



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ PLAZMOVÉHO OBLOUKU V TECHNICKÉ PRAXI

APPLICATION OF PLASMA ARC IN TECHNICAL PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Zajíc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Jiří Zajíc
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
Akademický rok:	2015/16

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:

Využití plazmového oblouku v technické praxi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Plazmový oblouk jako zdroj tepla s teplotou nad 16 tisíc K umožňuje aplikace v mnoha technologických postupech: Svařování, tepelném dělení, žárových nástřících, tepelném zpracování kovů. Popis těchto postupů s důrazem na svařování.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše a popis technologií využívajících plazmový oblouk: svařování, tepelné dělení, žárové stříkání a tepelné zpracování.

Porovnání svarů provedených metodou TIG a plazmou. Vyhodnocení vybraných vlastností (makrostruktura a tvrdosti).

Seznam literatury:

AMBROŽ, Oldřich, 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, Robert. Principles of welding. USA 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

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

TURŇA, Milan. Špeciálne metódy zvarovania. 1.vyd. Bratislava: ALFA. 1989. 384 s. ISBN 80- 05-0009-
-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

ředitel ústavu

Doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakult

ABSTRAKT

ZAJÍC, Jiří: Využití plazmového oblouku v technické praxi

Práce je zaměřena na popis technologií využívajících plazma, pro jeho vysokou teplotu, dynamické účinky a ionizaci. V první části je práce zaměřena na popis principu dosažení ionizace plynů a na jednotlivé faktory ovlivňující parametry výsledného plazmového oblouku. V následující části je vypracován popis jednotlivých technologií, které využívají ionizaci plynů pro svou funkci, jako jsou svařování, dělení materiálu, žárové nástřiky a tepelné zpracování. V závěrečné fázi práce je vypracován experiment v podobě srovnání návarů vytvořených za pomoci plazmového svařování a nátavů vytvořených metodou TIG. Návary a nátahy jsou vyhodnocovány v ohledu jejich tvrdosti, vneseného tepla, a pro návary vytvořené plazmovým svařováním z pohledu zředění svarového kovu.

Klíčová slova: Plazma, ionizace, svařování, teplota, tvrdost.

ABSTRACT

ZAJÍC, Jiří: Application of plasma arc in technical practice

The thesis is focused on the description of technologies using plasma, for its high temperatures, dynamic effects and ionization. The first part of the thesis is focused on the description of the process of ionization of gases and individual factors influencing the parameters of the resulting plasma arc. The following part is a description of the developed technologies that use gas ionization for their function, such as welding, cutting, thermal spraying and heat treatment. In a final phase of thesis is disposed practical experiment containing comparing welds made by plasma technology and welds made by TIG technology. These welds are compared in terms of hardness, heat input and the plasma welds in dilution of weld metal.

Key words: Plasma, ionization, welding, temperature, hardness.

Bibliografická citace

ZAJÍC, J. *Využití plazmového oblouku v technické praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 38 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

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 dne

.....

Podpis

Poděkování

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

OBSAH

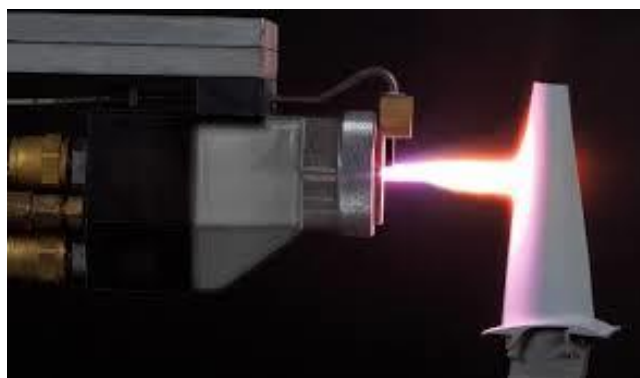
ZADÁNÍ
ABSTRAKT
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE
PROHLÁŠENÍ
PODĚKOVÁNÍ
OBSAH

ÚVOD	10
1 PRINCIP FUNKCE PLAZMOVÉHO PAPRSKU	11
2 PARAMETRY PLAZMOVÉHO PAPRSKU	12
2.1 PLAZMOVÉ PLYNY	12
2.1.1 Chemicko-fyzikální vlastnosti plazmových plynů	13
2.1.2 Disociace a ionizace	14
2.2 Vlastnosti plazmového paprsku	14
2.2.1 Teplota plazmového paprsku	15
2.2.2 Výkon plazmového paprsku	17
2.2.3 Výtoková rychlost plazmového paprsku	17
2.2.4 Tepelná a elektrická vodivost plazmatu	18
2.3 Konstrukce plazmového hořáku	19
2.4 Technologie využívající plazmový paprsek	21
2.4.1 Svařování	21
2.4.2 Dělení materiálu	23
2.4.3 Žárové nástřiky	25
2.4.4 Tepelné zpracování	26
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
3.1 Základní materiál	28
3.2 Svařování metodou plazma	30
3.2.1 Měření tvrdosti	31
3.2.2 Výpočet zředění svarového kovu	33
3.3 Svařování metodou TIG	34
3.3.1 Měření tvrdosti	35
3.4 Celkové vyhodnocení návarů	36
4 ZÁVĚRY	41
Seznam použitých zdrojů	39
Seznam použitých symbolů a zkratk	43
Seznam použitých obrázků	42
Seznam tabulek	43

ÚVOD

Ve strojírenské technologii existuje velké množství odvětví, vyžadujících pro svoji funkci silný zdroj vysoké teploty koncentrované do malého prostoru. Pro tyto technologie se běžně využívají konvenční, z historického hlediska dlouho využívané zdroje tepelné energie založené na principu např. spalování materiálu, elektrického výboje nebo elektrické indukce. S rychlým rozvojem této doby je i ve strojírenství kladen čím dál větší důraz na kvalitu, rychlost a objem výroby, a cenu daných produktů, což v konečném důsledku vede k tlaku na vývoj nových technologií. Z tohoto důvodu se i v těchto oblastech čím dál více uplatňují technologie založené na principu laseru, elektronového paprsku, vodního paprsku nebo plazmového paprsku.

Plazmový paprsek nachází své využití hlavně v oblastech, jako jsou svařování, dělení materiálu, žárové nástřiky a povrchové úpravy. Do oblasti svařování nám tato technologie přináší hlavně možnost svařovat s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí a dosahovat vysoké kvality svarů. V oblasti dělení materiálu můžeme díky využití plazmatu dělit materiály s teplotou tavení nižší než je jejich teplota hoření (např. vysokolegované oceli), které kyslíkem řezat nelze a v oblasti žárových nástřiků je díky velmi vysoké teplotě, kterých plazma dosahuje možno zpracovávat široké spektrum přídavných materiálů vyznačující se svou vysokou teplotou tavení.



Obr. 1 Technologie využívající plazma

1 PRINCIP FUNKCE PLAZMOVÉHO PAPRSKU [1][9][10]

Teorie vzniku plazmového paprsku vychází z teorie molekulové a částicové fyziky plynů, podle které je stav plynu závislý na pohybu molekul, kde s rostoucí teplotou dochází k nárůstu rychlosti pohybu molekul a tedy i ke zvýšení množství srážek mezi molekulami. Nárazová práce vzniklá při srážce dvou molekul s rostoucí teplotou, potažmo rychlostí pohybu molekul, také roste. Plazmový

paprsek je založen na principu vysokého ohřátí plynu až do té míry, že je při vzájemných srážkách molekul překročí velikost nárazové práce hranici velikostí vazební energie mezi atomy a začne docházet k tzv. disociaci molekul. Např. pro molekuly vodíku H_2 se jedná o teploty v rozmezí 2500 až 6000 K. Pokud však dodávaná energie stále roste, začne docházet k vyražení elektronů z oběžných drah atomů. Toto vede k rozštěpení atomů na záporně nabitě elektrony a ionty s kladným nábojem, což nazýváme ionizací plynu.

Na obrázku č. 2 můžeme vidět příklad ionizačního procesu na atomu helia. Ve středu se nachází atomové jádro se dvěma kladnými náboji. Okolo tohoto jádra krouží dva elektrony e_1 a e_2 po drahách relativně blízkých k jádru. Tyto elektrony mají energii E_1 a E_2 . V tomto stavu je atom neutrální, jelikož má dva kladné náboje v jádru a dva záporné náboje v podobě elektronů obíhají okolo jádra. Pokud je atomu dodána dostatečná energie z vně atomu, poté vyskočí alespoň jeden elektron e_2 s nejvyšší energií E_2 na vzdálenější dráhu, kterou charakterizuje vyšší energie E_2' . Tento stav se nazývá ionizovaným nabuzeným stavem. Množství energie tvořící rozdíl mezi energiemi E_2' a E_2 , tedy energie potřebná k tomu, aby byl elektron e_2 vyražen ze své původní dráhy se nazývá ionizační energie.

Nyní již můžeme rozlišovat dvě nabitě částice, kterými jsou ionizovaný atom, tedy originální atom ochuzený o jeden elektron a volný elektron. Volný elektron e_2' má však tendenci vrátit se co nejdříve na svoji původní dráhu a dosáhnout stavu nejnižší energie.

Energie uvolněná v tomto procesu je odevzdána ve formě elektromagnetického záření nebo kinetické energie a je znázorněna na obr. 3 a dána rozdílem

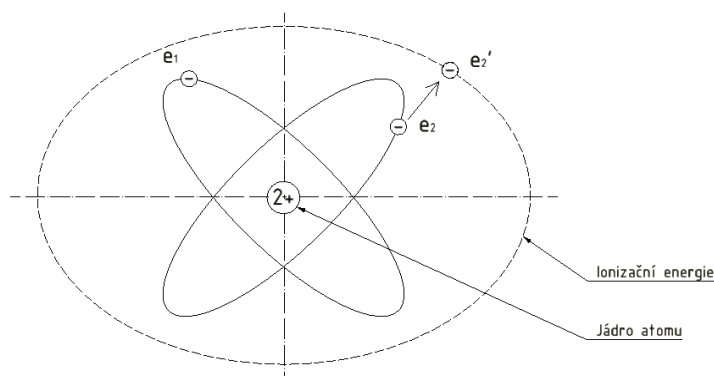
$$E' = E_2' - E_2 \text{ [J]} \quad (2.1)$$

kde: E' – Energie uvolněná elektronem při přechodu mezi oběžnými drahami

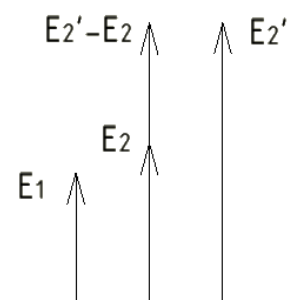
E_2' – Energie elektronu na oběžné dráze vzdálenější od jádra atomu

E_2 – Energie elektronu na oběžné dráze bližší k jádru atomu

Stupněm ionizace se nazývá procento volných elektronů, které se v plynu nachází, a je závislý na teplotě. S rostoucí teplotou může být odtrženo i více elektronů z oběžných drah jednoho atomu, poté se jedná o vícenásobnou ionizaci. Pro různé plyny se různé teploty pro dosažení daných stupňů ionizace.



Obr. 2 Nabuzení neutrálního atomu [10]



Obr. 3 Energie ionizace atomu [10]

2 PARAMETRY PLAZMOVÉHO PAPRSKU [1][9][10]

Pro dosažení optimálních podmínek pro využití plazmatu v praxi pro dané účely, je nutno plazmový oblouk řídit a regulovat jeho vlastnosti jako např. teplota, výkon nebo výtoková rychlost. Jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících tyto parametry je volba plazmového plynu. Dále můžeme pro různá použití zvolit různé geometrie ústí hořáků a typy jejich konstrukce pro využití jak pro vodivé materiály, kde může oblouk působící ionizací hořet mezi elektrodou a základním materiálem, tak pro materiály nevodivé, kde musí být elektrický oblouk sloužící pro ionizaci plazmového plynu vytvořen uvnitř hubice hořáku. Pro regulaci plazmového paprsku na výstupu z trysky má poté zásadní vliv typ a geometrie přívodu použitého ochranného a fokusačního plynu.

2.1 Plazmové plyny [9][10]

V současnosti jsou nejpoužívanějšími plyny argon, helium, vodík a dusík, dále se v menší míře využívá vzduch a voda.

Plyny využívané k ionizaci a tvorbě plazmatu se dělí do dvou skupin, a to na jednoatomové a dvouatomové. Do jednoatomových plynů patří netečné plyny jako argon a helium, jako dvouatomové označujeme plyny sestávající se z molekul, jako jsou dusík N_2 a vodík H_2 . Z hlediska využití jednotlivých plynů v praxi je rozhodujícím faktorem energie, potřebná k ionizaci atomů, případně disociaci molekul dvouatomových plynů. Přehled energií potřebných k disociaci dvouatomových plynů, a ionizaci jak jednoatomových plynů, tak i dvouatomových plynů, je znázorněn v tab. 1.

Tab. 1 Energie potřebná pro disociaci a ionizaci plynů

Plyn	Rovnice	Energie [eV]
Vodík	$H_2 \leftrightarrow 2 H$	4,477
	$H \leftrightarrow H^+ + e$	13,595
Dusík	$N_2 \leftrightarrow 2 N$	9,764
	$N \leftrightarrow N^+ + e$	14,54
	$N^+ \leftrightarrow N^{++} + e$	29,6
	$N^{++} \leftrightarrow N^{+++} + e$	47,36
Argon	$Ar \leftrightarrow Ar^+ + e$	15,76
	$Ar^+ \leftrightarrow Ar^{++} + e$	27,64
	$Ar^{++} \leftrightarrow Ar^{+++} + e$	60,94
Helium	$He \leftrightarrow He^+ + e$	24,58
	$He^+ \leftrightarrow He^{++} + e$	54,4

2.1.1 Chemicko-fyzikální vlastnosti plazmových plynů [9][10]

Při ionizaci odlišných jednoatomových a dvouatomových plynů má dané plazma různé vlastnosti. Toto je dáno odlišnými chemicko-fyzikálními vlastnostmi, které dané plyny mají jako např. relativní molekulová hmotnost, hustota, specifická tepelná kapacita, potenciál ionizace apod. V tab. 2 je přehled těchto vlastností doplněný o teploty, jakých je možno při použití daných plynů dosáhnout a výkonových specifik, jakých je potřeba dosáhnout pro ionizaci daných plynů.

Z tabulky 2 je patrné, že fyzikální vlastnosti jako hmotnost či hustota odpovídají umístění prvku v periodické soustavě prvků, a tedy se tyto hodnoty v závislosti na protonovém čísle prvků rostou. U specifické tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti, hodnoty naopak s rostoucím protonovým číslem klesají. Největší potenciál ionizace má helium a to v případě jednostupňové i dvoustupňové ionizace. Z energetického hlediska je nejnáročnější na přivedení a udržení v ionizovaném stavu vodík, jelikož má nejvyšší napětí oblouku a výkon přivedený do oblouku. Má ale také nejvyšší koeficient využití energie na ohřev plynu.

Tab. 2 Chemicko-fyzikální charakteristiky plazmových plynů

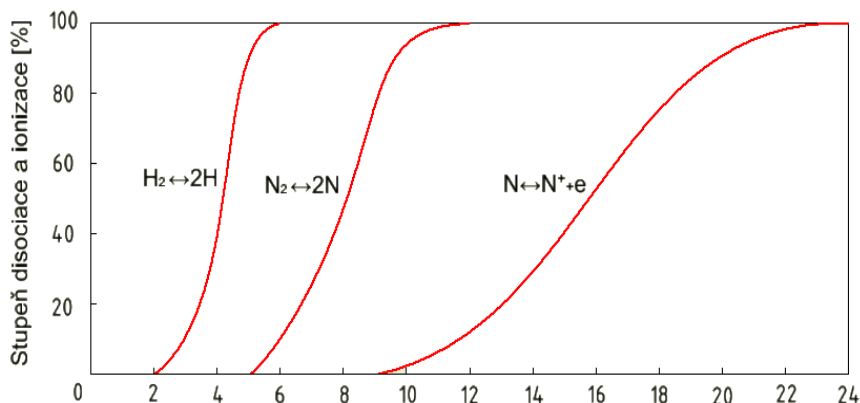
Charakteristika		Jednotka	Argon	Helium	Dusík	Vodík
Relativní molekulová hmotnost		(-)	39,944	4,002	28,016	2,0156
Hustota při 0 °C a 101,32 Pa		(kg·m ⁻³)	1,783	0,1785	1,2505	0,0898
Specifická tepelná kapacita c_p při 20 °C		(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	0,511	5,233	1,046	14,268
Součinitel tepelné vodivosti při 0 °C		(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0,0163	0,1436	0,0238	0,1754
Potenciál ionizace	Jednostupňové	(V)	15,7	24,05	14,5	13,5
	Dvoustupňové	(V)	27,5	54,1	29,4	-
Teplota		(K)	14000	20000	7300	5100
Napětí oblouku		(V)	40	47	60	62
Výkon přivedený do oblouku		(kW)	48	50	65	120
Koeficient využití energie na ohřev plynu		(%)	40	48	60	80

- a) Dusík – Disociace dusíku začíná při teplotě 5000 K a dosahuje stupně disociace 95% při teplotě 9000 K. Pro dosažení stupně ionizace 50% je zapotřebí 15000 K a pro 98% 22000 K. Viz obr. 3. Od teploty 7000 K dosahuje dusíkové plazma větší množství tepla na jednotku hmoty než ostatní plyny při stejné teplotě. Toto vede k prodloužení plazmového paprsku při zachování stejného dodávaného příkonu. V praxi nesmí být v dusíku obsažena příměs kyslíku, jelikož toto vede k vytváření jedovatých oxidů dusíku a k oxidaci elektrod.

- b) Vodík – Oblast disociace vodíku se pohybuje v rozmezí 2000 K až 6000 K, viz obr. 3. V porovnání s dusíkem je k disociaci zapotřebí menší energie. Atomární vodík poté dosahuje své plné ionizace při teplotě 25000 K. Vodíkové plazma má velkou tepelnou vodivost a ze všech plazmových plynů vyžaduje největší napětí oblouku a největší příkon přivedený do oblouku. Entalpie vodíkového plazmatu je nižší než u dusíkového plazmatu. Teplota vodíkového plazmatu je však v porovnání s ostatními druhy plazmy nejnižší, viz tab. 1. V praxi musí být kladen důraz na dokonalou těsnost zařízení, jelikož při kontaktu vodíku se vzdušným kyslíkem dochází ke tvorbě výbušné směsi.
- c) Argon a helium – Ionizace argonu a helia se pohybuje v rozmezí teplot 9000 K až 22000 K. Entalpie plazmatu těchto plynů je nižší než u dvouatomových plynů. Jejich výhodou je však jednodušší přechod do stavu plazmy, vyžadují nižší převodní napětí, mají stabilnější plazmový oblouk a teplota jejich oblouku dosahuje nejvyšších hodnot v porovnání s dvouatomovými plyny. Jejich další výhodou je jejich inertní chování. Mezi nevýhody patří jejich vysoká cena. Pro zlepšení vlastností plazmových oblouků těchto plynů jako např. entalpie či výtoková rychlost oblouku se tyto plyny používají ve formě směsí s vodíkem a dusíkem v různých poměrech.

2.1.2 Disociace a ionizace [9][10]

Proces vytvoření plazmy se liší pro jednoatomový plyn a dvouatomový plyn tím, že pro ionizaci dvouatomového plynu je nejprve nutná disociace. Dalším rozdílem mezi jednoatomovými a dvouatomovými plyny spočívá v rozdílné entalpii a teplotě, jaké je možno v nich vytvořením plazmatu dosáhnout.



Obr. 4 Disociace a ionizace dvouatomových plynů [10]

Z grafu na obr. 4 je patrné, že disociace dvouatomových plynů probíhá při mnohem menších teplotách než jejich ionizace. Pro vodík je teplota disociace na 90% asi 5000 K, pro dusík je hodnota teploty pro stejné procento disociace asi 8500 K. Rozdíl v těchto teplotách je způsoben rozdílnou energií disociace pro oba plyny.

2.1 Vlastnosti plazmového paprsku [1][9][10]

Mezi hlavní parametry plazmového paprsku, které jsou pro využití v praxi nejpodstatnější, patří výkon, teplota a rychlost jakou částice opouštějí trysku. Činitelé nejvíce ovlivňující tyto vlastnosti jsou především použitý plazmový plyn, použitý typ trysky, parametry zdroje elektrického napětí přivedeného na elektrodu a stupeň ionizace plazmatu.

2.2.1 Teplota plazmového paprsku [9][10]

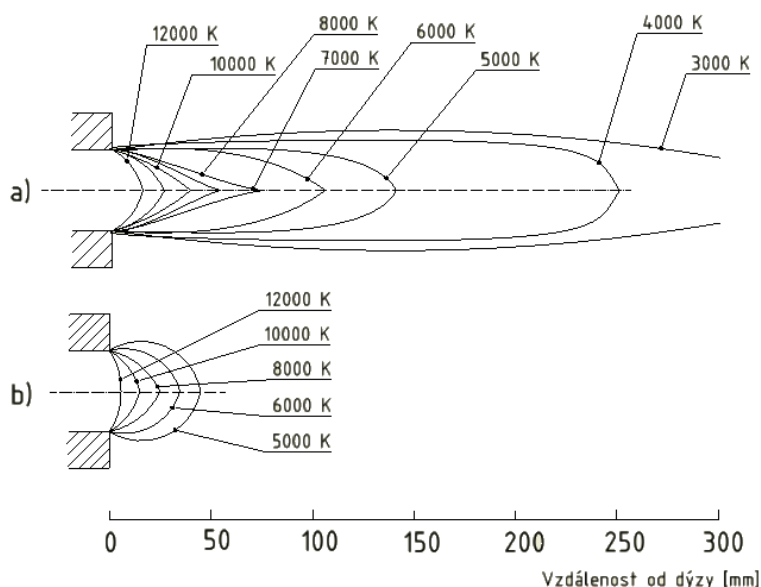
Nejvýraznějším činitelem ovlivňujícím teplotu plazmového paprsku je stupeň ionizace, který je dán především druhem plazmového plynu, a typem a použitým nastavením plazmového hořáku.

Teplota plazmového paprsku se pohybuje v rozpětí 5000 K až 30000 K. Na obr. 5 můžeme vidět typické rozdělení průběhu teplot plazmového paprsku v závislosti na vzdálenosti od trysky. V obou případech se jedná

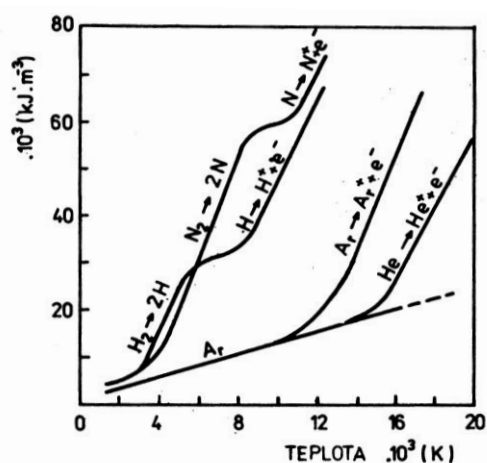
o argonový paprsek. V případě a) jde o laminární plazmový paprsek. Jeho izotermny jsou dlouhé a můžeme pozorovat poměrně vysoké teploty i ve větší vzdálenosti od trysky; v případě b) se jedná o turbulentní paprsek. Jeho izotermny jsou krátké a teplota se

vzdáleností od trysky rychle klesá. Turbulentní paprsek vzniká, pokud je směr proudu částic vylétajících z trysky narušován okolním proudem vzduchu nebo jiných plynů. Aby k tomuto jevu nedocházelo, jsou v okolí místa, kde vychází proud částic z hubice, přiveden ochranný plyn o daných parametrech. Dále se tento proces využívá u jednoatomových plazmových plynů k tzv. fokusaci paprsku. Fokusace paprsku spočívá v přívodu dvouatomového plynu, nejčastěji vodíku nebo dusíku, do prostoru ústí trysky. Pro ionizaci jednoatomového plynu je potřeba větší energie než u dvouatomového plynu, z důvodu nutné předchozí disociace. Pokud proto přivedeme do okolí sloupce jednoatomového plazmatu dvouatomový studený plyn, dojde v blízkosti plazmového sloupce k jeho disociaci. Díky této disociaci dochází k vzniku jakési ochranné povrchové vrstvy, která velice dobře vede teplo. Tím vzniká na povrchu plazmového sloupce jakýsi plášť s nižší teplotou než jaká je potřeba k ionizaci okolí a tím brání šíření ionizace do okolí, díky čemuž je proud částic soustředěn do osy plazmového sloupce.

Výpočet teploty plazmatu vychází z efektivní hodnoty, tzv. střední teploty plazmového oblouku. Ta je vypočítána na základě předpokladu, že všechno teplo se rovnoměrně přemění na objem plynu. Výpočet se provádí pomocí křivky pro entalpii plazmatu v závislosti na teplotě (obr. 6).



Obr. 5 Teplota plazmového paprsku [10]



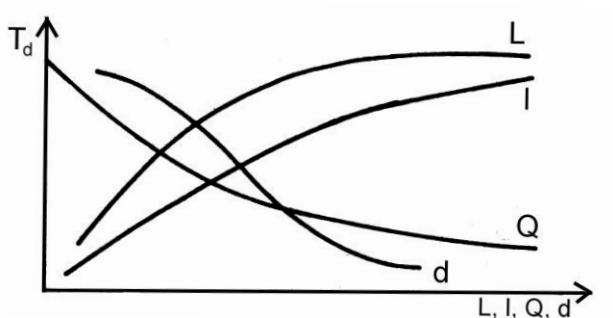
Obr. 6 Entalpie plazmatu v závislosti na teplotě [10]

Střední teplotu plazmového oblouku je možno vyjádřit za pomoci základních parametrů z následujícího teoretického vzorce:

$$T_q = \frac{\bar{E} \cdot I}{\pi \cdot d \cdot a_k} \cdot \left[(1 - \exp) - \frac{\pi \cdot d \cdot a_k \cdot L}{C_p \cdot \bar{Q}} \right] [K] \quad (2.2)$$

Kde: I – proud oblouku
L – délka oblouku
C_p – skupenské teplo plynu
Q – průtok plynu
d – průměr dýzy
a_k – koeficient tepelné vodivosti od plazmy k dýze
E – gradient po středu sloupce oblouku.

Na obr. 7 můžeme vidět vliv základních parametrů, jako jsou množství plynu (Q), velikost proudu (I), průměr dýzy (d) a délka oblouku (L) na teplotu plazmového oblouku. Z obrázku je patrné, že s rostoucím proudem a délkou oblouku teplota stoupá a s rostoucím průtokem plynu a průměrem dýzy klesá.



Obr. 7 Vliv parametrů plazmového oblouku na jeho teplotu [10]

Pro přehled teplot dosahovaných s určitými vstupními parametry hořáku byla vytvořena tabulka č. 3, zahrnující výkon a průtok plynu, pro zástupce jednoatomových plynů (argon) a dvouatomových plynů (dusík).

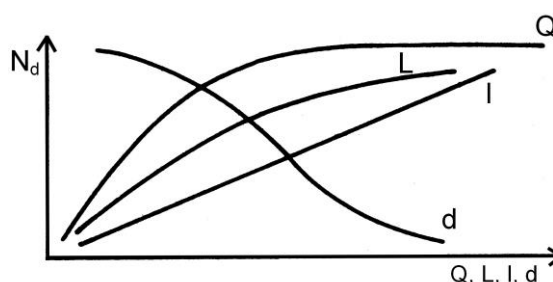
Tab. 3 Závislost teploty na výkonu a průtoku plazmového plynu

Výkon (kW)	Teplota (K)	Průtok plynu (Nl . min ⁻¹)					
		15		30		60	
		Argon	Dusík	Argon	Dusík	Argon	Dusík
5	T _{max}	11400	-	11750	-	12000	-
	T _{stř}	8850	-	5600	-	3000	-
10	T _{max}	-	10900	12700	11040	13000	10540
	T _{stř}	10750	7100	9600	6250	6600	5550
15	T _{max}	-	12340	14500	11990	14400	12180
	T _{stř}	12000	7550	11000	6700	8750	5950
20	T _{max}	-	13830	-	14790	-	13100
	T _{stř}	-	8250	-	7100	-	6200

2.2.2 Výkon plazmového paprsku [9][10]

Výkon plazmového paprsku je parametr velice úzce spjatý s teplotou plazmového paprsku a také s jednotlivými dalšími parametry plazmového oblouku, podobně jako u teploty plazmového oblouku.

Jak je možno vidět na obr. 8 výkon roste s přibývajícím elektrickým proudem, délkou oblouku a průtokem plynu. Se zvětšujícím se průměrem dýzy výkon klesá.



Obr. 8 Vliv parametrů plazmového oblouku na jeho výkon [10]

Pro výpočet výkonu plazmového oblouku je možno použít rovnici využívající pro výpočet základní parametry plazmového oblouku za ideálních podmínek (2.3). Parametry vstupující do rovnice jsou shodné s rovnicí 2.2.

$$N_q = \frac{\bar{E} \cdot I}{\pi \cdot d \cdot a_k} \cdot C_p \cdot \bar{Q} \cdot \left[(1 - \exp) - \frac{\pi \cdot d \cdot a_k \cdot L}{C_p \cdot \bar{Q}} \right] [W] \quad (2.3)$$

Dále můžeme vypočítat efektivní výkon plazmového oblouku (2.4) za pomoci elektrických parametrů plazmového oblouku.

$$N_{ef} = 0,24 \cdot U \cdot I \cdot \eta [W] \quad (2.4)$$

Kde : N_{ef} – efektivní výkon
 U – napětí oblouku
 I – proud oblouku
 η – účinnost využití elektrické energie na ohřev plynu

2.2.3 Výtoková rychlost plazmového paprsku [9][10]

Rychlost částic vylétajících z ústí hubice je možno vypočítat více způsoby. Např. ze základních zákonů mechaniky plynů za podmínky proudění plynů skrze cylindrickou trubičku za jeho současného ohřevu. Za pomoci rovnice konstantního průtoku (2.5) a stavové rovnice plynu (2.6) je možno získat závislost mezi rychlostí částic před ohřevem a po ohřevu. Výstupní hodnoty z těchto rovnic se velice dobře shodují s hodnotami, které byly experimentálně naměřeny.

$$\rho_0 \cdot v_0 = \rho \cdot v \quad (2.5)$$

Kde: ρ_0 – hustota plynu na vstupu do dýzy
 ρ – hustota plynu na výstupu z dýzy
 v_0 – rychlost proudu na vstupu do dýzy
 v – rychlost proudu na výstupu z dýzy

$$\frac{p_0}{\rho_0} \cdot T_0 = \frac{p}{\rho} \cdot T \quad (2.6)$$

Kde: p_0 – tlak na vstupu do dýzy
 p – tlak na výstupu z dýzy
 T_0 – teplota plynu na vstupu do dýzy určená z entalpie
 T – teplota plynu na výstupu z dýzy určená z entalpie

Za předpokladu, že tlak zůstává konstantní po dobu ohřevu, budou po úpravě rovnic 2.5 a 2.6 platit vztahy 2.7 a 2.8:

$$\frac{v_0}{T_0} = \frac{v}{T} \quad (2.7)$$

$$v = v_0 \cdot \frac{T}{T_0} \quad (2.8)$$

Dalšími možnostmi jak vypočítat výtokovou rychlost plazmatu jsou např. metoda založená na základě měření hybnosti proudu a následného určení hybnosti podle impulsové věty, nebo metodou využívající závislost rychlosti plazmatu na výkonu, množství plynu a průměru dýzy.

2.2.4 Tepelná a elektrická vodivost plazmatu [9][10]

Tepelná vodivost plazmatu je velice obtížně matematicky popsatelná. V praxi se jedná o součet následujících veličin:

k_c – klasická vodivost prostřednictvím mikropohybů atomů a iontů

k_E – klasická vodivost prostřednictvím elektronů

k_D – účinek difuze asociovaných atomových párů

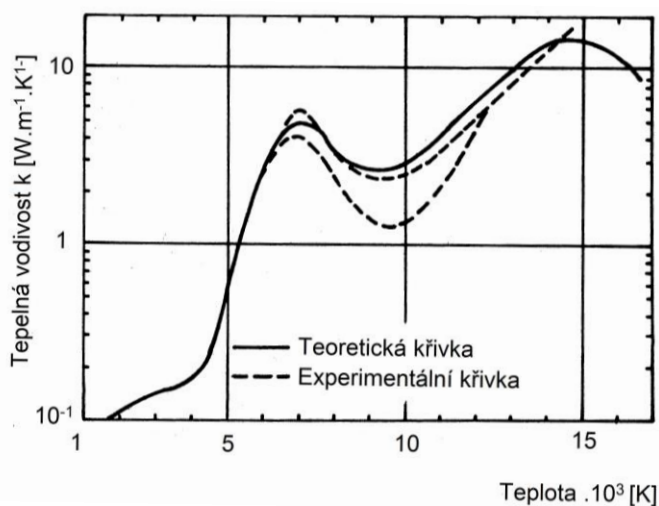
k_j^+ - účinek difuze iontů a elektronů

k_j^{++} - účinek rozštěpení na dvojnásobně ionizované atomy a elektrony

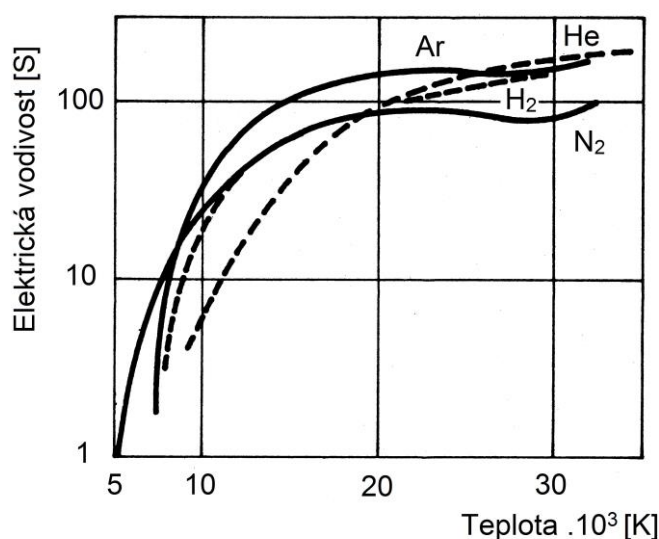
Suma těchto činitelů ovlivňujících celkovou tepelnou vodivost, je v závislosti na teplotě znázorněna na obr. 9.

Tepelná vodivost se liší pro různé plazmové plyny. Vodík a helium mají vysokou tepelnou vodivost, přibližně o řád vyšší než mají dusík a argon. Z tohoto důvodu může při požití plynů s vysokou tepelnou vodivostí dojít k přehřívání elektrody a je potřeba důkladné chlazení. V praxi je možné tohoto jevu využívat pro tzv. fokusaci paprsku, viz kapitola 2.2.1

Elektrická vodivost plazmatu je nejvíce závislá na přítomnosti elektricky nabitých částic, tedy na pohyblivosti elektronů, potažmo teplotě, viz obr. 10. Pohyblivost elektronů je přibližně stonásobná oproti pohyblivosti iontů, a proto můžeme předpokládat, že fakt, že plazma vede



Obr. 9 Závislost tepelné vodivosti dusíkového plazmatu na teplotě [10]



Obr. 10 Elektrická vodivost plazmatu v závislosti na teplotě [10]

elektrinu, je zapříčiněn elektrony. Elektrická vodivost plynů v závislosti na teplotě prudce roste až do překročení teploty přibližně 15000K, kde se křivky začnou pozvolna vyrovnávat a stávat se přibližně konstantními. Pro takovou elektrickou vodivost může platit vztah 2.9.

$$\lambda = e \cdot n_e \cdot b_e \quad (2.9)$$

Kde: λ – elektrická vodivost
 e – elektrický elementární náboj
 n_e – hustota elektronů
 b_e – pohyblivost elektronů

Plazma je z celkového pohledu elektricky neutrální, jelikož je v jeho objemu shodný celkový počet elektricky kladných a záporných částic. Působí na ně ovšem velice silně elektrické i magnetické pole.

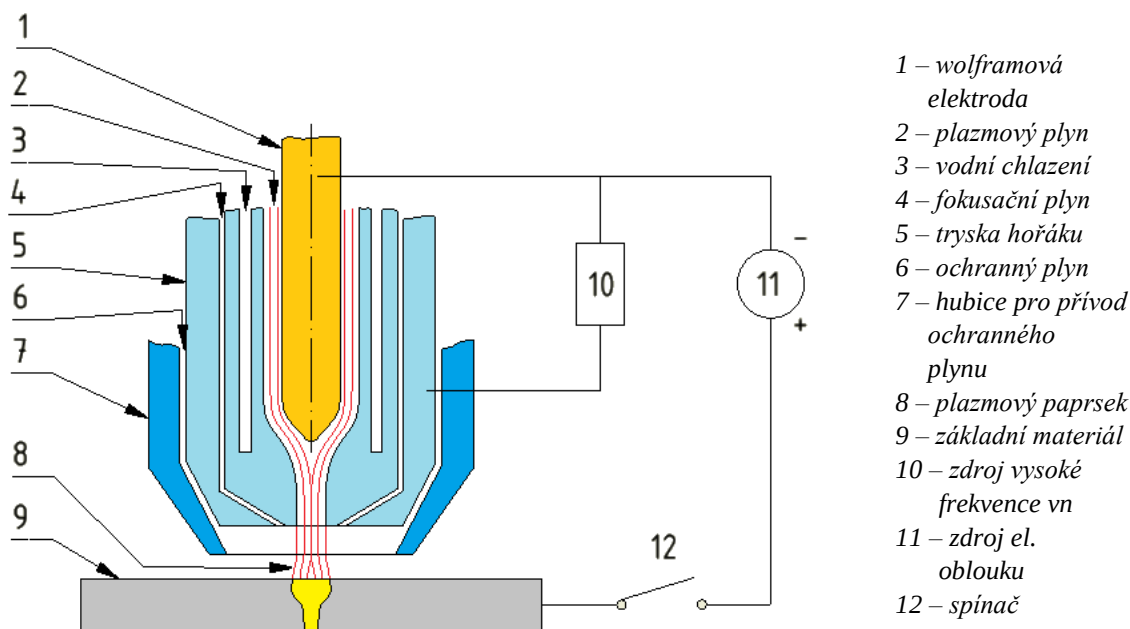
2.2 Konstrukce plazmového hořáku [9][10]

Konstrukčně se hořáky skládají z wolframové elektrody umístěné uvnitř v ose hořáku, vodou chlazené trysky a hubice pro přívod ochranného plynu. Pro vytvoření plazmového oblouku se v praxi využívá dvou typů konstrukce, a to hořáky se závislým, neboli přeneseným plazmovým paprskem a hořáky s nezávislým, neboli nepřenosným plazmovým paprskem.

a) Hořáky se závislým plazmovým paprskem

Plazmový oblouk vzniká mezi wolframovou elektrodou, která je zapojena jako katoda (kladný pól) a základním materiálem, jež je zapojena jako anoda (záporný pól), viz obr. 11.

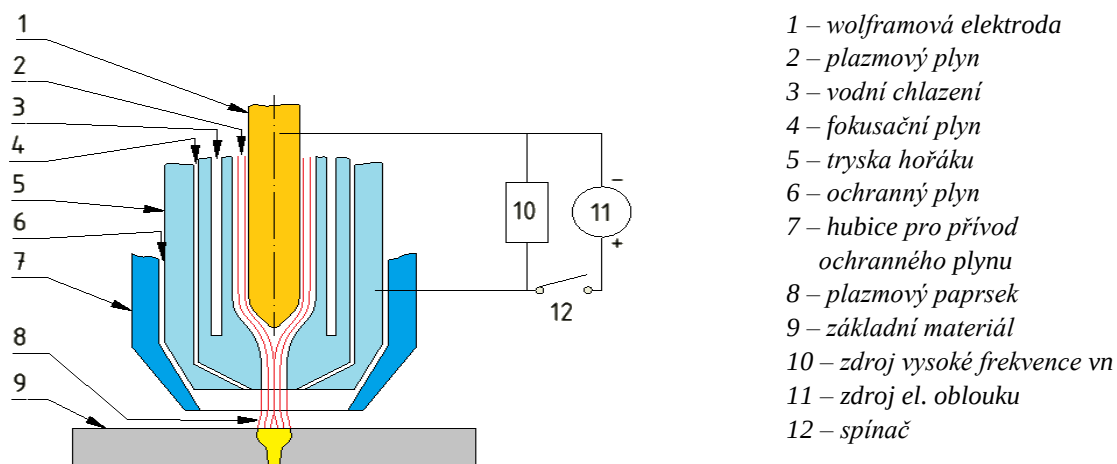
Výhodou tohoto zapojení je fakt, že hubice je málo tepelně namáhána a díky tomu má větší životnost. Využití této metody je ve svařování, řezání a navařování.



Obr. 11 Plazmový hořák se závislým paprskem [9]

b) Hořáky s nezávislým plazmovým paprskem

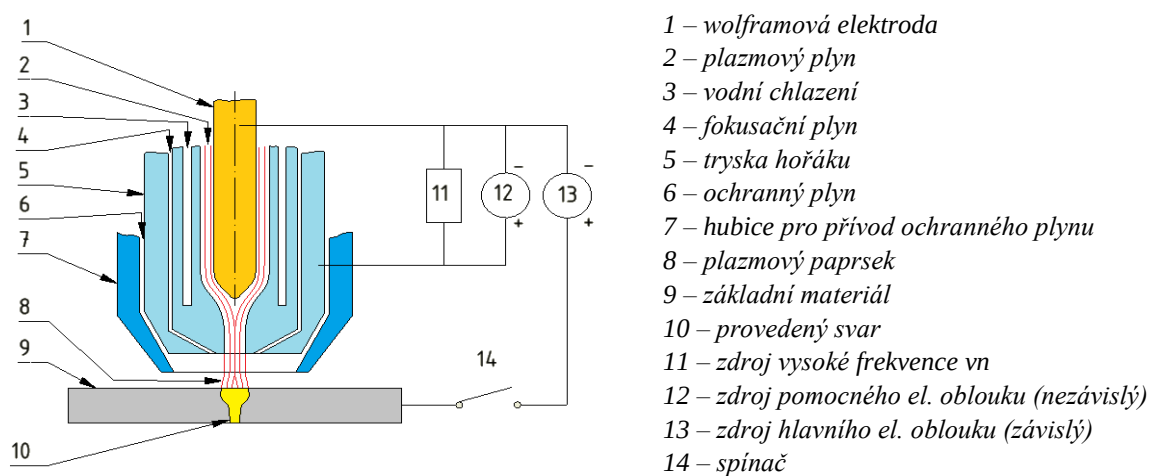
Plazmový oblouk vzniká mezi wolframovou elektrodou, která tvoří katodu (záporný pól) a samotnou tryskou, která v tomto případě plní funkci anody (záporného pólu), viz obr. 12. V tomto případě je oblouk zcela nezávislý na základním materiálu. V praxi se toto zapojení využívá pro metalizaci a k řezání nekovových (nevodivých) materiálů. Na rozdíl od hořáku se závislým plazmovým paprskem je hubice vysoce namáhána a je nutno ji intenzivně chladit. Dále je nutno pro prodloužení životnosti trysky používat jako plazmový plyn pouze inertní plyny (argon, helium) s minimálním množstvím aktivních plynů. I přes tyto opatření je však životnost trysek pro využití nezávislého oblouku mnohem nižší než u trysek využívajících závislý plazmový oblouk.



Obr. 12 Plazmový hořák s nezávislým paprskem [9]

c) Hořáky s kombinovaným zapojením

V tomto případě se jedná o kombinaci zapojení a) a b). Viz obr. 13 Metoda funguje jako kombinace dvou oblouků; jednoho nezávislého (pomocného) a hlavního závislého oblouku. Principem je vytvoření pomocného oblouku za pomoci vysokofrekvenčního výboje v prostoru mezery trysky mezi wolframovou katodou zapojenou jako katoda a měděnou tryskou zapojenou jako anoda. Za pomoci tohoto oblouku se ionizuje plazmový plyn, který v tomto stavu opustí ústí trysky a ionizuje prostředí mezi tryskou a svařovaným materiálem. Toto umožní snadné vytvoření hlavního oblouku.



Obr. 13 Plazmový hořák s kombinovaným zapojením [9]

2.3 Technologie využívající plazmový paprsek [1][6][9][10][11][13]

V praxi se využívá technologie plazmového paprsku hlavně v odvětvích, kde je potřeba dosáhnout velmi vysoké teploty na relativně malém prostoru. Nejčastěji se s plazmovým paprskem setkáváme v souvislosti se svařováním nebo dělením materiálu, v menší míře také pro využití v oblasti žárových nástřiků popř. tepelného zpracování materiálu.

2.3.1 Svařování [9]

Svařování za pomoci plazmového oblouku spadá, stejně jako např. svařování za pomoci elektronového paprsku nebo laseru, do oblasti svařování s vysokou koncentrací tepelného výkonu. Koncentrace tepelného výkonu pro svařování je závislá na hodnotě výkonu zdroje tepla a na ploše, na kterou tento tepelný zdroj působí. Jelikož u těchto technologií můžeme docílit koncentrace vysokého množství tepelné energie do velice malého prostoru, viz tab. 4, jedná se tedy o velmi výkonné technologie svařování. Dále nám tato skutečnost umožňuje docílit minimálního natavení okolního materiálu, což má za důsledek minimální tenzotermické ovlivnění okolí svaru. Další výhodou plazmového svařování, i ostatních metod svařování s vysokou koncentrací tepelného výkonu je jejich nízká závislost na fyzikálních a chemických vlastnostech svařovaných materiálů, v porovnání s metodami jako např. svařování plamenem, obalenou elektrodou nebo metodami MIG a MAG. Toto má za důsledek, že je možno svařit i materiály s výrazně odlišnými vlastnostmi a složením, a také možnost vytvořit typy svarů, kterých není možno výše uvedenými konvenčními metodami svařování dosáhnout, případně jen velice obtížně.

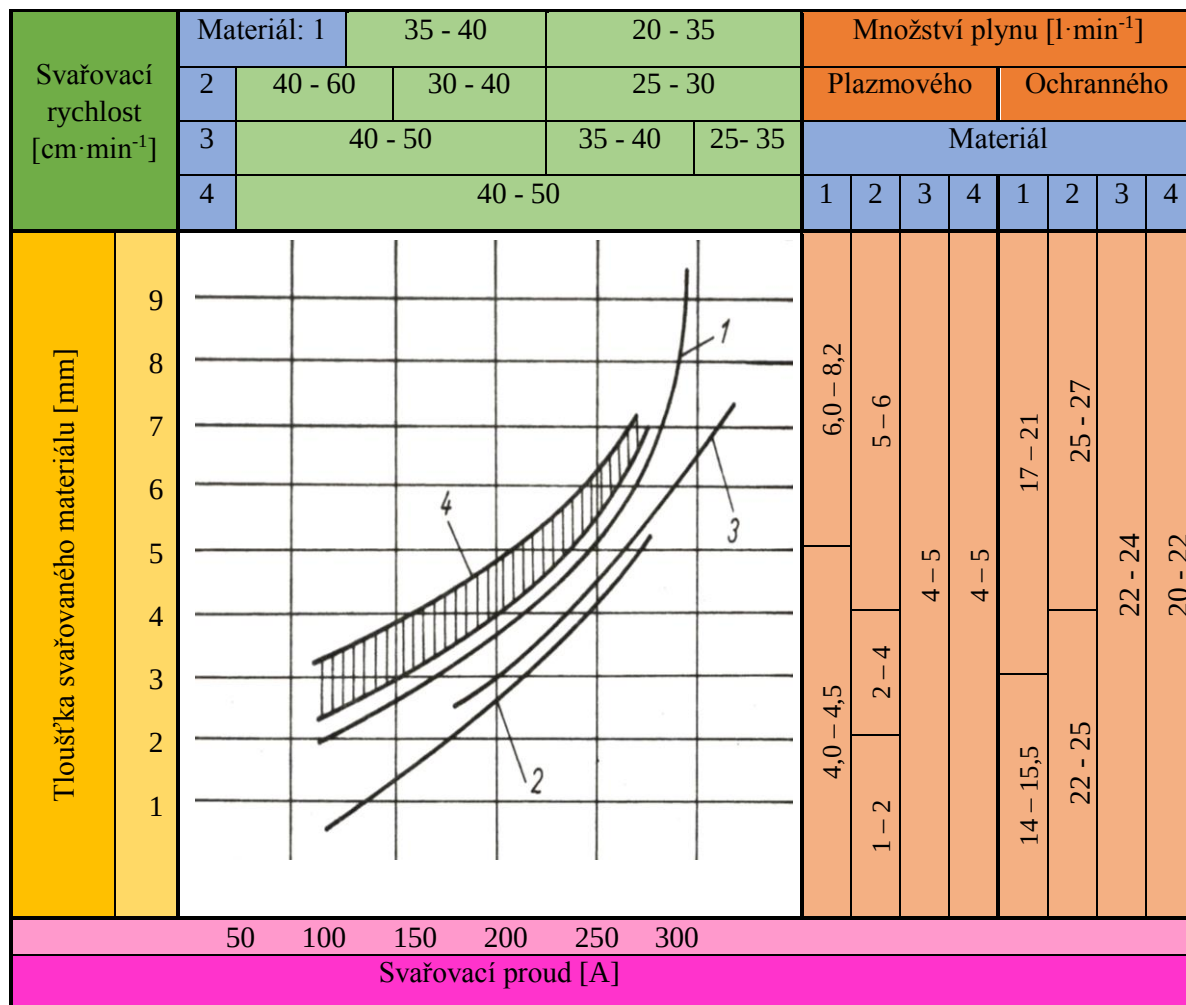
Tab. 4 Koncentrace tepelného výkonu dosažitelná různými zdroji tepla při svařování

Zdroj tepelné energie	Nejmenší plocha ohřevu [cm ²]	Nejvyšší koncentrace tepelného výkonu [W·cm ⁻²]
Kyslíkoacetylenový plamen	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^3$
Kyslíkovodíkový plamen	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^3$
Elektrický oblouk - elektroda	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^4$
Elektrický oblouk – TIG, MIG	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^5$
Plazmový paprsek	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^7$
Elektronový paprsek	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^8$
Laserový paprsek	$1 \cdot 10^{-8}$ až $1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^9$ až $1 \cdot 10^{13}$
Slunce	-	$15 \cdot 10^2$

K dosažení kvalitních svarů, provařených po celém svém průřezu, je využívána metoda tzv. průchozího paprsku. Tato metoda spočívá v průchodu paprsku celou tloušťkou svařovaného materiálu a je používána pro svar I tloušťky 3 až 12 mm. Výchozí poloha svařovaných dílů je zajištěna tak, aby byly dílce před svařením svými hranami těsně u sebe. Parametry plazmového paprsku musí být nastaveny tak, aby při průchodu paprsku štěrbinou mezi svařovanými materiály docházelo k natavování základního materiálu, ale ne k vyfouknutí nataveného materiálu z místa svaru vlivem dynamických účinků plazmového paprsku. To znamená, že musí být dosaženo rovnováhy mezi silou povrchového napětí taveniny a dynamickými účinky paprsku. V průběhu svařování se v místě průchodu plazmového paprsku základním materiálem tvoří tzv. klíčová dírka, v níž je tavenina vytlačována z jejího předního

okraje směrem dozadu a díky povrchovému napětí se natavený materiál spojí, čímž vznikne svar.

Nastavení parametrů plazmového oblouku pro různé materiály je znázorněno na obr. 14.

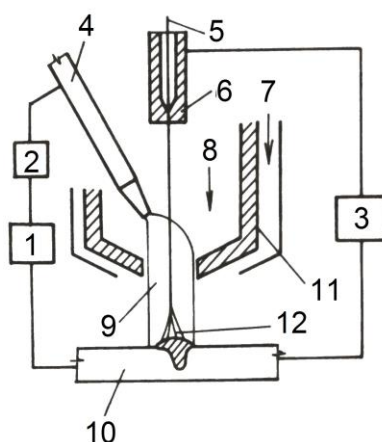


1 – korozivzdorná ocel, 2 – nízkouhlíková ocel, 3 – čistý nikl, 4 – niklové slitiny

Obr. 14 Volba parametrů pro plazmové svařování různých materiálů [9]

Pro automatizované svařování se v dnešní době používá nejčastěji hořáky kombinující plazmový hořák a hubici pro svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře.

Schéma konstrukce je znázorněno na obr. 15. Tato metoda se nazývá Plazma – MIG (Metal Inert Gas), nebo GMPA (Gas Metal Plasma Arc). Metoda spočívá v podávání drátu do sloupce plazmového oblouku, přičemž závislý plazmový



- 1 – zdroj pro plazma
- 2 – oscilátor
- 3 – zdroj pro MIG
- 4 – wolframová elektroda
- 5 – přídavný svařovací drát
- 6 – MIG hubice
- 7 – ochranný plyn
- 8 – plazmový plyn
- 9 – plazmový sloupec
- 10 – základní materiál
- 11 – hubice plazmového hořáku
- 12 – oblouk MIG

Obr. 15 Konstrukce hořáku pro metodu Plazma-MIG (GMPA) [9]

oblouk i oblouk hořící mezi přídavným drátem a základním materiálem mají každý svůj nezávislý zdroj. Průchodem svařovacího proudu přes přídavný drát dochází k indukci magnetického pole v jeho okolí, a tím k ovlivnění sloupce plazmatu, který je tím koncentrován do mnohem menší plochy. Tento fakt má za důsledek mnohem lepší předání energie do místa svaru.

Při svařování plazmovým obloukem můžeme použít přídavné materiály a to buď ve formě prášku, nebo drátu. Pro svařování s přídavným materiálem je nutno nastavit parametry plazmového paprsku tak, aby nedošlo k průchodu paprsku celým průřezem materiálu, ale k jeho zániku v tavné lázni.

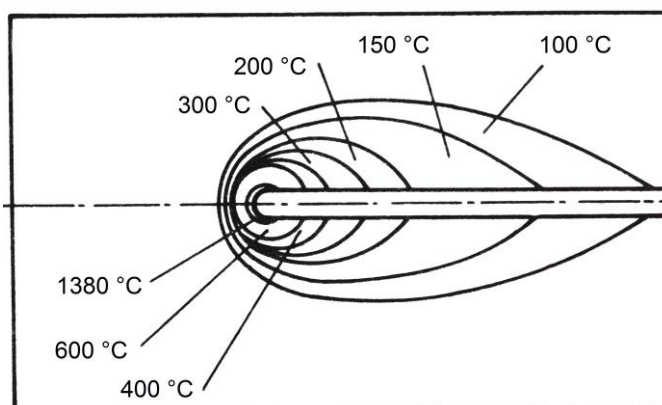
2.3.2 Dělení materiálu [9]

Dělení materiálu za pomoci plazmatu spadá společně např. s využitím kyslíku, laseru nebo elektronového paprsku, do skupiny tepelných dělení materiálu. Pro efektivní dělení kovových materiálů za pomoci chemických reakcí hoření jako např. při využití kyslíku, je zapotřebí řezaný materiál přehřát na dostatečnou teplotu a to za pomoci kyslík-acetylenového plamene na zápalnou teplotu. Poté dojde k přivedení proudu kyslíku do místa řezu, čímž dojde ke spalování základního materiálu a následnému odnesení spáleného materiálu společně s řezacím kyslíkem. Průběh teplot v okolí řezu při tepelném dělení materiálu je znázorněn na obr. 16. Pro správnou funkci této technologie je však potřeba aby řezaný materiál splňoval určité požadavky:

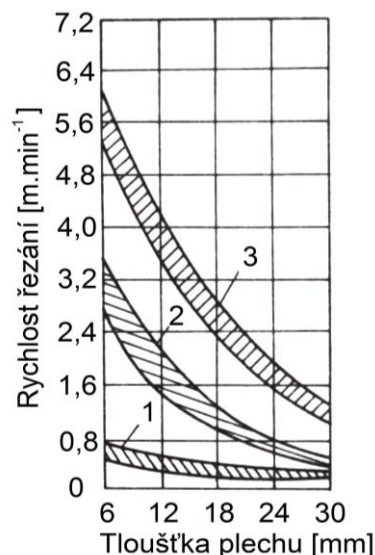
- Zápalná teplota musí být pro daný kov nižší, než je teplota jeho tavení. V opačném případě nedojde k jeho hoření.
- V průběhu hoření musí být vyvinuto dostatečné množství tepla k pokrytí ztrát tepla.
- Tavicí teplota materiálu musí být vyšší než tavicí teplota strusky, ta musí být také tekutá, aby bez obtíží odcházela z místa řezu za pomoci proudu kyslíku.

Tyto požadavky splňují pouze běžné, nízkolegované, nízkouhlíkové oceli a pro dělení materiálů jako např. vysokolegované oceli, šedá litina nebo neželezné kovy není tato metoda vhodná.

Výhodou při využití plazmového paprsku pro dělení materiálu jeho dynamický účinek, který získává díky většímu tlaku a množství přiváděného plynu, potažmo vyšší rychlostí částic. U plazmového paprsku můžeme také dosahovat mnohem vyšších teplot v porovnání s technologií využívající spalování materiálu za pomoci kyslíku. Z těchto důvodů můžeme dosahovat mnohem vyšších rychlostí řezání při daných tloušťkách plechu, viz obr. 17.



Obr. 16 Průběh teplot v okolí řezu při tepelném dělení materiálu [9]



Obr. 17 Porovnání řezné rychlosti v závislosti na tloušťce materiálu pro různé technologie [9]

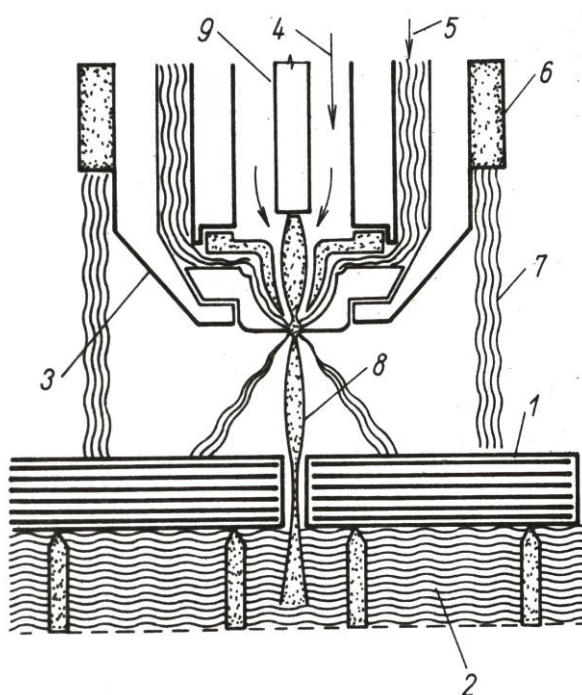
Díky těmto vlastnostem je možno řezat i materiály nesplňující podmínky uvedené výše, nicméně z důvodů rychlosti, efektivity a kvality výsledného povrchu v místě řezu, a to zvláště pro řezané materiály s menší tloušťkou, se této technologie využívá pro všechny druhy ocelí.

Pro vodivé materiály se k řezání využívá nejčastěji tryska se zapojením se závislým obloukem, pro řezání nevodivých materiálů se využívají trysky s kombinovaným zapojením.

Pro dělení materiálu plazmatem se v praxi využívá několika technologií lišících se hlavně z pohledu použitého plazmového plynu a konstrukce plazmového hořáku.

- a) Směs argonu a dusíku. Tato metoda není příliš rozšířená, jelikož díky absenci kyslíku jsou struska a natavený materiál málo tekuté a ulpívají na spodní hraně řezu, což vede k tomu, že řez je málo kvalitní.
- b) Použití vzduchu jako plazmového plynu. Tato metoda vykazuje vyšší kvalitu řezu než metoda a), z důvodu přítomnosti kyslíku. Také je možno dosahovat vyšších rychlostí řezu při zachování nízkých nákladů. Nevýhodou je vznik velkého množství škodlivých látek, které je nutno odsávat.

- c) Řezání vodním plazmatem. Tato metoda spočívá v kombinované stabilizaci plazmového paprsku plynem a vodou. V tomto případě se jako plazmový plyn používá nejčastěji dusík. Konstrukční provedení plazmového hořáku můžeme vidět na obr. 18.



- 1 – Dělený materiál
- 2 – Voda
- 3 – Hubice hořáku
- 4 – Plazmový plyn
- 5 – Voda
- 6 – Vnější plášť hubice pro přívod vodní sprchy
- 7 – vodní sprcha
- 8 – Plazmový paprsek
- 9 – Wolframová elektroda

Obr. 18 Princip dělení materiálu vodním plazmatem [9]

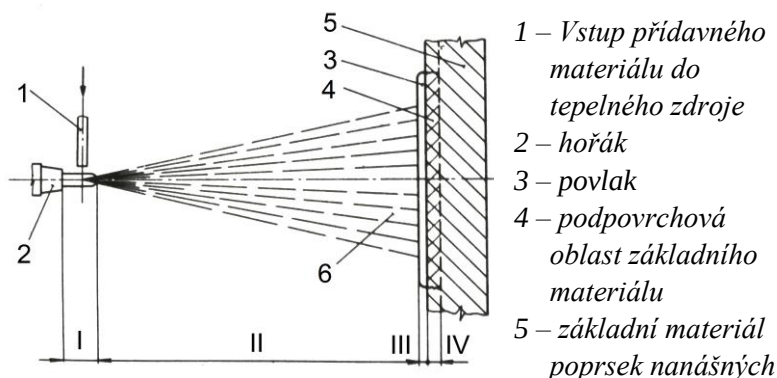
Do místa, kde opouští

plazmový paprsek trysku je přiveden kuželový proud vody. Tímto se dosáhne zúžení paprsku a dále také k disociaci vody na vodík a kyslík, jež tvoří příznivou směs pro stabilizaci paprsku. Díky těmto procesům dojde ke zvýšení tepelné intenzity paprsku a tím pádem i ke zvýšení kvality povrchu řezných ploch a možnosti zvýšit řeznou rychlost. Při využívání této metody je řezaný materiál položen na vodní lůžko a okolo ústí trysky je připevněn prstencový přívod vody, který vytváří jakýsi vodní závoj, který brání šíření vzniklých, zdravých škodlivých plynů do okolí a umožňuje efektivní odsávání těchto plynů, dále také nedochází k přílišnému zahřívání okolí místa řezu, díky čemuž nedochází k vytváření pnutí v materiálu a k jeho deformaci. Další výhodou využití této vodní clony je snížení hluchosti a při použití barviva do vody i snížení vyzařování škodlivých záření do okolí.

2.3.3 Žárové nástřiky [1][10]

Technologii žárových nástřiků můžeme definovat jako vytváření povlaků za pomoci ulpívání částic povlakového materiálu na vhodným způsobem připravený povrch základního, povlakovaného materiálu. Povlakový materiál je třeba za pomoci zdroje tepla ohřát na teplotu blízkou liquidu, nebo vyšší, v závislosti na druhu povlakového materiálu, zatím co materiál základní má během procesu teplotu okolí. Tímto se technologie žárových nástřiků liší od technologie navařování, kde je i základní materiál přehříván na teploty blízké se teplotám jeho natavení. Důvodem, proč je tato technologie ve svých různých podobách využívána, je zlepšování vlastností výrobků a prodloužení jejich životnosti.

Průběh procesu žárového nástřiku můžeme u těchto metod rozdělit do několika fází, viz obr. 19. V první fázi vstupuje přídavný materiál do zdroje tepelné energie, v našem případě do plazmového sloupce. V druhé fázi přídavný materiál prolétá vzdálenost mezi ústím hořáku a základním materiálem. V této fázi dochází k formování nanášeného



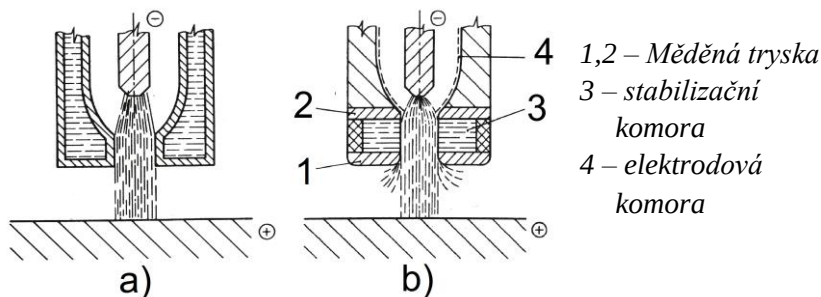
Obr. 19 rozdělení procesu žárového nástřiku n jednotlivé fáze [1]

materiálu z jeho původní formy přídavného materiálu do podoby částic povlakového materiálu s potřebnými vlastnostmi a teplotou, dosaženými za pomoci působení zdroje tepla, tedy plazmatu. Ve třetí fázi nanášený materiál dopadá na materiál základní a ulpívá na něm, čtvrtá fáze je fází oblasti, v jaké teplota tepelného zdroje ovlivňuje základní materiál.

V praxi se využívají dva typy hořáku, lišící se svojí konstrukcí a principem stabilizace:

- s plynovou stabilizací
- s kapalinovou stabilizací.

Oba způsoby stabilizace mají své výhody a oblasti využití, ve kterých je daný způsob stabilizace pro



Obr. 20 Znázornění stabilizace plazmového paprsku [1]

daný účel výhodnější než ten druhý. Obecně lze však říci, že stabilizace za pomoci plynu je v praxi mnohem více využívána, než stabilizace za pomoci kapaliny. Obě varianty stabilizace plazmatu jsou znázorněny na obr. 20, kde v části a) je znázorněna plynová stabilizace, a v části b) stabilizace kapalinová. Kapalinou (vodou) stabilizovaná plazma se využívá jen pro nástřiky oxidickou keramikou, protože voda se při průchodu elektrickým obloukem rozkládá na vodík a kyslík. Teplota paprsku plazmy stabilizované kapalinou má v porovnání s plazmou stabilizovanou plynem mnohem vyšší teplotu - až 40000K. Stabilizace plazmového paprsku má zásadní vliv na průběh teplot paprsku v závislosti na vzdálenosti od ústí trysky a tím i na určení vhodné vzdálenosti pro přívod přídavného materiálu do sloupce plazmatu od ústí trysky.

Přídavné materiály používané pro žárové nástřiky můžeme dělit podle několika hledisek a to z hlediska formy, v jaké je materiál dopravován do místa tepelného působení zdroje tepla:

- ve formě drátu
- ve formě prášku
- speciální formy

nebo můžeme tyto materiály dělit z hlediska jejich chemického složení na skupiny materiálů:

- na kovové bázi
- na keramické bázi
- s exotermickým účinkem
- na bázi plastů
- speciální.

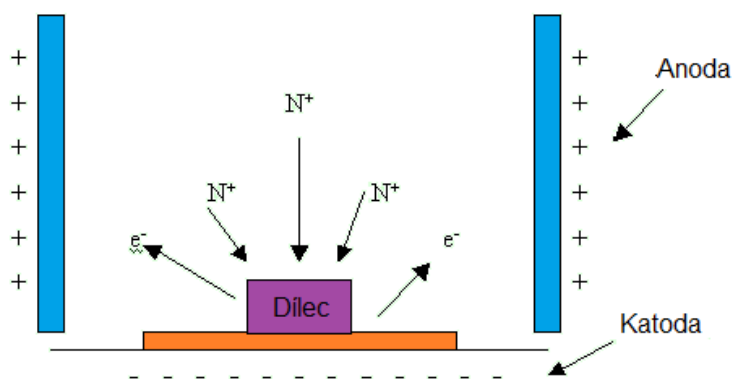
Z hlediska formy dopravování přídavného materiálu do místa nástřiku je při využití plazmatu jako zdroje tepla nejvhodnější forma prášku a to z důvodu, že plazmový paprsek dosahuje velkých rychlostí díky tomu má i velký dynamický účinek na částice přídavného materiálu, což vede k tomu, že částice velice dobře ulpívají na základním materiálu a je možno dosáhnout vysoké kvality výsledného povrchu.

Z hlediska materiálu použitého pro vytvoření povlakové vrstvy je možno použít všechny výše uvedené materiály a to díky tomu, že teplota plazmatu dosahuje velice vysokých hodnot, dostatečných pro roztavení jakéhokoli materiálu.

2.3.4 Tepelné zpracování [6][11][13]

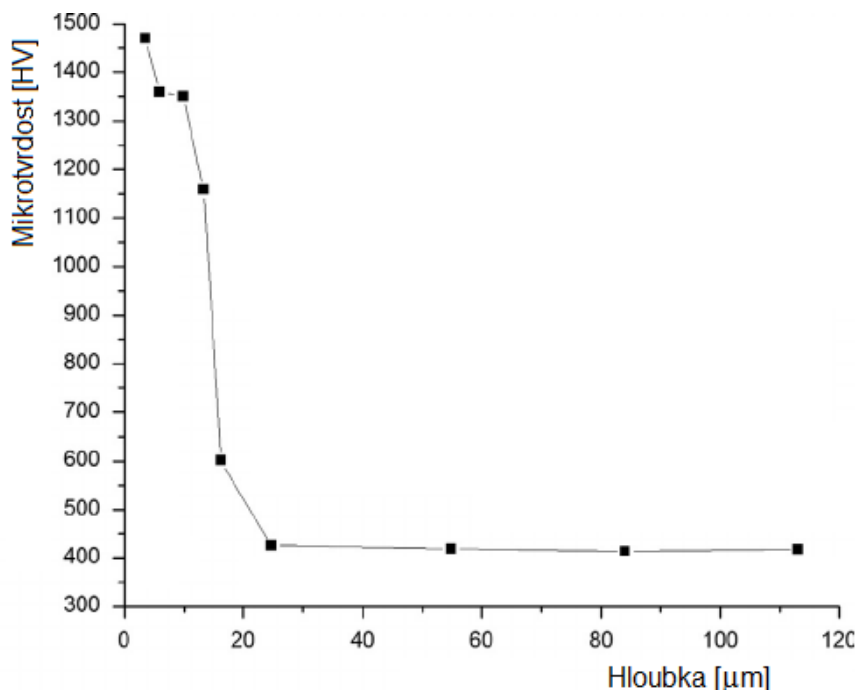
Technologie tepelného zpracování materiálu se sestává z širokého spektra procesů zahrnujících zahřívání a ochlazování zpracovávaného materiálu, popřípadě doplněného o sycení materiálu různými prvky za pomoci difuze; v tomto případě hovoříme o chemicko-tepelném zpracování. Procesy tepelného zpracování jako např. kalení, ať už v celém průřezu nebo povrchové, žihání, popouštění, apod. se liší v teplotách, jakých se pro daný způsob zpracování dosahuje, výdrži na těchto teplotách a v rychlostech změn těchto teplot jak při zahřívání, tak při ochlazování. Cílem těchto procesů je docílit změn ve struktuře materiálu, popřípadě změn v chemickém složení v určitém místě materiálu u chemicko-tepelného zpracování, a tím i změn fyzikálních vlastností materiálu.

Využití plazmatu v oblasti tepelného zpracování, přesněji v oblasti chemicko-tepelného zpracování, spočívá ve využití v procesu nitridace. Tento proces spadá do kategorie povrchových chemicko-tepelných zpracování, kde se zpracovávaná součást zateploty 450-550°C vloží do dusíkové atmosféry, viz obr. 19, čímž dojde k difuzi dusíku do povrchové vrstvy součásti.

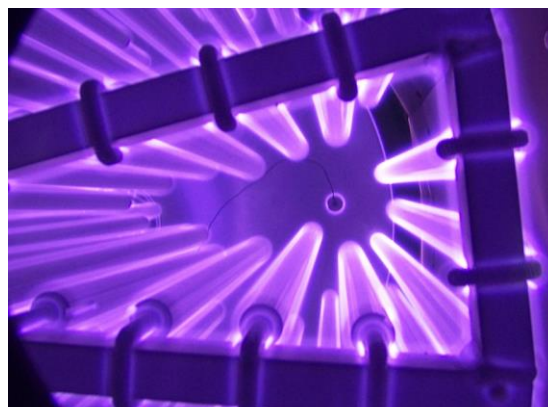


Obr. 21 Schéma procesu plazmové nitridace [11]

V praxi tento proces vypadá tak, že se součást vloží do vakuové komory, odkud je vysát vzduch a je nahrazen procesním plynem. Poté je součást předehřívána na požadovanou teplotu. Jelikož jednou z podmínek pro správné fungování této technologie je zamezení přítomnosti prachu v procesu, je jako následující krok nutné iontové odprašování. Po provedení této fáze přípravy je možné začít přivádět plyn sestávající se z dusíku, vodíku a metanu, a dále připojit zpracovávanou součást ke zdroji napětí, čímž dojde k ionizaci směsi tří výše uvedených plynů. Toto se projeví jako modrofialová záře obklopující nitridovanou součást, viz obr. 23. Díky vlivu teploty a energie plazmatu dojde k difuzi atomů procesních plynů do základního materiálu a k tvorbě nitridů. Pozitivním vlivem tvorby nitridů na povrchu součásti je zvýšení tvrdosti a odolnosti proti otěru povrchové vrstvy, nárůst mikrotvrdosti na povrchu materiálu, v závislosti na vzdálenosti od povrchu, je znázorněn v grafu na obr. 22. Dalším pozitivním faktorem je zvýšení únavové pevnosti a snížení součinitele tření povrchu.



Obr. 22 Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu[13]



Obr. 23 Proces plazmové nitridace [6]

Výhody využití plazmatu pro proces nitridace, oproti konvenčním metodám spočívajících ve využití plynné atmosféry bez ionizace nebo solné lázně, jsou rychlejší sycení dusíkem a zároveň nízká spotřeba energií a plynů, a tím i vyšší produktivita, lepší kontrola nad složením výsledné nitridové vrstvy, dosažení vysoké kvality povrchu a také minimální změny rozměrů součástí. Součástí je také možné jednoduše částečně zakrýt a tím pádem nitridovat jen požadované plochy obrobků. Další velkou výhodou je možnost využití této technologie prakticky pro všechny materiály, u kterých je jako základní prvek železo, a to od nízkouhlíkových ocelí až po litiny s vysokým obsahem uhlíku a od nízkoalloyovaných konstrukčních ocelí až po vysokolegované nástrojové oceli. Tato technologie je velice účinná také pro porézní materiály na bázi železa a pro neželezné materiály na bázi hliníku a titanu. Hlavní nevýhody můžeme spatřit v potřebě důkladného vyčištění pracovního prostoru od prachu a důkladného odsátí vzduchu, což proces zpomaluje a tím i prodražuje. Jedním z dalších problémů je nesnadná nitridace ploch uvnitř otvorů.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [3][4][7][8][12][14]

Praktická část této práce je zaměřena na využití technologie plazmatu, její výhody a nevýhody v porovnání s metodou TIG (WIG). Pro každou technologii byly, za pomoci svařovacích agregátů, zhotoveny tři návary s nastavenými různými parametry na shodném materiálu. (Viz dále.). Oblast porovnávání jednotlivých návarů spočívá ve vyhodnocení jejich tvrdosti v různých hloubkách pod povrchem, na základě výpočtu vneseného tepla pro jednotlivé návary z parametrů nastavených na svařovacích agregátech, při jejich vytváření.

3.1 Základní materiál [3][4][7][8][12]

Jako základní materiál byla pro testované návary použita korozivzdorná chrom-niklová austenitická ocel. Pro přehlednost je označení oceli znázorněno v tab. 6 pro různé, běžně používané normy. Chemické složení a mechanické vlastnosti této oceli jsou znázorněny v tabulkách 7 a 8. Tato ocel je odolná vůči atmosférické korozi, ale pouze příliš znečištěném prostředí, dále je odolná pitné vodě nebo některým zředěným kyselinám. Daná ocel je výhodná pro použití v potravinářském průmyslu, jelikož dobře odolává látkám, které mohou být potenciálně agresivní vůči oceli a jsou běžně obsaženy v potravinách. V prostředí s výskytem halogenidů však tento materiál může podléhat bodové korozi a pokud je tato ocel tepelně zpracovávána rozpouštěcím žíháním, je zde po tomto procesu riziko mezikrystalické koroze. K tomuto jevu dochází, je-li materiál vystaven teplotě v rozmezí mezi 500°C a 900 °C. Pro odstranění tohoto jevu se využívá stabilizace v podobě přísady Ti, Nb, Ta, nebo je u nich snížen obsah uhlíku pod hranici 0,03 % C. Tato ocel je nemagnetická a nekalitelná.

Tab. 6 Označení svařované oceli

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

dané

v ne
vůči

Tab. 7 Obsah prvků v oceli ČSN EN X5CrNi 18-10

Prvek	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
Obsah [%]	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,11	17,00-19,50	8,00-10,50

Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli ČSN EN X5CrNi 18-10 pro tl. do 160 mm.

Mechanická vlastnost	Tvrdost (Dle Vickerse)	Smluvní mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost	Vrubová houževnatost
Označení [Jednotka]	HV	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	KV [J.min]
Hodnota	226	190	500-700	45	100

Pro vyhodnocení svařitelnosti vysokolegovaných ocelí se využívá Schaefflerův diagram. Tento diagram dává do souvislosti vliv austenitotvorných a feritotvorných prvků obsažených v dané oceli po jejím volném ochlazení a to za pomoci chromového ekvivalentu Cr_e (rovnice

3.1) pro austenitotvorné prvky na vodorovné ose a niklového ekvivalentu Ni_e (rovnice 3.2) pro feritotvorné prvky na svislé ose diagramu.

Výpočet chromového a niklového ekvivalentu:

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

$$Cr_e = 19,5 + 0 + 1,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 21 \% \quad (3.1)$$

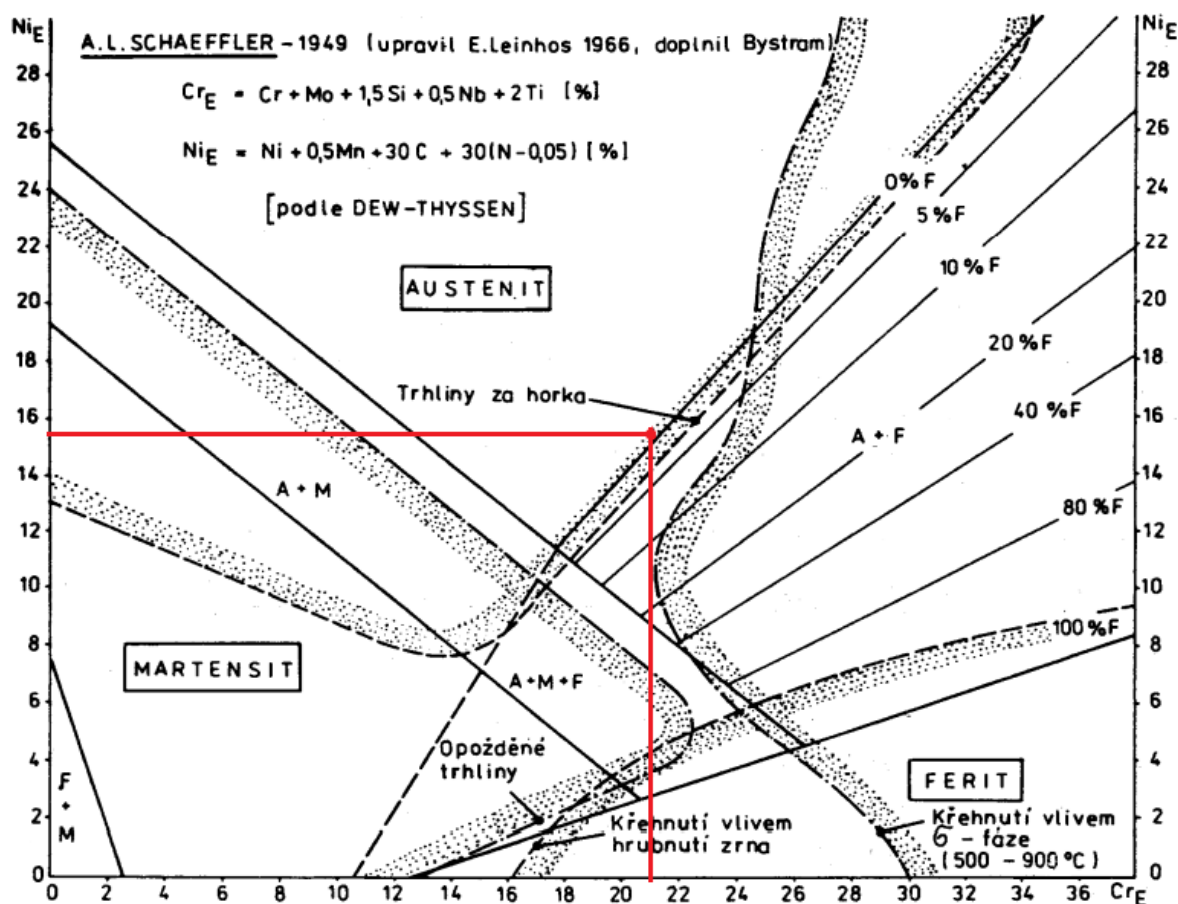
Kde: Cr_e – Chromový ekvivalent

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

$$Ni_e = 10,5 + 0,5 \cdot 2 + 30 \cdot 0,07 + 30 \cdot (0,11 - 0,05) = 15,4 \% \quad (3.2)$$

Kde: Ni_e – Niklový ekvivalent

V diagramu byly experimentálně zjištěny oblasti, ve kterých při daných koncentracích austenitotvorných a feritotvorných prvků dochází k nežádoucím jevům, které provázejí chladnutí místa svaru po jeho provedení, jako např. vznik trhlin nebo křehnutí materiálu, viz obr. 24.

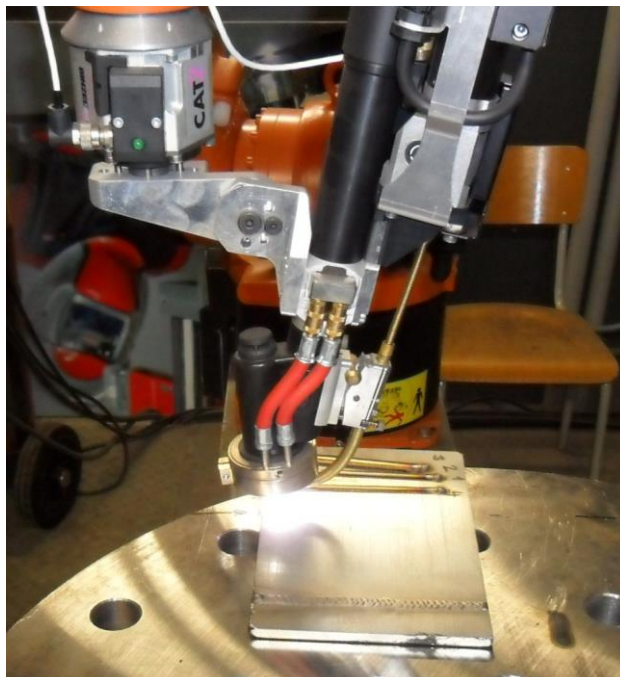


Obr. 24 Schaefflerův diagram [2]

Z obr. 22 je patrné, že se skutečně jedná o austenitickou ocel, která ale může být při daném složení náchylná k vzniku trhlin za horka. Aby k tomuto jevu nedocházelo, je nutné dbát na velmi nízký obsah fosforu a síry, a to jak v základním materiálu, tak i přídatném. Tyto prvky jsou největšími iniciátory vzniku trhlin za horka. Další možností jak tento jev omezit je volba vhodné technologie svařování, tak aby docházelo k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění okolí místa svaru.

3.2 Svařování metodou plazma [3][14]

Princip svařování metodou využívající plazmový paprsek je blíže popsána v kapitole 2.4.1. Pro porovnání a vyhodnocení výsledků byly vytvořeny tři návary za pomoci svařovacího robotu KR 5 ARC, viz obr. 25, s využitím přídatného materiálu v podobě drátu s obsahem 0,6 % Cr, 1,9 % Ni a 0,5 % Mo. Parametry svařování byly pro všechny tři návary stejné, s výjimkou jednoho parametru a to rychlosti podávání přídatného drátu. Parametry jsou znázorněny v tabulce 9. Jelikož rychlost podávání drátu nemá na množství vneseného tepla vliv, je tato hodnota pro všechny tři návary stejná a spočítá se dle vzorce 3.3.



Obr. 25 Plazmové svařování [3]

Tab. 9 Parametry plazmového svařování

Svařovací proud	I [A]	130 A	
Svařovací napětí	U [V]	19 V	
Rychlost posuvu hořáku	v_s [mm.s ⁻¹]	6,64 mm.s ⁻¹	
Tepelná účinnost	η [-]	0,65	
Rychlost podávání drátu	v_d [m.min ⁻¹]	v_{d1}	1,5 m.min ⁻¹
		v_{d2}	1,7 m.min ⁻¹
		v_{d3}	1,8 m.min ⁻¹

$$Q_s = \eta \cdot$$

$$\frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} [kJ/mm] \quad (3.3)$$

Kde:

- Q_s – vnesené teplo
- η – tepelná účinnost
- U – svařovací napětí
- I – svařovací proud
- v_s – rychlost posuvu hořáku

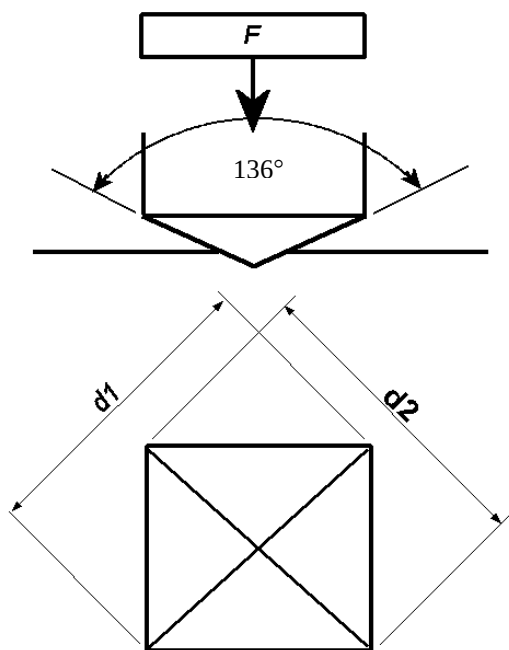
Po dosazení je tedy hodnota vneseného tepla:

$$Q_{SP} = 0,65 \cdot \frac{19 \cdot 130}{10^3 \cdot 6,64} = 0,242 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.3)$$

Kde: Q_{SP} – vnesené teplo plazmovým svařováním

3.2.1 Měření tvrdosti [3][14]

Vzorky byly z pohledu tvrdosti vyhodnocovány metodou měření tvrdosti dle Vickerse. Tato metoda spočívá ve vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami nejčastěji 136° , do povrchu materiálu danou silou, v našem případě 49,03 N (ekvivalent zatížení pomocí 5 kg) po určitou dobu (10 – 180 s). Tvrdost se poté vyhodnocuje za pomoci změření dvou úhlopříček čtvercového obtisku jehlanu. Viz obr. 26. V našem případě byla změna tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu měřena tak, že bylo vyhodnocováno pro každý svar 6 hodnot v ose svaru. První hodnota byla měřena 0,5 mm od okraje svaru a následující hodnoty byly měřeny dále směrem ke kořenu svaru vždy po 0,5 mm.



Obr. 26 Schéma měření tvrdosti podle Vickerse [14]

➤ Vzorek P1

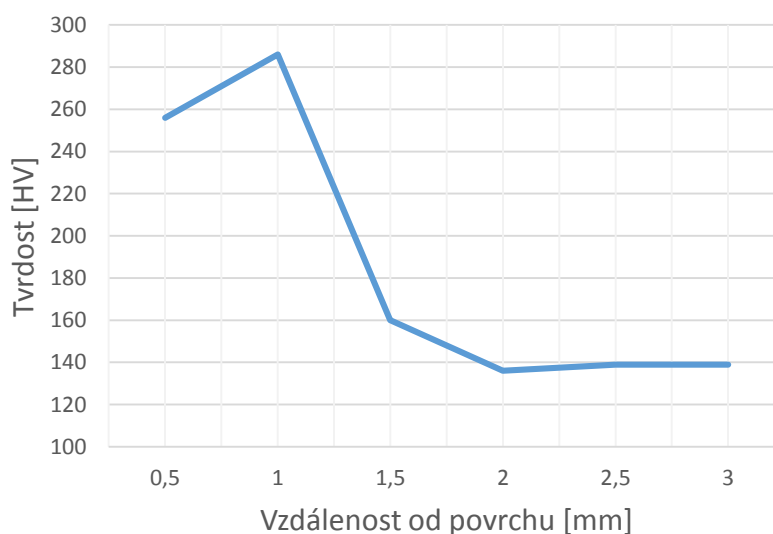
Pro vzorek P1 byla nastavena hodnota rychlosti přivádění přídavného drátu na hodnotu $v_d = 1,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Řez svarem je zobrazen na obr. 27, hodnoty tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu v tabulce 10. Z této tabulky byl vytvořen graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru, který je zobrazen na obrázku 28.



Obr. 27 Řez vzorkem P1 [3]

Tab. 10 Hodnoty tvrdosti vzorku P1 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost [HV]
0,5	256
1,0	286
1,5	160
2	136
2,5	139
3	139



Obr. 28 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku P1

➤ Vzorek P2

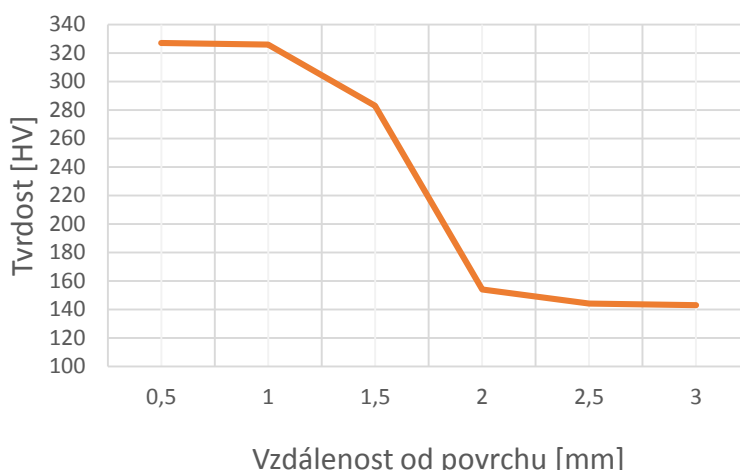
Pro vzorek P2 byla nastavena hodnota rychlosti přivádění přídavného drátu na hodnotu $v_d = 1,7 \text{ m.min}^{-1}$. Řez svarem je zobrazen na obr. 29, hodnoty tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu v tabulce 11. Z této tabulky byl vytvořen graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru, který je zobrazen na obrázku 30.



Obr. 29 Řez vzorkem P2 [3]

Tab. 11 Hodnoty tvrdosti vzorku P2 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost [HV]
0,5	327
1,0	326
1,5	283
2	154
2,5	144
3	143



Obr. 30 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku P2

➤ Vzorek P3

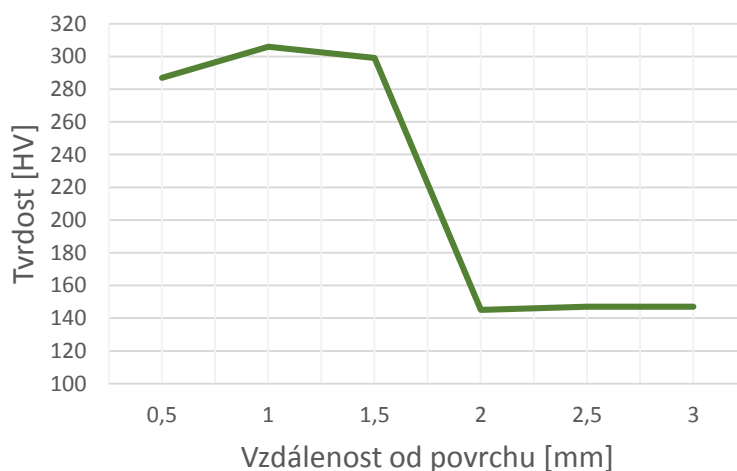
Pro vzorek P3 byla nastavena hodnota rychlosti přivádění přídavného drátu na hodnotu $v_d = 1,8 \text{ m.min}^{-1}$. Řez svarem je zobrazen na obr. 31, hodnoty tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu v tabulce 12. Z této tabulky byl vytvořen graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru, který je zobrazen na obrázku 32.



Obr. 31 Řez vzorkem P3 [3]

Tab. 12 Hodnoty tvrdosti vzorku P3 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

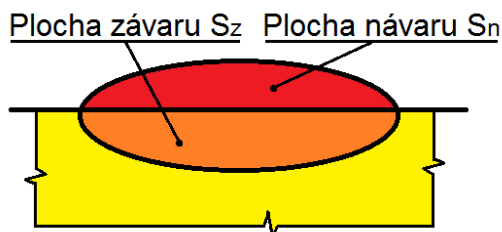
Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost [HV]
0,5	287
1,0	306
1,5	299
2	145
2,5	147
3	147



Obr. 32 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku P3

3.2.2 Výpočet zředění svarového kovu [3]

Zředění kovu základního materiálu, který je nataven procesem svařování, nataveným přídavným materiálem, je možno určit z plochy řezu daným svarem, předněji podílem plochy závaru S_z k celkové ploše návaru $S_n + S_z$, kde S_n je plocha návaru, viz obr. 33 a vztah 3.4. Plochy byly vypočítány za pomoci softwaru Autodesk Inventor Professional 2016 a jedná se pouze o orientační hodnoty pro určení poměru jednotlivých ploch, nikoli o reálné hodnoty ploch návarů. Průběh měření daných ploch je zobrazen na obrázcích 34, 35 a 36.



Obr. 33 Schéma ploch návaru a závaru

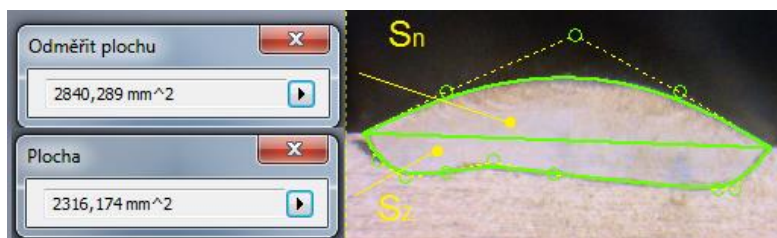
$$Z = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100 [\%] \quad (3.4)$$

Kde: Z – Zředění svarového kovu

S_z – Plocha závaru

S_n – Plocha návaru

➤ Vzorek P1

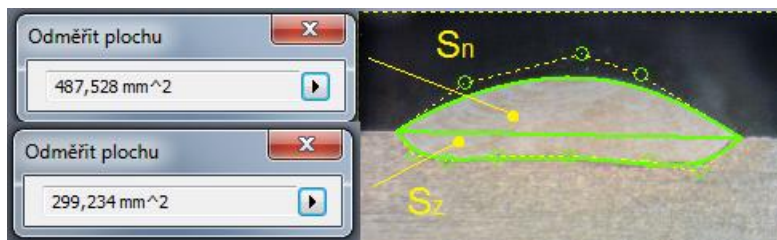


Obr. 34 Vyměření ploch návaru a závaru v řezu vzorku P1

$$Z_1 = \frac{2316}{2316 + 2840} \cdot 100 [\%]$$

$$Z_1 = 44,9 \% \quad (3.4)$$

➤ Vzorek P2

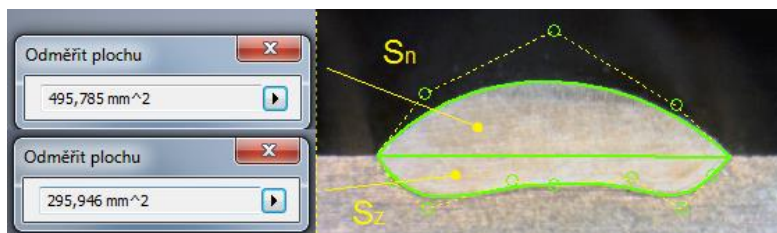


Obr. 35 Vyměření ploch návaru a závaru v řezu vzorku P2

$$Z_2 = \frac{299}{299 + 488} \cdot 100 [\%]$$

$$Z_2 = 38,0 \% \quad (3.4)$$

➤ Vzorek P3



Obr. 36 Vyměření ploch návaru a závaru v řezu vzorku P3

$$Z_3 = \frac{296}{296 + 495} \cdot 100 [\%]$$

$$Z_3 = 37,4 \% \quad (3.4)$$

3.3 Svařování metodou TIG [3][14]

Pro porovnání návarů vytvořených technologií využívající plazma byly vytvořeny také tři nátahy za pomoci technologie TIG (Tungsten Inert Gas). Pro tyto nátahy byl použit svařovací automat s připojeným svařovacím agregátem FRC4 od výrobce Fronius, viz obr. 37. Na rozdíl od svařování plazmatem zde nebyl použit žádný přídavný materiál, ale proměnnými faktory pro jednotlivé nátahy byly parametry svařovacího agregátu, proud a napětí. Hodnoty účinnosti a posuvu hořáku zůstaly nezměněny. Parametry nastavené na svařovacím agregátu jsou znázorněny v tabulce 13. Jelikož s rozdílnými svařovacími parametry je rozdílná i hodnota vneseného tepla, byla tato pro každý nátahy spočítána a jelikož zde nebyl použit žádný přídavný materiál, nebylo tedy nutné vyhodnocovat zředění svarového kovu, jako tomu bylo u plazmy.



Obr. 37 Svařovací automat a agregát Fronius FRC4 pro metodu TIG [3]

Tab. 13 Parametry svařování pro jednotlivé nátahy metodou TIG

Vzorek		T1	T2	T3
Svařovací proud	[I]	130	180	260
Svařovací napětí	[V]	16	19	25
Účinnost	[-]	0,65	0,65	0,65
Rychlost posuvu hořáku	[mm.s ⁻¹]	6,67	6,67	6,67

Výpočet vneseného tepla pro jednotlivé nátahy:

- Vzorek T1

$$Q_{ST1} = 0,65 \cdot \frac{16 \cdot 130}{10^3 \cdot 6,67} = 0,203 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.3)$$

Kde: Q_{ST1} – Vnesené teplo pro vzorek T1

- Vzorek T2

$$Q_{ST2} = 0,65 \cdot \frac{19 \cdot 180}{10^3 \cdot 6,67} = 0,333 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.3)$$

Kde: Q_{ST2} – Vnesené teplo pro vzorek T2

- Vzorek T3

$$Q_{ST3} = 0,65 \cdot \frac{25 \cdot 260}{10^3 \cdot 6,67} = 0,633 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.3)$$

Kde: Q_{ST3} – Vnesené teplo pro vzorek T3

3.3.1 Měření tvrdosti [3][14]

Měření tvrdosti probíhalo stejným postupem, za stejných podmínek jako v kapitole 3.2.1.

❖ Vzorek T1

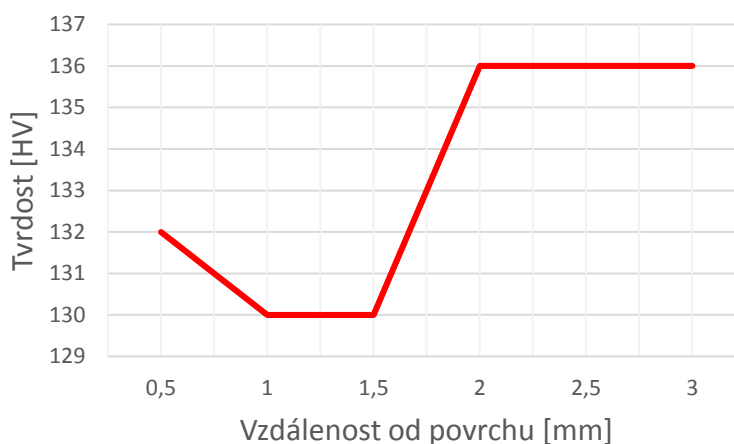
Na obr. 38 je řez nátavem vzorku T1. Tento svar byl vytvořen při nastavené hodnotě proudu 130 A a napětí 16 V. V tabulce 14 jsou znázorněny naměřené hodnoty tvrdosti a na základě těchto hodnot byl vytvořen graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu nátavu, viz obr. 39.



Obr. 38 Řez vzorkem T1 [3]

Tab. 14 Hodnoty tvrdosti vzorku T1 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

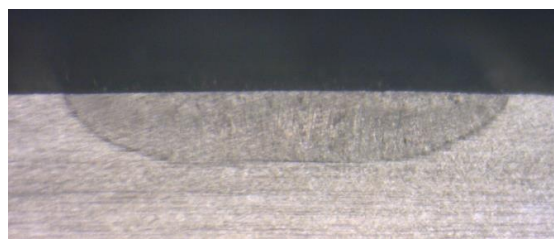
Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost [HV]
0,5	132
1,0	130
1,5	130
2	136
2,5	136
3	136



Obr. 39 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku T1

❖ Vzorek T2

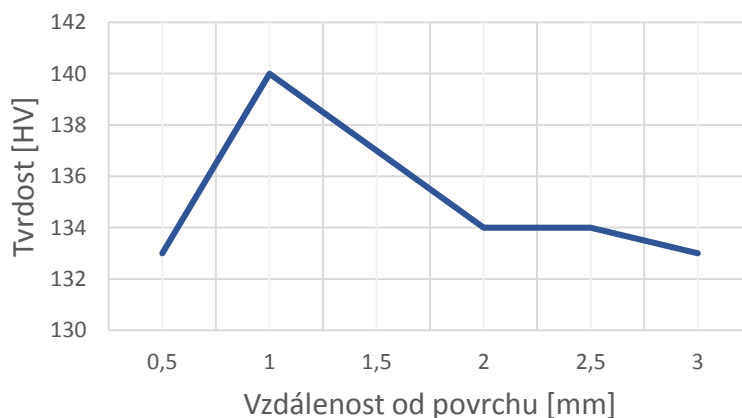
Na obr. 40 je řez nátavem vzorku T2. Tento svar byl vytvořen při nastavené hodnotě proudu 180 A a napětí 19 V. V tabulce 15 jsou znázorněny naměřené hodnoty tvrdosti a na základě těchto hodnot byl vytvořen graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu nátavu, viz obr. 41.



Obr. 40 Řez vzorkem T2 [3]

Tab. 15 Hodnoty tvrdosti vzorku T2 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost [HV]
0,5	133
1,0	140
1,5	137
2	134
2,5	134
3	133



Obr. 41 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku T2

❖ Vzorok T3

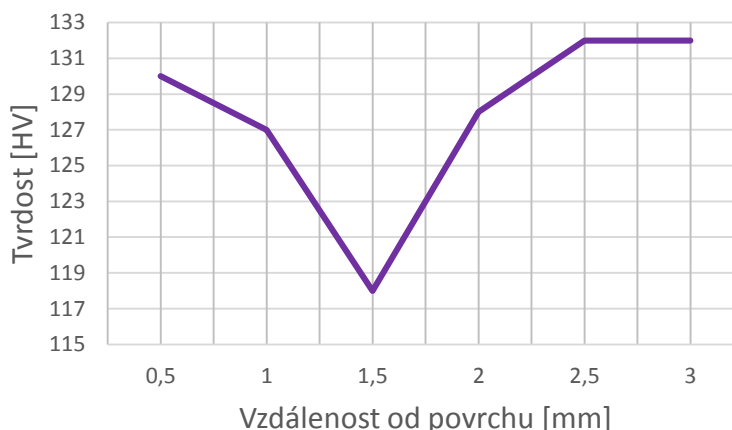
Na obr. 42 je řez nátavem vzorku T2. Tento svar byl vytvořen při nastavené hodnotě proudu 260 A a napětí 25 V. V tabulce 16 jsou znázorněny naměřené hodnoty tvrdosti a na základě těchto hodnot byl vytvořen graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu nátavu, viz obr. 43.



Obr. 42 Řez vzorkem T3 [3]

Tab. 16 Hodnoty tvrdosti vzorku T3 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

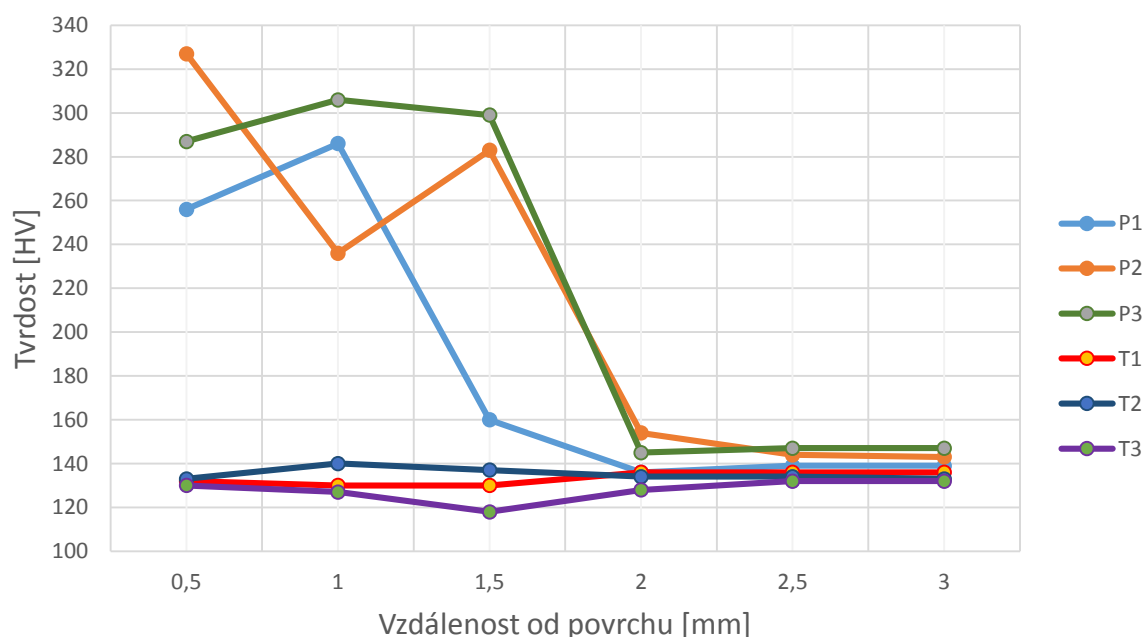
Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost [HV]
0,5	130
1,0	127
1,5	118
2	128
2,5	132
3	132



Obr. 43 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku T3

3.4 Celkové vyhodnocení návarů

Pro lepší přehlednost výstupů daného experimentu byla sestavena tabulka 17 porovnávající hodnoty vstupující do procesu vytváření jednotlivých návarů, dále hodnoty vypočítané na základě hodnot vstupních a hodnoty naměřené na vzorcích. Dále byl z těchto hodnot sestaven graf srovnávající všechny návary v z pohledu jejich tvrdosti v závislosti na vzdálenosti měření od povrchu, viz obr. 44.



Obr. 44 Souhrnný graf tvrdostí pro všechny vzorky

Tab. 17 Souhrnná tabulka vstupních, výstupních a naměřených hodnot pro všechny návary

Návar				P1	P2	P3	T1	T2	T3
Parametr		Označení [Jednotka]							
Svařovací proud		I [A]		130	130	130	130	180	260
Svařovací napětí		U [V]		19	19	19	16	19	25
Účinnost		η [-]		0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Rychlost posuvu trysky		v_s [mm.s ⁻¹]		6,64	6,64	6,64	6,67	6,67	6,67
Rychlost podávání drátu		v_d [m.min ⁻¹]		1,5	1,7	1,8	-	-	-
Zředění		Z [%]		44,9	38,0	37,4	100	100	100
Vnesené teplo		Q_s [kJ. mm ⁻¹]		0,242	0,242	0,242	0,203	0,333	0,633
Tvrdost	Vzdálenost od povrchu [mm]	0,5	HV	256	327	287	132	133	130
		1	HV	286	236	306	130	140	127
		1,5	HV	160	283	299	130	137	118
		2	HV	136	154	145	136	134	128
		2,5	HV	139	144	147	136	134	132
		3	HV	139	143	147	136	133	132

4 ZÁVĚRY

Jak bylo zmíněno v této práci, paprsek ionizovaného plynu, tedy plazmatu, má v technické praxi široké uplatnění, a to hlavně ve svařování, dělení materiálu, povrchových nástřicích a chemicko-tepelném zpracování. V oblasti svařování můžeme díky této technologii vytvářet svary s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí a současně dosahovat vysoké kvality svarů. U dělení materiálu můžeme díky využití plazmatu dělit materiály, které např. kyslíkem nelze řezat díky faktu, že mají teplotu hoření vyšší, než teplotou tavení. V oblasti žárových nástřiků je díky velmi vysoké teplotě, kterých plazma dosahuje možno tavit povlakové materiály, které jinými technologiemi možno roztavit není.

Praktická část této práce spočívala ve vyhodnocení vneseného tepla, tvrdosti, zředění a makrostruktury, pro tři návary vytvořené plazmovým svařováním a tři nátavy vytvořené metodou TIG. Makrostruktura nebyla vyhodnocena z důvodu nedostatku nebo nejasnosti informací a výstupů z prováděných testů vzorků.

Pro výpočet vneseného tepla jednotlivých vzorků byl užit výpočet využívající vstupní parametry svařování nastavené na svařovacích agregátech. U plazmového svařování byla tato hodnota shodná pro všechny tři návary, jelikož jediným proměnlivým parametrem odlišujícím tyto vzorky byla rychlost podávání přídatného drátu, a tato hodnota nemá na vnesené teplo vliv. U vzorků vytvořených metodou TIG se lišily hodnoty svařovacího proudu a napětí a z tohoto důvodu se lišily i hodnoty vneseného tepla. Vypočítaná hodnota vneseného tepla u plazmového svařování je přibližně odpovídající hodnotám spočítaným pro metodu TIG s použitými vstupními parametry přibližně stejných hodnot jako u plazmatu.

Z vyhodnocení vzorků z pohledu tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu vyplývá, že tvrdost u vzorků vytvořených plazmovým svařováním v oblasti blízké povrchu svaru roste, (do vzdálenosti 1,5 mm od povrchu) až na dvojnásobek původní hodnoty a dále směrem do oblasti závaru klesá. U vzorků vyhotovených metodou TIG žádný zásadní nárůst ani pokles tvrdosti nebyl naměřen.

Vyhodnocení zředění svarového kovu bylo provedeno pouze u návarů vytvořených plazmatem, jelikož u metody TIG nebyl použit žádný přídatný materiál. Z výsledků výpočtů zředění na základě ploch návaru a závaru vyplývá, že zředění klesá s přibývajícím množstvím přídatného materiálu, potažmo rychlostí podávání přídatného drátu, tak jak bylo předpokládáno.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ[5]

1. AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 8003003474.
2. AMBROŽ, Oldřich. Svařitelnost materiálu. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav*. [online]. 23.5.2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/svaritelnost_materialu__ambroz.pdf
3. BEDNÁŘ, Šimon. *Využití plazmového oblouku v technické praxi*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
4. BOLZANO. *Technická příručka* [online]. 2016 [cit. 2015-05-18]. 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>
5. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
6. IBCCOATINGS. *Ion Plasma / Ion Nitriding (DHIN)*. [online]. 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.ibccoatings.com/ion-plasma-ion-nitriding-dhin>
7. INOXSPOL SPOL. S R. O. *Nerezová ocel 1.4301*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
8. KONSTRUKCE. *Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost*. [online]. 23.5.2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
9. KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
10. MATEJKA, Dušan a Bernard BENKO. *Plazmové striekanie kovových a keramických práškov*. Bratislava: Alfa, 1988. Edícia strojárskkej literatúry (Alfa).
11. TECHNOLOGY, PRODUCTS AND PROCESSES. *Plasma nitriding process*. [online]. 2006 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.tppinfo.com/heat_treatment/plasma_nitriding_coating/plasma_nitriding.html
12. POLTECH. *Mateiálové normy*. . [online]. 23.5.2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.poltech.cz/poltech/10-Normy-CSN-DIN-ISO/15-Vlastnosti-oceli-10-19>
13. RESEARCHGATE. *Stainless steel after plasma nitriding*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/256913755_fig5_Fig-5-Cross-sectional-view-of-AISI-410-stainless-steel-after-plasma-nitriding
14. GORDONENGLAND. *Vickers Hardness Test*. [online]. 23.5.2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Popis	Jednotka
A	Tažnost	[%]
C _p	Skupenské teplo plynu	[J]
Cr _e	Chromový ekvivalent	[%]
E	Gradient po středu sloupce oblouku.	[-]
E'	Energie potřebná pro přechod z jedné dráhy do druhé	[J]
E ₁	Energie elektronu e ₁ na dráze bližší k jádru atomu	[J]
E ₁ '	Energie elektronu e ₁ na dráze vzdálenější od jádra atomu	[J]
E ₂	Energie elektronu e ₂ na dráze bližší k jádru atomu	[J]
E ₂ '	Energie elektronu e ₂ na dráze vzdálenější od jádra atomu	[J]
HV	Tvrdost dle Vickerse	[HV]
I	Proud oblouku	[A]
KV	Vrubová houževnatost	[J.min]
L	Délka oblouku	[mm]
N _{ef}	Efektivní výkon plazmového oblouku	[W]
Ni _e	Niklový ekvivalent	[%]
N _q	Výkon plazmového oblouku	[W]
Q	Průtok plynu	[l.min ⁻¹]
Q _S	Vnesené teplo	[kJ.mm ⁻¹]
Q _{SP}	Vnesené teplo plazmovým svařováním	[kJ.mm ⁻¹]
Q _{ST}	Vnesené teplo metodou TIG	[kJ.mm ⁻¹]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S _n	Plocha návaru	[mm ²]
S _z	Plocha závaru	[mm ²]
T	Teplota plynu na výstupu z dýzy určená z entalpie	[K]
T ₀	Teplota plynu na vstupu do dýzy určená z entalpie	[K]
T _{max}	Maximální dosahová teplota plazmového paprsku	[K]
T _{stř}	Střední dosahová teplota plazmového paprsku	[K]
U	Napětí oblouku	[V]
Z	Zředění	[%]
a _k	Koeficient tepelné vodivosti od plazmy k dýze	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
b _e	Pohyblivost elektronů	[-]
d	Průměr dýzy	[mm]
e	Elektrický elementární náboj	[C]
k _c	Klasická vodivost prostřednictvím mikropohybů atomů a iontů	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
k _D	Účinek difuze asociovaných atomových párů	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
k _E	Klasická vodivost prostřednictvím elektronů	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
k _j ⁺	Účinek difuze iontů a elektronů	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
k _j ⁺⁺	Účinek rozštěpení na dvojnásobně ionizované atomy a elektrony	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
n _e	Hustota elektronů	[-]
p	Tlak na výstupu z dýzy	[kPa]
p ₀	Tlak na vstupu do dýzy	[kPa]
v	Rychlost proudu na výstupu z dýzy	[m.s ⁻¹]

Označení	Popis	Jednotka
v_0	Rychlost proudu na vstupu do dýzy	$[m.s^{-1}]$
v_d	Rychlost podávání drátu	$[m.min^{-1}]$
v_s	Rychlost posuvu hořáku	$[mm.s^{-1}]$
λ	Elektrická vodivost	$[S]$
η	Účinnost	$[-]$
ρ	Hustota plynu na výstupu z dýzy	$[kg.m^{-3}]$
ρ_0	Hustota plynu na vstupu do dýzy	$[kg.m^{-3}]$

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Technologie využívající plazma*
Obr. 2 Nabuzení neutrálního atomu
Obr. 3 Energie ionizace atomu
Obr. 4 Disociace a ionizace dvouatomových plynů
Obr. 5 Teplota plazmového paprsku
Obr. 6 Entalpie plazmatu v závislosti na teplotě
Obr. 7 Vliv parametrů plazmového oblouku na jeho teplotu
Obr. 8 Vliv parametrů plazmového oblouku na jeho výkon
Obr. 9 Závislost tepelné vodivosti dusíkového plazmatu na teplotě
Obr. 10 Elektrická vodivost plazmatu v závislosti na teplotě
Obr. 11 Plazmový hořák se závislým paprskem
Obr. 12 Plazmový hořák s nezávislým paprskem
Obr. 13 Plazmový hořák s kombinovaným zapojením
Obr. 14 Volba parametrů pro plazmové svařování různých materiálů
Obr. 15 Konstrukce hořáku pro metodu Plazma-MIG (GMPA)
Obr. 16 Průběh teplot v okolí řezu při tepelném dělení materiálu
Obr. 17 Porovnání řezné rychlosti v závislosti na tloušťce materiálu pro různé technologie
Obr. 18 Princip dělení materiálu vodním plazmatem
Obr. 19 rozdělení procesu žárového nástřiku n jednotlivé fáze
Obr. 20 Znázornění stabilizace plazmového paprsku
Obr. 21 Schéma procesu plazmové nitridace
Obr. 22 Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu
Obr. 23 Proces plazmové nitridace
Obr. 24 Schaefflerův diagram
Obr. 25 Plazmové svařování
Obr. 26 Schéma měření tvrdosti podle Vickerse
Obr. 27 Řez vzorkem P1
Obr. 28 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku P1
Obr. 29 Řez vzorkem P2
Obr. 30 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku P2
Obr. 31 Řez vzorkem P3
Obr. 32 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku P3
Obr. 33 Schéma ploch návaru a závaru
Obr. 34 Vyměření ploch návaru a závaru v řezu vzorku P1
Obr. 35 Vyměření ploch návaru a závaru v řezu vzorku P2
Obr. 36 Vyměření ploch návaru a závaru v řezu vzorku P3
Obr. 37 Svařovací automat a agregát Fronius FRC4 pro metodu TIG
Obr. 38 Řez vzorkem T1
Obr. 39 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku T1
Obr. 40 Řez vzorkem T2
Obr. 41 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku T2
Obr. 42 Řez vzorkem T3
Obr. 43 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru vzorku T3
Obr. 44 Souhrnný graf tvrdostí pro všechny vzorky

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Energie potřebná pro disociaci a ionizaci plynů

Tab. 2 Chemicko-fyzikální charakteristiky plazmových plynů

Tab. 3 Závislost teploty na výkonu a průtoku plazmového plynu

Tab. 4 Koncentrace tepelného výkonu dosažitelná různými zdroji světla při svařování

Tab. 6 Označení svařované oceli

Tab. 7 Obsah prvků v oceli ČSN EN X5CrNi 18-10

Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli ČSN EN X5CrNi 18-10 pro tl. do 160 mm.

Tab. 9 Parametry plazmového svařování

Tab. 10 Hodnoty tvrdosti vzorku P1 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Tab. 11 Hodnoty tvrdosti vzorku P2 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Tab. 12 Hodnoty tvrdosti vzorku P3 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Tab. 13 Parametry svařování pro jednotlivé nátavy metodou TIG

Tab. 14 Hodnoty tvrdosti vzorku T1 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Tab. 15 Hodnoty tvrdosti vzorku T2 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Tab. 16 Hodnoty tvrdosti vzorku T3 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Tab. 17 Souhrnná tabulka vstupních, výstupních a naměřených hodnot pro všechny návary