkysová
<b>WLYC 10</b>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CeO <sub>2</sub> 0,8 – 1,2	Zlatá

Elektrody se na funkčním konci upravují do potřebného tvaru. Tvar funkčního konce elektrody se určí podle druhu svařovacího proudu, polaritě na elektrodě při stejnosměrném proudu, velikosti svařovacího proudu na druhu materiálu a jeho tloušťce, nebo podle zvoleného svarového úkosu. Na obr. 19 je znázorněna změna hloubky závaru způsobená úhlem na funkčním konci elektrody.



Obr. 19 Hloubka závaru [1]

Způsoby svařování ovlivňují tvar funkčního konce elektrody pro ruční svařování střídavým proudem znázorňuje obr. 20 – a, ruční svařování stejnosměrným proudem obr. 20 – b a pro strojní svařování stejnosměrným proudem využíváme tvar znázorněný na obr. 20 – c.



Obr. 20 Tvarová úprava konců elektrod [1]

Tab. 5 Seznam wolframových elektrod s doporučeným proudovým zatížením [1].

Průměr Elektrody (mm)	Stejnoseměrný proud (A)		Střídavý proud (A)	
	Přímá polarita (- pól na elektrodě)		WP	WT, WL, WC, WZ
	WP	WT, WL, WC, WZ		
0,5	Do – 20	Do – 20	2 – 15	2 – 15
1,0	20 – 75	20 – 80	10 – 50	15 – 60
1,6	75 – 140	70 – 150	30 – 70	60 – 100
2,0	120 – 170	100 – 180	40 – 90	70 – 130
2,4	150 – 200	130 – 225	50 – 110	80 – 160
3,0	170 – 240	160 – 250	80 – 150	120 – 200
3,2	200 – 260	180 – 275	100 – 170	140 – 220
4,0	250 – 320	250 – 350	150 – 225	180 – 275
4,8	280 – 450	300 – 500	180 – 300	250 – 400
5,0		320 – 530	220 – 320	260 – 420
6,4		400 – 650	270 – 400	300 – 500

## 2.4 Ochranné inertní plyny [1], [9]

Ochranné plyny jsou důležitou součástí při svařování. Zajišťují ochranu netavicí elektrody, svarové lázně a jejího okolí proti přístupu okolního vzduchu. Především zabraňují oxidaci a naplynění. Ochranný plyn má dále pozitivní účinky nejen na stabilitu a zapálení oblouku, ale i na tvarování svaru.

Argon pozitivně ovlivňuje oblouk, který se lépe zapaluje, má vyšší stabilitu i při větší délce oblouku, dovoluje vysokou proudovou zatížitelnost a vysokých teplot dosahuje sloupec oblouku. Hustota argonu je 1,4krát větší než vzduchu, to má za následek vysokou plynovou ochranu. Čistota argonu je 99,995 %, ale pro některé materiály s vysokou afinitou ke kyslíku, jako např. titan, tantal, je potřeba vyšší čistoty a to mezi 99,998 % až 99,999 %. Ochrana argonem je nejběžnější nejen z důvodu použitelnosti pro většinu svařitelných materiálů, ale i z hlediska finančního.

Helium má velmi malou hustotu, která způsobuje snížení plynové ochrany. Dostatečné plynové ochrany dosáhneme navýšením průtoku plynu. Helium dosahuje čistoty 99,996 %. Helium disponuje vyšší tepelnou vodivostí, která způsobuje horší zapalování oblouku a při větší délce hoření se stává oblouk nestabilním. Dobrá tepelná vodivost zlepšuje přenos tepla v oblouku. Svařování v heliu má největší potenciál v mechanizovaném svařování.

Směsi argonu s heliem se využívají v rozdílných kombinacích. Při využití směsi argonu s heliem je dosahováno vyšších rychlostí svařování a zvyšuje se i hloubka závaru. Výhodou je, že v dnešní době je směs už namíchána v tlakových nádobách a není potřeba směšovacího zařízení. Nejvíce se využívá pro svařování mědi a hliníku. Základní kombinace argonu a helia:

- 70 % Ar + 30 % He
- 50 % Ar + 50 % He
- 30 % Ar + 70 % He

Se zvyšujícím se obsahem helia roste napětí na oblouku a tepelný výkon oblouku. Což má za následek lepší tvar a rozměr svaru.

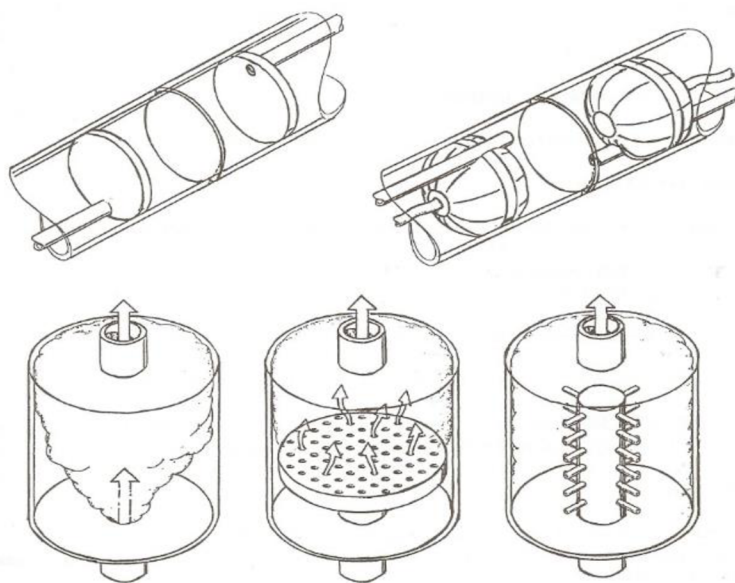
Směs argonu a vodíku má velmi omezené využití, a to na vysoce legované austenitické a austeniticko-feritické Cr-Ni oceli, nikl a jeho slitiny. Vlastnosti velmi podobné směsi Ar + He má směs Ar + H. Směs má velmi dobrou energetickou bilanci oblouku následkem vysoké tepelné vodivosti. Obsah vodíku je v rozmezí 5 až 10 %. Vodík v tomto rozmezí zlepšuje tvar a hloubku závaru, a přitom navyšuje rychlost svařování o 30 % až 50 %. Směs argonu s vodíkem použitá u jiných druhů ocelí, nebo mědi může způsobit praskavost za studena nebo vysokou pórovitost svaru. Povrch svaru je po použití vodíku bez oxidů a nečistot, a to kvůli jeho redukčnímu charakteru.

## 2.5 Formovací plyny [1]

Formovací plyny zabráňují oxidaci kořene svaru a ohřívání do vysokých teplot v okolí svaru. Používají se tři hlavní druhy plynu:

- Inertní
- Redukční
- Nereagující se svařovaným materiálem

Při svařování trubek se podle druhu využívaného formovacího plynu rozhoduje, zda bude plyn přiváděn do spodní části svařovaného úseku (formovací plyn těžší než vzduch) a vytlačí vzduch směrem nahoru, anebo bude přiváděn do horní části svařovaného úseku (formovací plyn lehčí než vzduch) a vytlačí vzduch spodem. Využívají se těsnící čela. Možné varianty těsnících čel jsou znázorněny na obr. 21.



Obr. 21 Varianty používané při svařování trubkových svarů [1]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

V experimentální části práce je provedeno porovnání dvou srovnatelných svařovacích technologií, a to plazmového svařování a svařování metodou TIG. Prostřednictvím svařování plazmou se vytvořily 3 návary a prostřednictvím metody svařování TIG 3 návary. Pro obě metody je využit stejný materiál, ale svařovacími parametry se pro každý vzorek liší. Porovnání vzorků se stanovilo podle hodnocení tvaru závazu, makrostruktury svarů, průběhu tvrdosti v příčném řezu a vneseného specifického tepla a tepelně ovlivněné oblasti.

#### 3.1 Vlastnosti základního a přídatného materiálu [11], [12], [13]

Pro experiment byla jako základní materiál zvolena korozivzdorná chrom-niklová austenitická ocel viz. tab. 6. Ocel má všeobecné využití například jako předvýrobky, tyče tvářené za tepla nebo za studena nebo jako materiál při výrobě přístrojů v potravinářském průmyslu. Vysoká použitelnost dané oceli je způsobena dobrou svařitelností, lešitelností, hlubokotažností, odolností proti opotřebením a je nemagnetovatelná. Při využívání v místech s výskytem halogenidů může docházet k bodové korozi. Je-li ocel vystavena teplotám v rozmezí 500 až 900 °C, po určitou dobu může dojít k mezikrystalové korozi. Aby nedocházelo k mezikrystalové korozi provádíme tepelné zpracování, a to rozpouštěcí žihání.

Přídavný materiál pro metodu svařování plazmou byl zvolen z katalogu přídatných svařovacích materiálů od firmy ESAB. Jedná se o přídatný materiál ve formě drátu s označením OK TIGROD 16.95 (viz tab. 8). Využívá se pro svařování austenitických nerezavějících ocelí s vysokým obsahem manganu. Svarový kov je austenitický i po promísení se základním materiálem. Jestli se jedná o austenitický kov, bude ověřeno pomocí Schaefflerova diagramu.

Tab. 6 Označení použitého materiálu [11].

Norma	ČSN	ČSN EN 10088-1	DIN	AISI
Označení	17 240	X5CrNi 18-10	1.4301	304

Tab. 7 Obsah prvků v oceli a mechanické vlastnosti oceli ČSN EN X5CrNi 18-10 [13].

Prvek	Obsah [%]	Mechanická vlastnost	Označení [jednotka]	Hodnota
C	≤0,07			
Si	≤1,00			
Mn	≤2,00			
P	≤0,045	Tvrđost [Vickers]	HV	226
S	≤0,03	Smluvní mez kluzu	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	190
N	≤0,11	Mez pevnosti	R <sub>m</sub> [MPa]	500-700
Cr	17,00-19,50	Tažnost	A [%]	45
Ni	8,00-10,50	Vrubová houževnatost	KV [J.min]	100

Tab. 8 Obsah prvků v přídatném materiálu [12].

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Ni
Obsah	<0,20	0,70	6,5	18,5	8,5



### 3.1.1 Schaefflerův diagram [5], [6], [18]

Konečná struktura po svařování je závislá na vzájemném poměru a množství jednotlivých přísad (chromu, manganu, molybdenu a dalších prvků) a je znázorněna ve strukturním diagramu, který zpracoval v roce 1949 Schaeffler. Jednotlivé přísady (legující prvky) určují svým množstvím odolnost proti korozi, žárovečnost, žáruvzdornost i magnetické a fyzikální vlastnosti a v neposlední řadě se podílí na tvorbě struktury oceli po volném vychladnutí.

- Feritotvorné: chrom, křemík a molybden
- Austenitotvorné: nikl, mangan, uhlík a dusík

Hlavní význam Schaefflerova diagramu je v tom, že posuzuje strukturní změny vyvolané např. zředěním svarového kovu základním materiálem a problémy, které by mohly nastat při svařování.

Základní vliv na strukturu po volném vychladnutí mají chrom a nikl. Účinek ostatních prvků se projevuje jako násobek účinku, např. ekvivalent chromu ( $Cr_e$ ) nebo niklu ( $Ni_e$ ). Hodnoty těchto ekvivalentů ovlivňují, zda je struktura martenzitická, feritická nebo austenitická. Mezi základními jednofázovými strukturami se na hranicích nacházejí struktury dvoufázové (A+F, A+M, F+M), ale i trojfázové. Tečkovaně jsou v diagramu znázorněny hranice oblastí, kde se při svařování vyskytují problémy jako křehnutí, opožděné trhliny, trhliny za horka a další. Diagram, výpočet  $Cr_e$  a  $Ni_e$  a detaily týkající se svařitelnosti jsou pouze informativní.

Výpočet chromového a niklového ekvivalentu:

- Pro základní materiál:

$$Cr_e = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (3.1)$$

kde:  $Cr_e$  – Chromový ekvivalent [%]

$$Cr_e = 19,5 + 0 + 1,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 21 \%$$

$$Ni_e = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C + 30 \cdot (N - 0,05) \quad (3.2)$$

kde:  $Ni_e$  – Niklový ekvivalent [%]

$$Ni_e = 10,5 + 0,5 \cdot 2 + 30 \cdot 0,07 + 30 \cdot (0,11 - 0,05) = 15,4 \%$$

- Pro přídatný materiál:

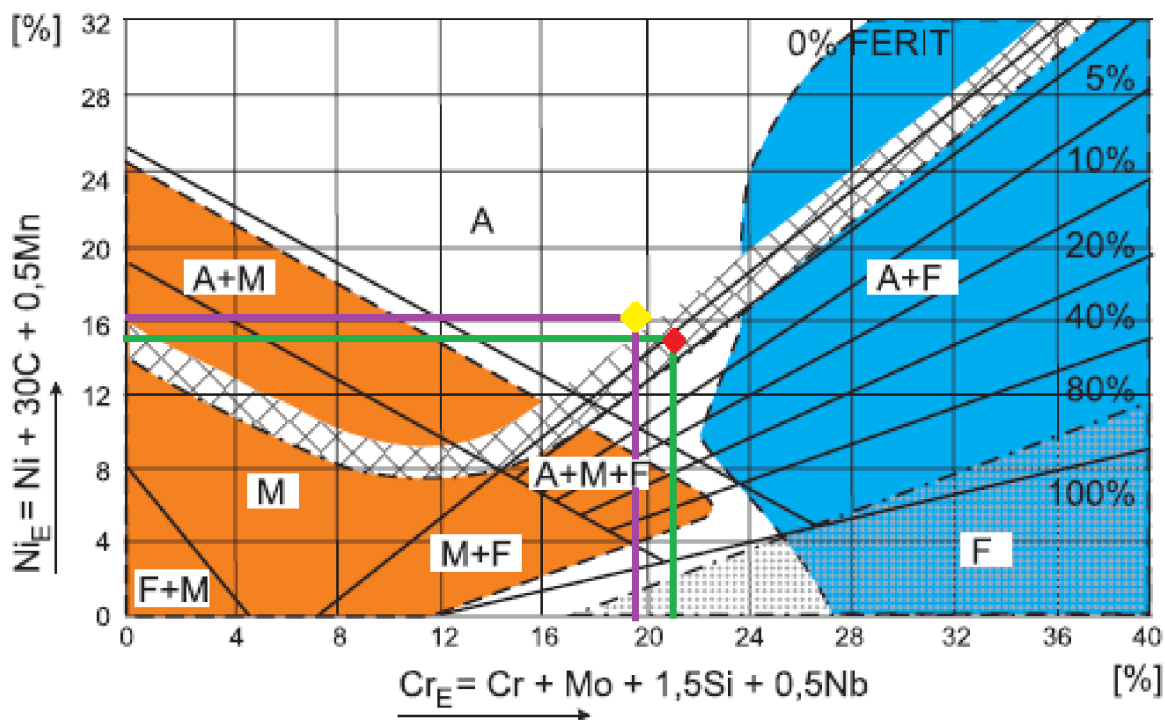
$$Cr_e = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti$$

$$Cr_e = 18,5 + 0 + 1,5 \cdot 0,7 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 19,55 \%$$

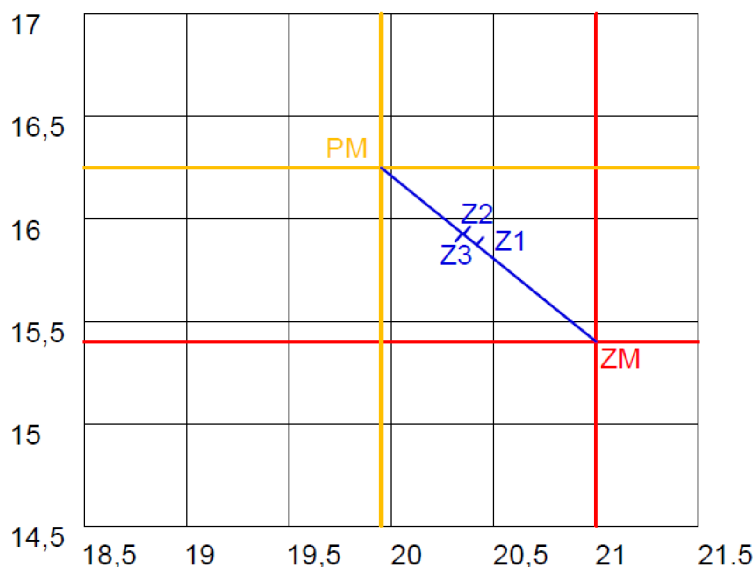
$$Ni_e = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C + 30 \cdot (N - 0,05)$$

$$Ni_e = 8,5 + 0,5 \cdot 6,5 + 30 \cdot 0,2 + 30 \cdot (0 - 0,05) = 16,25 \%$$

Po výpočtu chromového a niklového ekvivalentu, který byl následně vyznačen v grafu na obr. 22 bylo ověřeno, že se jedná o austenitickou ocel. Ocel se nachází v pásmu náchylném na trhliny za horka, které jsou nežádoucí. Trhliny za horka vznikají za teplot 1300 až 680 °C ve svarovém kovu a v teplem ovlivněné oblasti základního materiálu. Mají mezikrystalický charakter. Za hlavní příčinu vzniku trhlin se považují síra a fosfor, které tvoří se železem nízkotavitelné sulfidy a fosfidy. Omezení trhlin za horka lze dosáhnout vhodnou svařovací technologií s co nejmenším objemem tavné lázně, tj. s omezeným vneseným teplem. Důležité je zvolit také vhodný přídavný materiál s nízkým obsahem síry a fosforu.



Obr. 22 Schaefflerův diagram [5]



- ZM – Základní materiál
- PM – Přídavný materiál
- Z1 – Svarová lázeň pro Plazma 1
- Z2 – Svarová lázeň pro Plazma 1
- Z3 – Svarová lázeň pro Plazma 1
- Z1 = 44.4 %
- Z2 = 38.3 %
- Z3 = 37.8 %

Obr. 23 Vyznačení jednotlivých návarů v detailu Schaefflerova diagramu

### 3.2 Metoda svařování plazmou

Plazmové svařování je detailně vysvětleno v kapitole 1. Pro vyhodnocení experimentální části práce byly v dílně vytvořeny tři specifické vzorky (návary) pomocí svařování plazmou na svařovacím robotu KR5 ARC na obr. 24. Vzorky měly shodné svařovací parametry. Lišila se pouze rychlost podávání přídatného materiálu. Rychlost podávání přídatného materiálu ve formě drátu s označením OK TIGROD 16.95 se postupně u každého sledovaného vzorku zvyšovala. Kompletní parametry svařování plazmou, které byly nastaveny pro provedení vzorků, jsou zaznamenány v tab. 9. Dále bylo vypočítáno vnesené teplo podle vzorce 3.5, které není ovlivněno rychlostí podávání přídatného drátu. Proto vnesené teplo bude ve všech třech vzorcích mít stejnou hodnotu.



Obr. 24 Svařování plazmou

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s \cdot 10^3} \quad (3.3)$$

kde:  $Q_s$  – vnesené teplo [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]  
 $\eta$  – tepelná účinnost [-]  
 $U$  – svařovací napětí [U]  
 $I$  – svařovací proud [A]  
 $v_s$  – rychlost posuvu hořáku [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Po dosazení proměnných získáme hodnotu vneseného tepla:

$$Q_{SP} = 0,65 \cdot \frac{19 \cdot 128}{10^3 \cdot 6,64} = 0,238 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde:  $Q_{SP}$  – vnesené teplo při plazmovém svařování

Tab. 9 Parametry plazmového svařování.

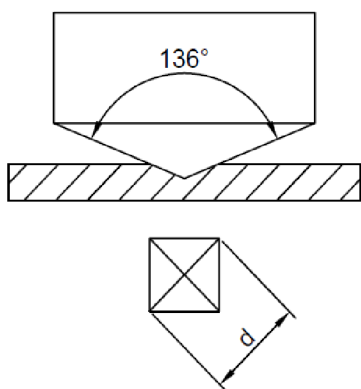
<b>Svařovací proud</b>	128 A	I [A]
<b>Svařovací napětí</b>	19 V	U [V]
<b>Rychlost posuvu hořáku</b>	6,64 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_s$ [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
<b>Tepelná účinnost</b>	0,65	$\eta$ [-]
<b>Rychlost podávání drátu</b>	$v_{d1}$	1,5 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
	$v_{d2}$	1,7 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
	$v_{d3}$	1,8 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

### 3.3 Hodnocení tvrdosti [14], [17]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse se dělí na zkoušku mikrotvrdosti, a to při zatížení 0,09807 až 1,961 N, na zkoušku tvrdosti při nízkém zatížení 1,961 až 49,03 N a na zkoušku tvrdosti při zatížení vyšším než 49,03 N.

Pro zkoušku se používá jako indentor čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  na obr. 25. Po provedení vtisku vznikne na zkoušeném materiálu pravidelný čtyřhranný vtisk. Aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění výsledku třením, volí se tento specifický úhel. Vtisk provedeme na zkoušeném materiálu a následně měříme jeho úhlopříčky a vypočítáme aritmetický průměr délek. Zkoušky provádíme za teplot 10 až  $35^\circ\text{C}$ .

Tato metoda dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrďší kalené ocele. Hodnoty tvrdosti jsou prakticky nezávislé na velikosti zatížení. Průmět vtisku nemusí být přesně čtvercový. U měkkých materiálů může být vtisk vydutý (viz obr. 26 - B) nebo u zpevněných materiálů může být vtisk vypuklý (obr. 26 - A).



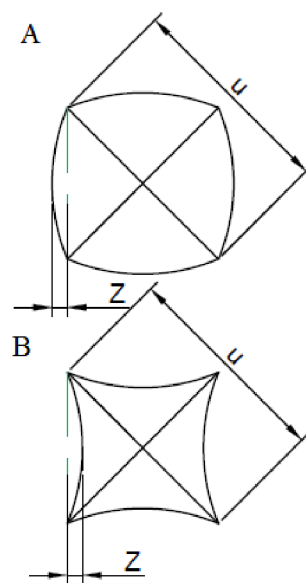
Obr. 25 Princip zkoušky [14]

zkoušku pouze u povrchů opracovaných na určitou drsnost a bez dalších nečistot, jako např. okují, mazadel a cizích látek.

Pro naši experimentální část probíhalo určování změny tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu metodou Vickerse. Na metalografickém výbrusu pro každý vzorek (návar, nátav) bylo naměřeno 6 hodnot v ose svaru. Při měření se postupovalo od okraje svaru směrem ke kořenu svaru. První naměřená hodnota byla vzdálena 0,5 mm od okraje svaru. Mezi dalšími měřeními byla konstantní vzdálenost 0,5 mm. Naměřené hodnoty byly zapsány a vyhodnoceny.

Výhodou měření podle Vickerse je, že naměřené hodnoty jsou velmi přesné a vtisky jsou poměrně malé. Malé vtisky jsou výhodné, protože nenastává velké poškození obrobenej plochy.

Nevýhody této metody jsou spatřeny u určitých kovů hrubozrnných nebo nehomogenních, jako je šedá litina zde je malý vtisk nevýhodný a nelze získat jednoznačné výsledky. Zásadní nevýhodou této metody, že lze provádět



Obr. 26 Deformace [17]

- Vzorek 1 pro svařování plazmou (Plazma 1)

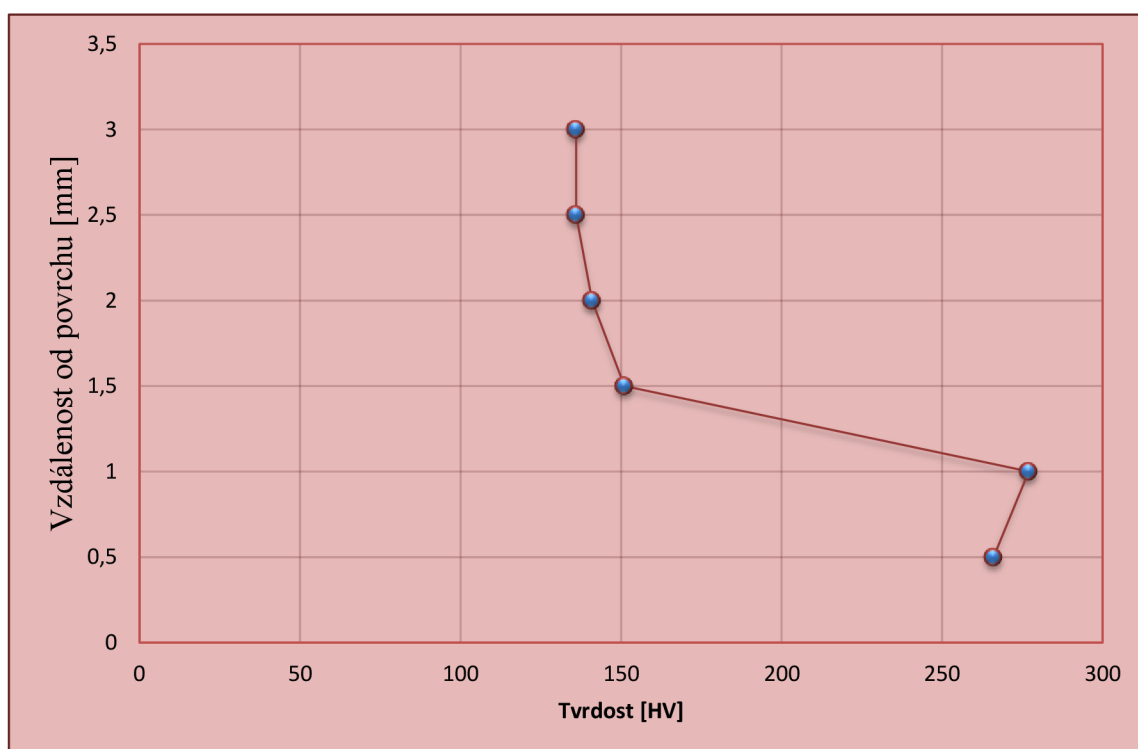
Rychlost podávání přídatného materiálu (drátu) pro vzorek Plazma 1 byla nastavena na hodnotu  $v_{dl} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Byl vytvořen metalografický výbrus vzorku Plazma 1, který je zobrazen na obr. 27. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zaznamenány v tab. 10. Průběh tvrdosti je znázorněn v grafu závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru na obr. 28. Vnesené teplo je  $Q_{SP}=0,238 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Tepelně ovlivněná oblast není dostatečně zřetelná na metalografickém výbrusu.

Tab. 10 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek Plazma 1.

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Tvrđost [HV]	266	277	151	141	136	136



Obr. 27 Metalografický výbrus vzorku Plazma 1



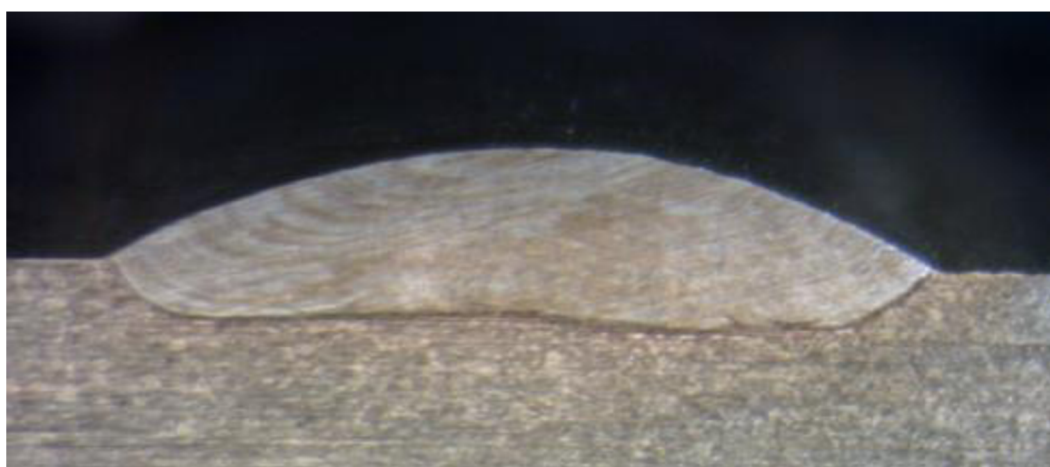
Obr. 28 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku Plazma 1

- Vzorek 2 pro svařování plazmou (Plazma 2)

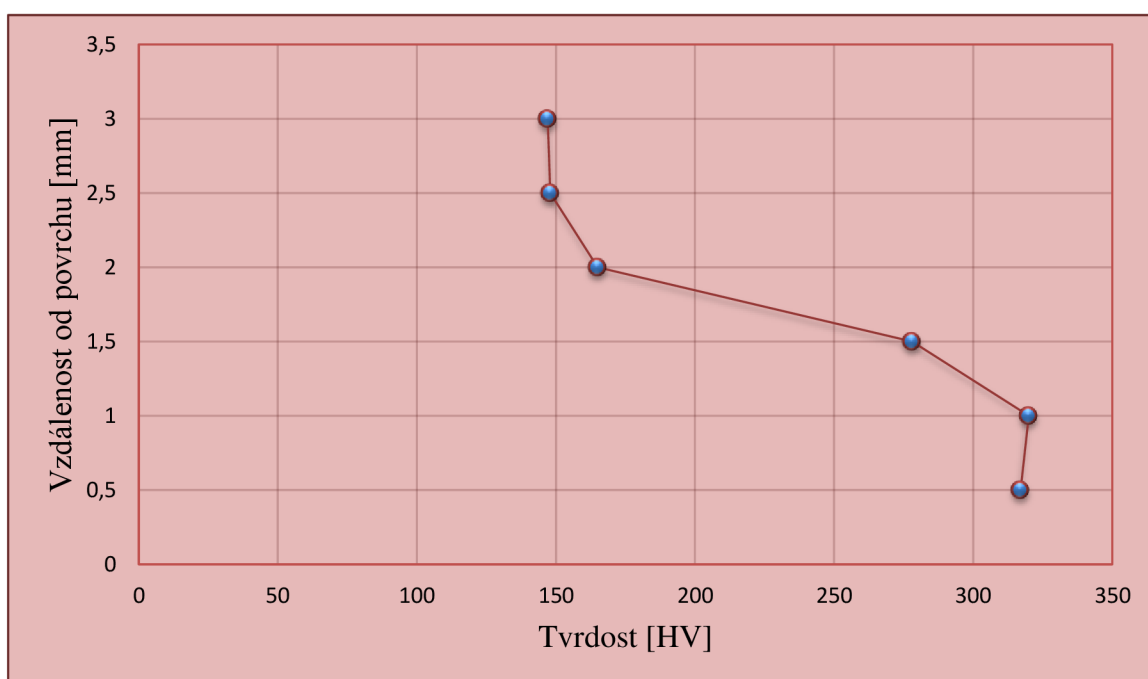
Rychlost podávání přídatného materiálu (drátu) pro vzorek Plazma 2 byla nastavena na hodnotu  $v_{d2} = 1,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Byl vytvořen metalografický výbrus vzorku Plazma 2, který je zobrazen na obr. 29. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zaznamenány v tab. 11. Průběh tvrdosti je znázorněn v grafu závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru na obr. 30. Vnesené teplo je  $Q_{SP}=0,238 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Tepelně ovlivněná oblast není dostatečně zřetelná na metalografickém výbrusu.

Tab. 11 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek Plazma 2.

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Tvrdość [HV]	317	320	278	165	148	147



Obr. 29 Metalografický výbrus vzorku Plazma 2



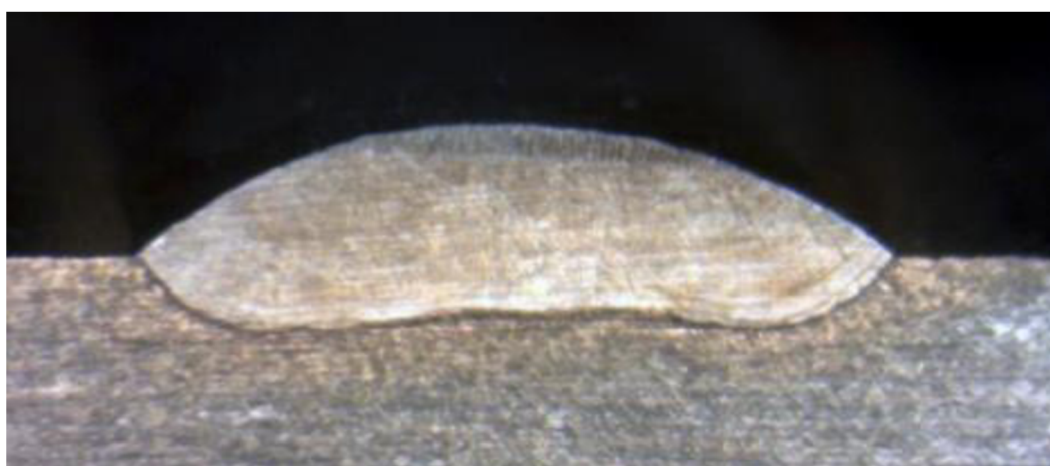
Obr. 30 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku Plazma 2

- Vzorek 3 pro svařování plazmou (Plazma 3)

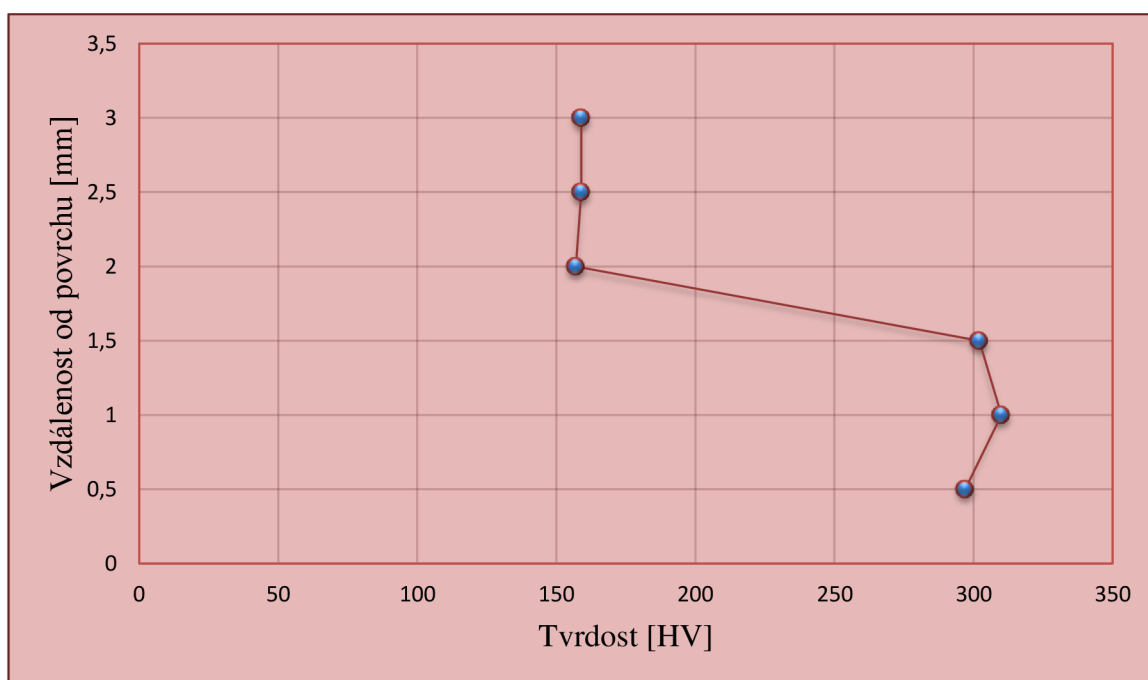
Rychlost podávání přídatného materiálu (drátu) pro vzorek Plazma 3 byla nastavena na hodnotu  $v_{d3} = 1,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Byl vytvořen metalografický výbrus vzorku Plazma 3, který je zobrazen na obr. 31. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zaznamenány v tab. 12. Průběh tvrdosti je znázorněn v grafu závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru na obr. 32. Vnesené teplo je  $Q_{SP}=0,238 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Tepelně ovlivněná oblast není dostatečně zřetelná na metalografickém výbrusu.

Tab. 12 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek Plazma 3.

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Tvrdość [HV]	297	310	302	157	159	159



Obr. 31 Metalografický výbrus vzorku Plazma 3



Obr. 32 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku Plazma 3

### 3.4 Výpočet zředění svarového kovu [4]

Svarová lázeň je formována z nataveného základního materiálu a odtaveného přídavného materiálu. Podíl základního a přídavného materiálu se může podle metody svařování lišit.

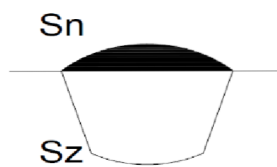
Podíl základního a přídavného materiálu v návaru je důležitý, když se výrazně liší chemické složení svarového kovu a základního materiálu.

Procentuální obsazení základního materiálu  $Z$  ve svarovém kovu spoje se určí na základě stanovené plochy závaru a návaru z makrosnímku svaru (viz schematický obr. 35) a ze vztahu (3.4).

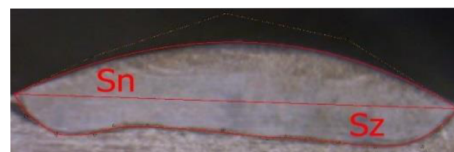
Plochy návarů byly získány pomocí softwaru Autodesk Inventor a zaznamenány v tab. 13.

Tab. 13 Plochy návaru a závaru.

Naměřené hodnoty	P1	P2	P3
$S_n$	7836	1185	1190
$S_z$	6257	735	723



Obr. 35 Schéma plochy návaru a závaru [4]



Obr. 33 Plocha návaru a závaru P1



Obr. 34 Plocha návaru a závaru P2



Obr. 36 Plocha návaru a závaru P3

$$Z = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100 [\%] \quad (3.4)$$

kde:  $Z$  – Zředění svarového kovu

$S_z$  – Plocha závaru

$S_n$  – Plocha návaru

$$Z_1 = \frac{6257}{6257 + 7836} \cdot 100 [\%]$$

$$Z_1 = 44,4 \%$$

$$Z_2 = \frac{735}{735 + 1185} \cdot 100 [\%]$$

$$Z_2 = 38,3 \%$$

$$Z_3 = \frac{723}{723 + 1190} \cdot 100 [\%]$$

$$Z_3 = 37,8 \%$$



### 3.5 Metoda svařování TIG

Za pomoci svařovací technologie TIG (Tungsten Inert Gas) byly vytvořeny tři nátaavy za účelem porovnat je s technologií svařování plazmou. Nátaavy byly provedeny na svařovacím automatu se svařovacím agregátem FRC4 značky Fronius (obr. 37). Pro tu to metodu nebyl použit žádný přídavný materiál, proto nehovoříme o návarech, ale o nátaavech. Jednotlivé nátaavy se lišily v parametrech nastavení svařovacího agregátu, a to v napětí a proudu. Dokončené nátaavy jsou zobrazeny na obr. 38. Parametry jsou uvedeny v tab. 14. Posuv hořáku a hodnoty účinnosti byly pro všechny tři nátaavy stejné. Zředění svarového kovu nebylo nutné vyhodnotit, protože nebyl využit přídavný materiál. Vnesené teplo bylo spočítáno pro každý nátaav samostatně, jelikož se pro každý nátaav lišily svařovací parametry.



Obr. 37 Svařovací automat a agregát FRC4



Obr. 38 Dokončené nátaavy

Tab. 14 Parametry svařování metodou TIG pro jednotlivé nátaavy.

Vzorek	Svařovací proud	Svařovací napětí	Účinnost	Rychlost posuvu hořáku
	[I]	[V]	$\eta$ [-]	[mm.s <sup>-1</sup> ]
<b>T1</b>	128	16	0,65	6,67
<b>T2</b>	182	19	0,65	6,67
<b>T3</b>	259	25	0,65	6,67

Pro jednotlivé nátaavy provedeme výpočet vneseného tepla dle vztahu (3.3):

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

- Vzorek 1

$$Q_{ST1} = 0,65 \cdot \frac{16 \cdot 128}{10^3 \cdot 6,67} = 0,202 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde:  $Q_{ST}$  – vnesené teplo při svařování metodou TIG

- Vzorek 2

$$Q_{ST2} = 0,65 \cdot \frac{19 \cdot 182}{10^3 \cdot 6,67} = 0,336 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Vzorek 3

$$Q_{ST3} = 0,65 \cdot \frac{25 \cdot 260}{10^3 \cdot 6,67} = 0,630 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

### 3.6 Hodnocení tvrdosti

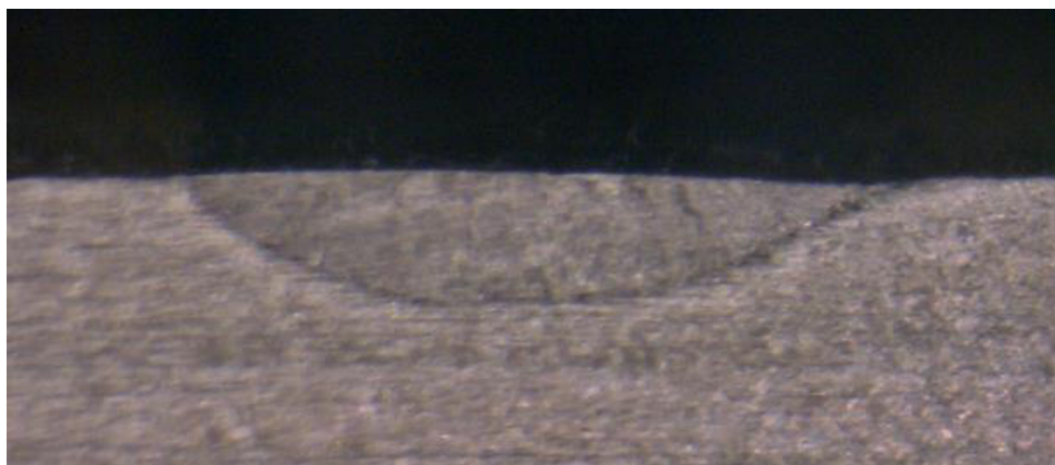
Hodnocení tvrdosti u metody TIG probíhalo za stejných podmínek a postupů jako u metody plazmového svařování (viz kapitola 3.3).

- Vzorek 1 pro svařování TIG (TIG 1)

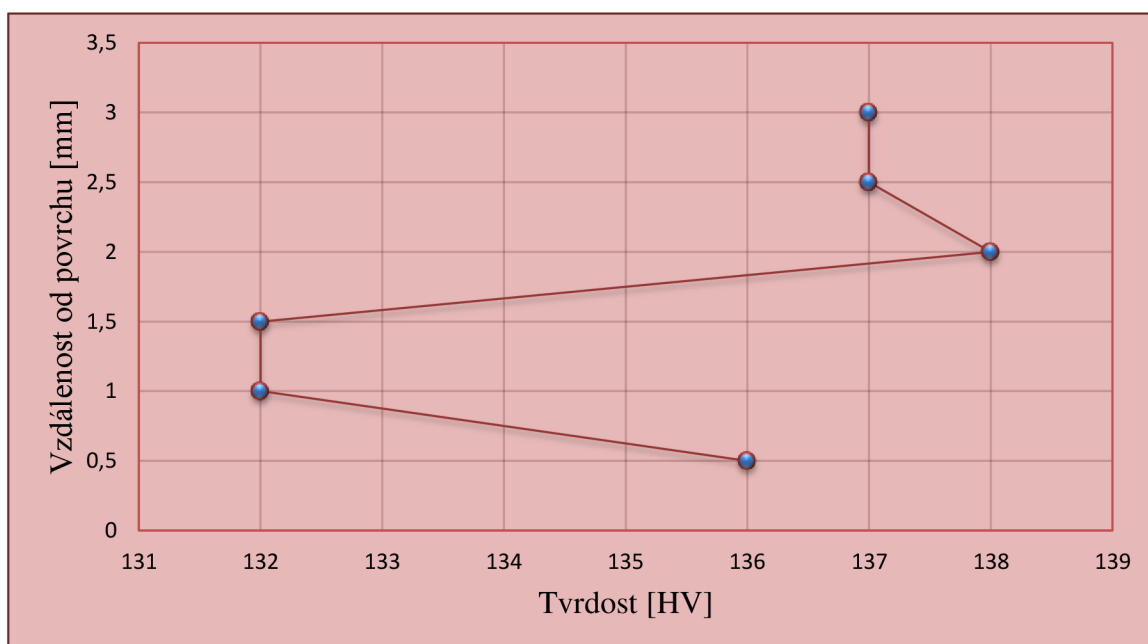
Svařovací parametry pro vzorek TIG 1 byly nastaveny na hodnotu proudu 128 A a na hodnotu napětí 16 V. Byl vytvořen metalografický výbrus vzorkem TIG 1, který je zobrazen na obr. 39. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zaznamenány v tab. 15. Průběh tvrdosti je znázorněn v grafu závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru na obr. 40. Vnesené teplo je  $Q_{STI}=0,202 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Tepelně ovlivněná oblast není dostatečně zřetelná na metalografickém výbrusu.

Tab. 15 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek TIG 1.

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Tvrdost [HV]	136	132	132	138	137	137



Obr. 39 Metalografický výbrus vzorku TIG 1



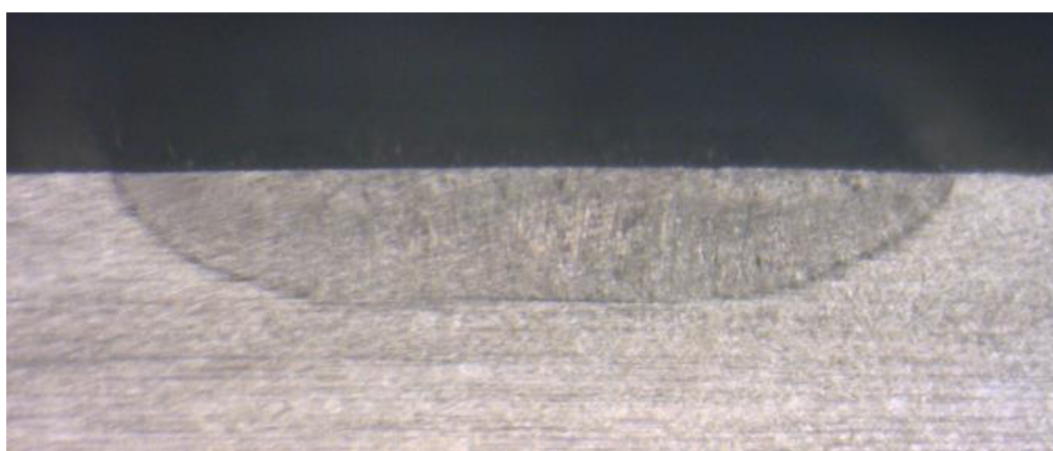
Obr. 40 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku TIG 1

- Vzorek 2 pro svařování TIG (TIG 2)

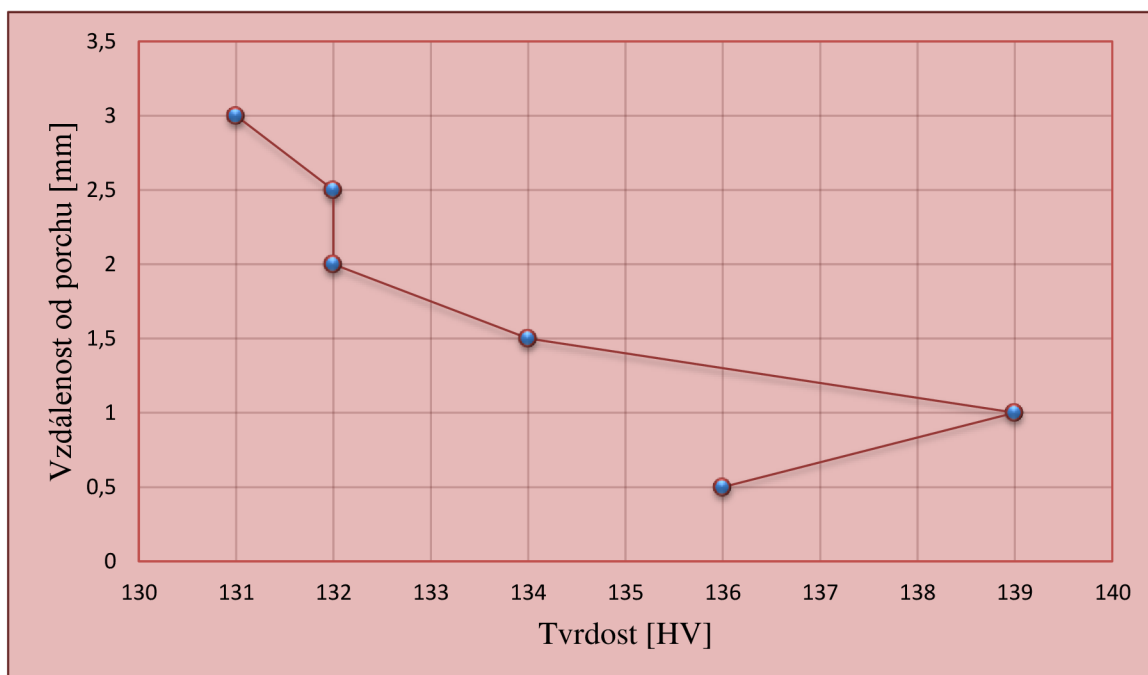
Svařovací parametry pro vzorek TIG 2 byly nastaveny na hodnotu proudu 182 A a na hodnotu napětí 19 V. Byl vytvořen metalografický výbrus vzorkem TIG 2, který je zobrazen na obr. 41. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zaznamenány v tab. 16. Průběh tvrdosti je znázorněn v grafu závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru na obr. 42. Vnesené teplo je  $Q_{ST2}=0,336 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Tepelně ovlivněná oblast není dostatečně zřetelná na metalografickém výbrusu.

Tab. 16 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek TIG 2.

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Tvrdość [HV]	136	139	134	132	132	131



Obr. 41 Metalografický výbrus vzorku TIG 2



Obr. 42 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku TIG 2

- Vzorek 3 pro svařování TIG (TIG 3)

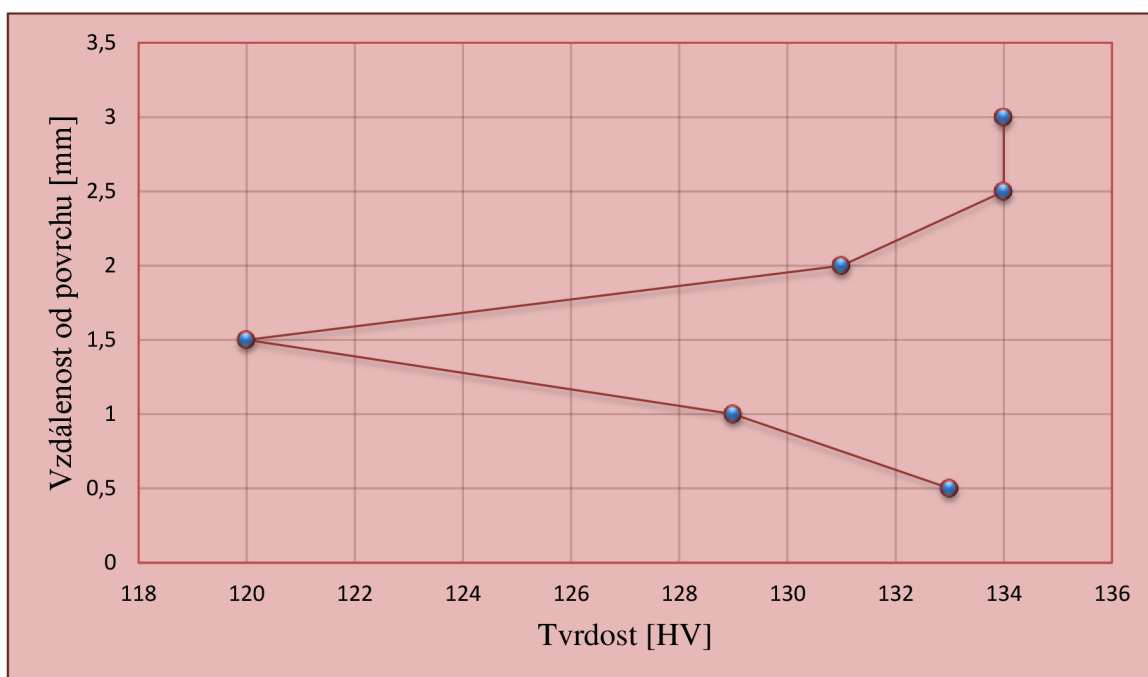
Svařovací parametry pro vzorek TIG 3 byly nastaveny na hodnotu proudu 259 A a na hodnotu napětí 25 V. Byl vytvořen metalografický výbrus vzorkem TIG 3, který je zobrazen na obr. 43. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zaznamenány v tab. 17. Průběh tvrdosti je znázorněn v grafu závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru na obr. 44. Vnesené teplo je  $Q_{ST3}=0,336 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Tepelně ovlivněná oblast není dostatečně zřetelná na metalografickém výbrusu.

Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek TIG 3.

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Tvrdość [HV]	133	129	120	131	134	134



Obr. 43 Metalografický výbrus vzorku TIG 3



Obr. 44 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku TIG 3

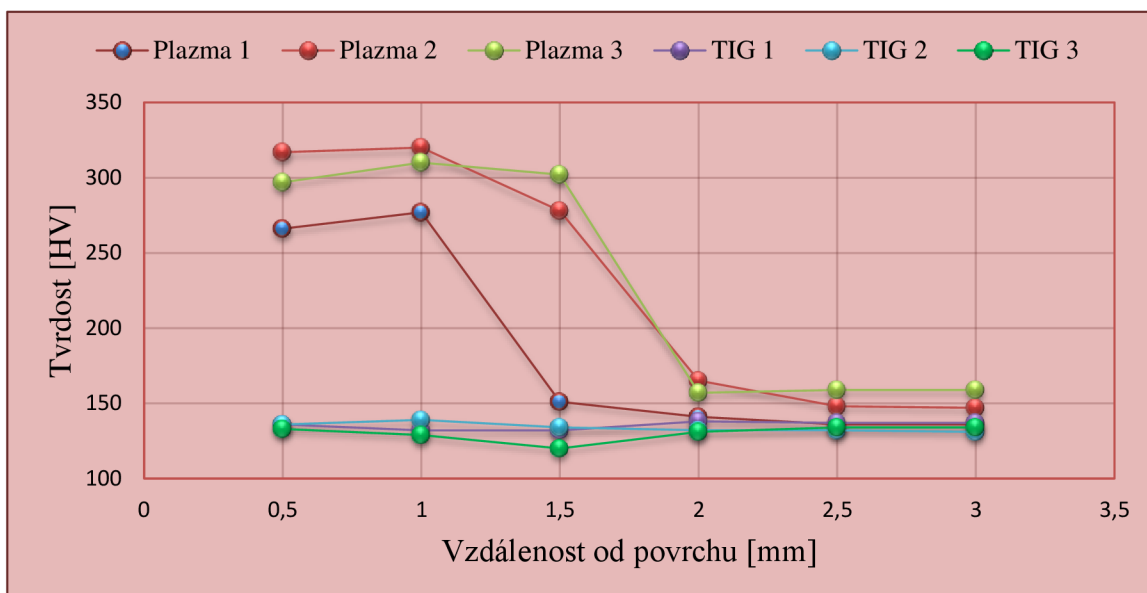
### 3.7 Porovnání svařování TIG a Plazmy

Svařování plazmou a svařování TIG bylo vyhodnoceno zvlášť pro každou metodu. Jelikož se jedná o dvě srovnatelné svařovací technologie, tak pro shrnutí a přehlednost budou data a poznatky získané v experimentální části porovnány mezi sebou.

První porovnání bude provedeno pro průběh tvrdosti v příčném řezu. Hodnoty budou zaznamenány v tab. 18 a porovnány v grafu na obr. 45.

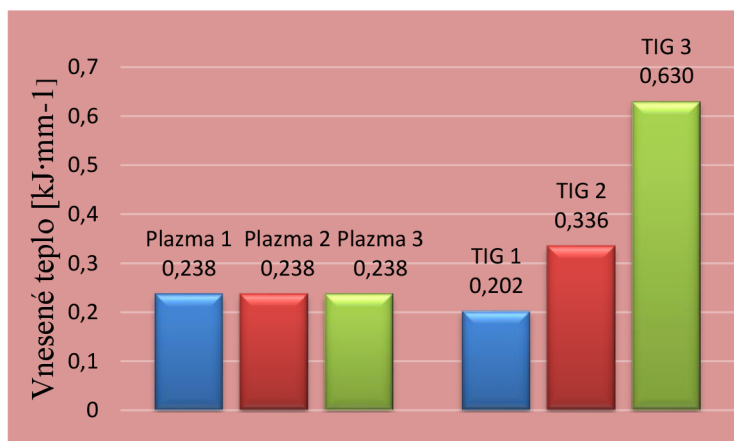
Tab. 18 Souhrnná tabulka pro naměřené tvrdosti.

Vzorek	Vzdálenost od povrchu						Hodnoty
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	[mm]
<b>Plazma 1</b>	266	277	151	141	136	136	[HV]
<b>Plazma 2</b>	317	320	278	165	148	147	
<b>Plazma 3</b>	297	310	302	157	159	159	
<b>TIG 1</b>	136	132	132	138	137	137	
<b>TIG 2</b>	136	139	134	132	132	131	
<b>TIG 3</b>	133	129	120	131	134	134	



Obr. 45 Souhrnný graf znázorňující průběh tvrdosti

Druhé porovnání bude provedeno pro specifické vnesené teplo. Při svařování plazmou se vnesené teplo nezměnilo pro všechny tři návary. U svařování metodou TIG se vnesené teplo pro každý nátav lišilo. Porovnání specifického vneseného tepla na obr. 46.



Obr. 46 Porovnání vneseného tepla

Nakonec budou porovnány svařovací parametry jako svařovací proud, svařovací napětí, účinnost, rychlost posuvu trysky a pro svařování plazmou rychlost podávání přídatného materiálu ve formě drátu a zředění svarového kovu. Pro svařování metodou TIG bude zředění kovu 100 %, jelikož nebyl použit přídatný materiál.

Tab. 19 Svařovací parametry a naměřené hodnoty.

Parametry	Návar / nátav						Označení [Jednotka]
	Plazma 1	Plazma 2	Plazma 3	TIG 1	TIG 2	TIG 3	
Svařovací proud	128	128	128	128	182	259	I [A]
Svařovací napětí	19	19	19	16	19	25	U [V]
Účinnost	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	$\eta$ [-]
Rychlost posuvu hořáku	6,64	6,64	6,64	6,67	6,67	6,67	$v_s$ [mm·s <sup>-1</sup> ]
Rychlost podávání drátu	1,5	1,7	1,8	-	-	-	$v_d$ [m·min <sup>-1</sup> ]
Zředění	44,4	38,3	37,8	100	100	100	Z [%]

## 4 ZÁVĚRY

Bakalářská práce se zabývá porovnáním dvou srovnatelných metod svařování, a to svařování plazmou a svařování metodou TIG. Princip fungování obou svařovacích metod byl popsán v teoretické části.

Pro experimentální část bakalářské byl zvolen základní materiál korozivzdorná chrom-niklová austenitická ocel s označením X5CrNi 18-10. Jako přídavný materiál byl zvolen drát OK TIGROD 16.95 určený pro svařování austenitických nerezavějících ocelí. V experimentální části bylo hodnoceno celkově 6 vzorků. Pro každou svařovací metodu byly vytvořeny 3 vzorky, které se lišily ve svařovacích parametrech. U vzorků byl hodnocen průběh tvrdosti v příčném řezu, makrostruktura svarů, tepelně ovlivněná oblast a bylo stanovené specifické vnesené teplo.

Vypočet specifického vneseného tepla probíhal dosazením naměřených teplot do daného vztahu. Pro metodu svařování plazmou se specifické vnesené teplo u vzorků neliší, jelikož byly nastaveny pro všechny tři vzorky stejné svařovací parametry, jen se lišila rychlost podávání přídavného materiálu ve formě drátu a ta specifické vnesené teplo neovlivňovala. U vzorků provedených metodou TIG se specifické vnesené teplo lišilo podle nastavených svařovacích parametrů. Vnesené teplo ovlivňovaly svařovací proud a svařovací napětí, čím vyšší hodnoty byly nastaveny, tím vyšší bylo specifické vnesené teplo.

Tepelně ovlivněná oblast nebyla na metalografickém výbrusu vzorků dostatečně zřetelná, proto nebyly označeny rozměry tepelně ovlivněné oblasti.

Hodnocení tvrdosti probíhalo zkouškou podle Vickerse. Základní materiál má tabulkovou tvrdost 226 HV. Pro vzorky provedené metodou svařování plazmou mají hodnoty naměřené na okraji svaru výrazně vyšší hodnoty tvrdosti než hodnoty naměřené u kořene svaru. Zato pro vzorky vytvořené metodou svařování TIG se hodnoty na okraji svaru a u kořene svaru se téměř neliší.

Pro ověření konečné struktury svařovaného materiálu byl vypočten chromový a niklový ekvivalent základního materiálu a přídavného materiálu dle daného vztahu a dále vyznačen do Schaefflerova diagramu. Pro metodu svařování plazmou, kde byl použit přídavný materiál ve formě drátu, bylo vypočítáno zředění svarového kovu dle daného vztahu. Vypočtené hodnoty byly následně vyznačeny v detailu Schaefflerova diagramu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [10]

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1.vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
2. FOREJT, Milan. *Základy průmyslové technologie: studijní opora*. 1. vyd. Brno: Sting, 2008. ISBN 978-808-6342-757.
3. MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování*. 1.vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 151 s. ISBN 978-80-7372-439-9.
4. NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení: Tavné svařování*. 1.vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, 167 s. ISBN 978-80-7494-171-9.
5. NOVÁK, Petr. *Vliv technologie heterogenního svařování na korozní odolnost povrchu*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Milan Vnouček.
6. PILOUS, Václav. *Technologie kovových materiálů*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 126 s. ISBN 978-80-7043-699-8.
7. SCHLIXBIER, Michal. Trendy vývoje svařování plazmou. *Konstrukce: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství*. KONSTRUKCE Media, 2005, 4(4), 106 - 107. ISSN 1803-8433.
8. SOLAŘ, Luboš. *Porovnání technologií kyslíkového a plazmového řezání*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ladislav Daněk.
9. UHER, Vladimír, Ivan VITÁLOŠ, Juraj KOVÁČ, et al. *Zváracie metódy a zariadenia: II. diel učebných textov pre kurzy zvaračských technologov*. 1.vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000, 616 s. Sváření. ISBN 80-857-7184-5.
10. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
11. BOLZANO. *Materiálové listy* [online]. 2017 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
12. *ESAB: Katalog přídavných svařovacích materiálů*. 4. vyd. Vamberk: ESAB VAMBERK, 2011, 583 s.
13. Feron: E-železná kniha. *Materiálové normy* [online]. 2017 [cit. 2017-30-1]. Dostupné z: [http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)
14. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse: část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
15. ZN,UA: ekonomika. In: *ZN,UA* [online]. Ukrajina, 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://image.zn.ua/media/images/original/May2016/148570.jpg>
16. Ethyn. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ethyn>
17. NĚMEČEK. *Oddělení povrchového inženýrství: Zkoušky tvrdosti* [online]. 2006 [cit. 2017-03]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
18. ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. Brno: Vysoké učení technické, 1988. 55-573-88.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
Cr <sub>e</sub>	Chromový ekvivalent	[%]
I	Svařovací proud	[A]
I <sub>p</sub>	Impulzní proud	[A]
I <sub>z</sub>	Základní proud	[A]
Ni <sub>e</sub>	Niklový ekvivalent	[%]
Q <sub>s</sub>	Vnesené teplo	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
Q <sub>SP</sub>	Vnesené teplo při svařování plazmou	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
Q <sub>ST</sub>	Vnesené teplo při svařování metodou TIG	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
S <sub>n</sub>	Plocha návaru	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>z</sub>	Plocha závaru	[mm <sup>2</sup> ]
U	Svařovací napětí	[V]
v <sub>d</sub>	Rychlost podávání drátu	[m·min <sup>-1</sup> ]
v <sub>s</sub>	Rychlost posuvu hořáku	[mm·s <sup>-1</sup> ]
Z	Zředění svarového kovu	[%]
η	Tepelná účinnost	[-]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování Kyslíkoacetylenovým plamenem [16].....	9
Obr. 2 Svařování elektrickým obloukem s obalenou elektrodou [15].....	9
Obr. 3 Průběh disociace a ionizace plynů v závislosti na teplotě [8] .....	10
Obr. 4 Princip plazmového hořáku [1] .....	11
Obr. 5 Plazmový paprsek [7] .....	12
Obr. 6 Popis plazmového oblouku [7] .....	12
Obr. 7 Úprava svarových ploch pro Cr-Ni oceli [1] .....	13
Obr. 8 Porovnání úprav svarových ploch pro různé metody [7] .....	13
Obr. 9 Časové průběhy svářecího proudu [9] .....	15
Obr. 10 Voltampérová charakteristika zdroje [1] .....	15
Obr. 11 Základní sestava zařízení pro svařování TIG stejnosměrným proudem [9].....	16
Obr. 12 Základní sestava zařízení pro svařování TIG střídavým proudem [9] .....	17
Obr. 13 Svařování TIG [7].....	17
Obr. 14 Popis svařovacího oblouku [7] .....	17
Obr. 15 Průběh pravoúhlého impulsního proudu [1] .....	18
Obr. 16 Popis svařovacího hořáku TIG [1].....	19
Obr. 17 Plynové sítko [1].....	19
Obr. 18 Závislost průtoku argonu na svařovacím proudu [1].....	20
Obr. 19 Hloubka závaru [1] .....	21
Obr. 20 Tvarová úprava konců elektrod [1] .....	22
Obr. 21 Varianty používané při svařování trubkových svarů [1] .....	23
Obr. 22 Schaefflerův diagram [5] .....	26
Obr. 23 Vyznačení jednotlivých návarů v detailu Shaefflerova diagramu .....	26
Obr. 24 Svařování plazmou .....	27
Obr. 25 Princip zkoušky [14].....	28
Obr. 26 Deformace [17].....	28
Obr. 27 Metalografický výbrus vzorku Plazma 1 .....	29
Obr. 28 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku Plazma 1 .....	29
Obr. 29 Metalografický výbrus vzorku Plazma 2 .....	30
Obr. 30 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku Plazma 2 .....	30
Obr. 31 Metalografický výbrus vzorku Plazma 3 .....	31
Obr. 32 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku Plazma 3 .....	31
Obr. 33 Plocha návaru a závaru P1 .....	32
Obr. 34 Plocha návaru a závaru P2 .....	32
Obr. 35 Schéma plochy návaru a závaru [4].....	32
Obr. 36 Plocha návaru a závaru P3 .....	32
Obr. 37 Svařovací automat a agregát FCR4 .....	33
Obr. 38 Dokončené nátavy .....	33
Obr. 39 Metalografický výbrus vzorku TIG 1 .....	34
Obr. 40 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku TIG 1 .....	34
Obr. 41 Metalografický výbrus vzorku TIG 2 .....	35
Obr. 42 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku TIG 2 .....	35
Obr. 43 Metalografický výbrus vzorkem TIG 3 .....	36
Obr. 44 Graf znázorňující průběh tvrdosti na vzorku TIG 3 .....	36
Obr. 45 Souhrnný graf znázorňující průběh tvrdosti .....	37
Obr. 46 Porovnání vneseného tepla .....	37

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Pro používaná prostředí platí tyto přibližné průměrné teploty plazmy [3].....	11
Tab. 2 Plyny pro stabilizaci plazmy [3]. .....	14
Tab. 3 Proudový rozsah a průměry plynových trysek [1].....	19
Tab. 4 Vyráběné wolframové elektrody [1].....	21
Tab. 5 Seznam wolframových elektrod s doporučeným proudovým zatížením [1]. .....	22
Tab. 6 Označení použitého materiálu [11].....	24
Tab. 7 Obsah prvků v oceli a mechanické vlastnosti oceli ČSN EN X5CrNi 18-10 [13].....	24
Tab. 8 Obsah prvků v přídatném materiálu [12]. .....	24
Tab. 9 Parametry plazmového svařování. ....	27
Tab. 10 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek Plazma 1. ....	29
Tab. 11 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek Plazma 2. ....	30
Tab. 12 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek Plazma 3. ....	31
Tab. 13 Plochy návaru a závaru. ....	32
Tab. 14 Parametry svařování metodou TIG pro jednotlivé nátavy. ....	33
Tab. 15 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek TIG 1. ....	34
Tab. 16 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek TIG 2. ....	35
Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek TIG 3. ....	36
Tab. 18 Souhrnná tabulka pro naměřené tvrdosti. ....	37
Tab. 19 Svařovací parametry a naměřené hodnoty. ....	38

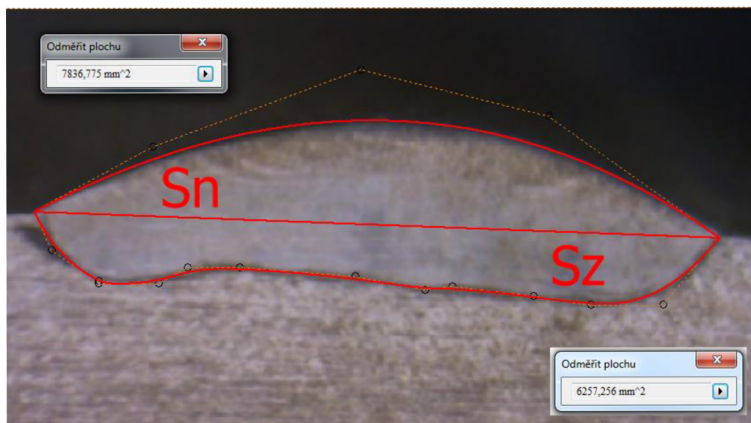
## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Plocha návaru a závaru P1
- Příloha 2 Plocha návaru a závaru P2
- Příloha 3 Plocha návaru a závaru P3

## PŘÍLOHY

Příloha 1 Plocha návaru a závaru P1

1/1



Příloha 2 Plocha návaru a závaru P2

1/1



Příloha 3 Plocha návaru a závaru P3

1/1

