

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta



Moderní procesy svařování elektrickým obloukem
Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.
Autor bakalářské práce: Tomáš Sitta

PRAHA 2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Sitta

Inženýrství údržby

Název práce

Moderní procesy svařování elektrickým obloukem

Název anglicky

Modern electric arc welding processes

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o moderních procesech při svařování elektrickým obloukem. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

Svařování, elektrický oblouk, průmysl

Doporučené zdroje informací

Brandon, D., Kaplan, W., D. : Joining Processes : An introduction, Chichester: Wiley, 1997. 363 s.

Časopisy: Manufacturing technology, MM průmyslové spektrum, Strojářstvo – Strojírenství, Strojírenská technologie, Technický týdeník, Technik.

Hrivňák, I.: Theory of Weldability of Metals and Alloys. Amsterdam: Elsevier, 1992. 372 s.

Koukal, J., Zmydlený, T.: Svařování, I. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2005. 133 s.

Kuncipál, J., Pilous, V., Dunovský, J.: Nové technologie ve svařování. Praha, SNTL, 1984. 292 s.

Lancaster, J., F.: Metallurgy of welding. Cambridge: Abington, 1999. 446 s.

Lippold, J., C.: Welding metallurgy and weldability. Hoboken: Wiley, 2015. 400 s.

Steen, M., W.: Laser material processin. London: Springer, 2003. 408 s.

Weman, K., Lindén, G.: MIG welding guide, Cambridge: Woodhead, 2006. 303 s.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 8. 1. 2017

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2019

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Moderní procesy svařování elektrickým obloukem vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze 31.3.2019

Tomáš Sitta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Petru Hraběti Ph.D. za vedení a poskytnutí odborných rad při tvorbě mé bakalářské práce.

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá shromážděním a analýzou moderních procesech používaných při svařování elektrickým obloukem. V první části bakalářská práce je vytvořen přehled o vlastnostech elektrického oblouku, za jakých podmínek dochází k zapálení a jaké parametry jsou nezbytné pro správné fungování. V první části jsou rovněž rozděleny jednotlivé svařovací zdroje a je zde popis svařovacích charakteristik. V druhé části bakalářské práce dochází k popisu samostatných klasických metod svařování elektrickým obloukem. Následně je každá z klasických svařovacích metod rozšířena o vývojové prvky.

Klíčová slova: Svařování, elektrický oblouk, průmysl

Modern electric arc welding processes

Summary: Bachelor thesis deals with the collection and analysis of modern methods used in arc welding. In the first part of the bachelor thesis there is an overview of the properties of the electric arc, under what conditions the ignition occurs and what parameters are necessary for proper operation. In the first part individual welding sources are also divided and there is a description of the welding characteristics. In the second part of the bachelor thesis there is a description of separate classical arc welding methods. Consequently, each of the classic welding methods is expanded with development elements.

Keywords: Welding, electric arc, industry

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce a metodika	2
2.1 Cíl práce	2
2.2 Metodika	2
3 Definice svařování.....	3
3.1 Technologie svařování	3
3.1.1 Příprava materiálu pro svařování.....	3
4 Elektrický oblouk.....	4
4.1.1 Charakteristické znaky oblouku.....	4
4.2 Zapálení oblouku.....	4
4.2.1 Krátkodobý dotyk elektrody a základního materiálu.....	4
4.2.2 Bezdotykové vysokofrekvenční.....	4
4.2.3 Dotykové zapálení tzv. startovacím proudem.....	5
4.3 Části oblouku	5
4.3.1 Základní oblasti oblouku	6
4.3.2 Statické vlastnosti elektrického oblouku	7
4.3.3 Stabilita elektrického oblouku	7
4.3.4 Foukání oblouku	7
4.4 Zdroje proudu pro svařování elektrickým obloukem.....	8
4.4.1 Statická charakteristika svařovacího zdroje.....	9
4.4.2 Dynamická charakteristika svařovacího zdroje	10
5 Svařování elektrickým obloukem.....	11
5.1 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	11
5.1.1 Popis metody.....	11
5.1.2 Elektrody.....	12
5.1.3 Svařovací parametry a podmínky svařování.....	14
5.1.4 Příslušenství.....	15
5.1.5 Průvarové svařování obalenou elektrodou.....	15
5.2 MIG/MAG.....	15
5.2.1 Princip metody	15
5.2.2 Přenosy kovu.....	16
5.2.3 Přídavný materiál	18
5.2.4 Ochranné plyny	18
5.2.5 Parametry a podmínky svařování	20
5.2.6 Příslušenství.....	20
5.2.7 CMT.....	21

5.2.8	Tandemové svařování	21
5.3	TIG	22
5.3.1	Elektroda	23
5.3.2	Přídavný materiál	24
5.3.3	Svařovací proudy	24
5.3.4	TOPTIG	25
5.3.5	Keyhole – TIG	26
5.4	PAW	26
5.4.1	Typy plazmových oblouků	27
5.4.2	Plyny	27
5.4.3	Parametry svařování	28
5.4.4	PTA	28
5.4.5	PAW – TIG	29
	Svařování automatem pod tavidlem	30
5.4.6	Svařovací zařízení	30
5.4.7	Svařovací parametry	31
5.4.8	Přídavné materiály a tavidla	31
5.4.9	Dvojdřátové a tandemové svařování pod tavidlem	32
5.5	Hybridní svařování	33
5.5.1	Hybridní svařování Laser – MIG/MAG	34
5.5.2	Laser – TIG	34
6	Závěr	35
7	Seznam použitých zdrojů	36
8	Seznam obrázků	39

1 Úvod

Tvorba svarového spoje je známa už z doby železné, kdy se kov zahřál zhruba na teplotu tání a působením vnějšího tlaku, těžkými údery kladivem došlo k vytvoření spoje. Tento způsob tvorby spojů se dnes nazývá kovářské svařování. S postupem doby byl v roce 1860 Angličanem Wildem objeven elektrický oblouk. Wilde provedl první spojení pomocí elektrického oblouku dvou kusů železa a zároveň položil základní kámen pro moderní metody svařování elektrickým obloukem.

Svařování elektrickým obloukem patří do skupiny tavného svařování. Při vzniku elektrického oblouku dochází k přenosu tepelné energie, která způsobí vznik nového svarového spojení. Jednotlivé metody používané při svařování elektrickým obloukem jsou rozlišovány podle typů elektrod a prostředí, ve kterém hoří elektrický oblouk.

V dnešní době, kdy je strojírenský průmysl na špici svého působení má svařování nezastupitelné místo ve výrobních procesech. Tlak, který je způsoben neukojenou poptávkou zákazníků po nových inovacích, zaručuje vývoj a zdokonalování svařovacích metod. Správný technologický postup při svařování má neodmyslitelný vliv na jakost a cenu výrobku. Pro zaručení kvality svarového spoje je nezbytné řádné kvalifikace pracovníků.

S rostoucí výrobou konstrukčně složitých prvků se zvyšují technologické nároky na svarové spoje. Spoje je nutné vytvořit na těžko přístupných místech, kde může dojít při špatně zvoleném technologickém postupu k degradaci svarového spoje. Degradovaný spoj pak má zhoršené mechanické a chemické vlastnosti. Potlačení výroby „zmetkových“ spojů lze za pomoci predikce a přesných výpočtových parametrů svařování.

Nastávající Průmysl 4.0 klade vysoký důraz na automatizaci jednotlivých výrobních procesů a sbírání výrobně užitečných dat. Proces svařování nezůstává pozadu a moderní postupy jsou již plně zautomatizovány. Využitím automatizace svařování při sériové výrobě se značně zrychluje průběh výrobního toku a dochází ke snížení provozních nákladů. Jeden z hlavních kroků vývoje u svařovacích metod bylo využití předností metod a odstranění jejich nedostatků viz. (*pomalá svařovací rychlost, špatné provaření materiálu, tvorba špatných přechodů*). Snížení vlivu nedostatků bylo dosaženo pomocí kombinace kladných vlastností jednotlivých metod.

Na základě výše uvedených informací byly vyvinuty hybridní svařovací metody. Hybridní svařování výrazně zlepšuje účinnost svařování a kvalitu spoje. Přísun tepla je pomocí dvou zdrojů tepla, které se navzájem doplňují. Jeden ze základních hybridů je kombinace klasických metod (MIG-TIG, PAW-TIG,). V poslední době je často využíváno laser hybridní svařovací proces, kdy je použita klasická metoda společně s laserem. Spojením těchto metod vzniká velice kvalitní svar bez tepelné deformace okolní oblasti svařovaného materiálu. Z důsledku vysoké finanční náročnosti laser hybridní metody, je metoda využívána v odvětví, kde je kladen důraz na pevnost a kvalitu svarového spoje. Převážně se jedná o automobilový průmysl, výrobu lodí a konstrukce kosmických komponentů.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o moderních procesech při svařování elektrickým obloukem. Seznámit se s technologickým procesem svařování jednotlivých metod a získávání poznatků o jejich vývoji. Práce je tvořena formou rešerše dat získaných z odborné literatury.

2.2 Metodika

Na základě pramenů odborné literatury a jiných zdrojů informací je vypracována rešerše na téma Moderní procesy svařování elektrickým obloukem.

V bakalářské práci je zpočátku představen elektrický oblouk a jeho fyzikální vlastnosti. Následně jsou charakterizovány klasické metody svařování, kde jsou přiblíženy jejich principy, složení a popis dílčích komponentů. V návaznosti na klasickou metodu je popsána moderní metoda, která vychází vývojem z té klasické.

Ke konci práce jsou popsány moderní procesy svařování pomocí metody PAW a využívání metody Laser Hybrid

3 Definice svařování

3.1 Technologie svařování

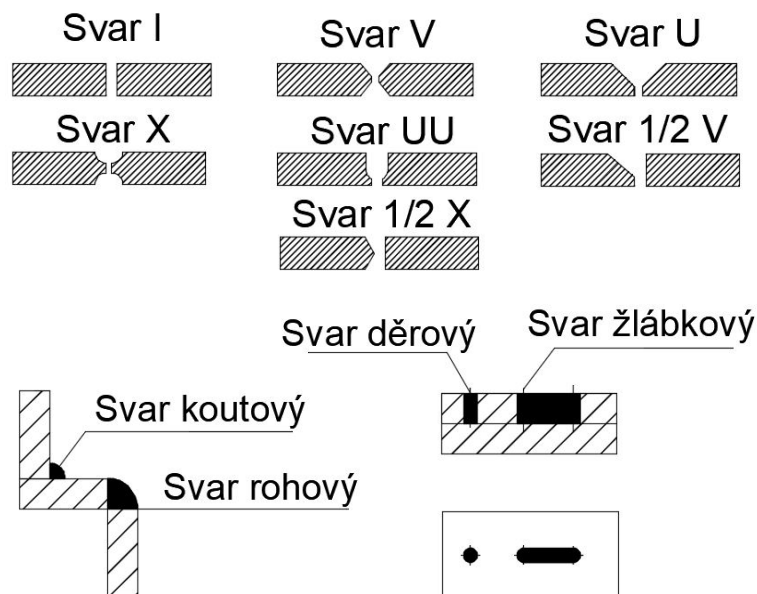
Svařování je technologický proces, při kterém vzniká nerozebíratelné spojení dvou nebo více materiálů. Spojení vzniká za působení soustředěného tepla, tlaku nebo obou faktorů najednou. Na ohříváných oblastech svarových ploch v průběhu svařování dochází k působení meziatomových sil, které zapříčiňují spojení materiálů.

Pro zlepšení vlastností svarového spoje lze při svařování použít přídavný materiál. Materiál může mít stejné či podobné chemické složení jako materiál spojovaný.

3.1.1 Příprava materiálu pro svařování

Jedna ze základních podmínek pro vytvoření kvalitního svarového spojení je pečlivá příprava materiálu. Z tohoto hlediska musí materiál splňovat dvě podstatné podmínky. Materiál musí být zbaven všech nečistot a tvary svarových ploch musí mít správnou geometrii (Obr. 1). Úprava svarových ploch závisí na tloušťce svařovaného materiálu. Při svařování tenkých materiálů se okraj svařovaného dílu může kolmo zastříhnout. Zarovnáním svarových dílců s mezerou je možné dosáhnout dokonalého natavení svarových ploch v celém průřezu. Tímto způsobem je možné svařovat materiál do tloušťky 4 mm. Při větších tloušťkách materiálu je nutné svarové plochy rozevřít pod určitým úhlem pro jejich dokonalé natavení. Kořenová část svaru musí být přístupná a musí vzniknout prostor pro manipulaci s přídavným materiálem vzhledem k možnosti výskytu foukání oblouku. Úkosová hrana v kořenové části nesmí zůstat ostrá. V ostré hraně dochází k přehřívání materiálu. [1]

Obr. 1 Tupé a koutové svary [Autor]



4 Elektrický oblouk

Elektrický oblouk, který je využíván ve svařování vzniká při nízkém napětí za vlivu působení vysokotlakého výboje. Elektrický oblouk hoří v prostředí ionizovaného plynu. Stabilní hoření oblouku lze dosáhnout za podmínky, kdy je dostatečné napětí pro ionizaci prostředí a proudu, které udržuje plazmu oblouku v ionizovaném stavu. Při výboji dochází k přesunu katodových elektronů na anodu a ionty přestupují z anody na katodu. Obloukový výboj může vzniknout za působení střídavého i stejnosměrného proudu. [2]

4.1.1 Charakteristické znaky oblouku

- 1) Malý úbytek napětí na anodě.
- 2) Malý rozdíl potenciálu na elektrodách.
- 3) Proud v rozmezí deseti až tisíce ampér.
- 4) Velká hustota proudu.
- 5) Ze sloupce oblouku vychází intenzivní světelné UV záření. [2]

4.2 Zapálení oblouku

K zapálení elektrického oblouku dochází při napětí naprázdno, které je vyšší než napětí při stabilním hoření oblouku. Hodnoty zápalného napětí jsou ($U = 60 \div 70 \text{ V}$). Velikost napětí je závislá na materiálu a ionizaci prostředí. Po ustálení oblouku se pro běžné svařovací metody hodnoty napětí nachází v rozmezí $10 \div 50 \text{ V}$ a rozmezí proudu je $10 \div 2000 \text{ A}$. [2]

4.2.1 Krátkodobý dotyk elektrody a základního materiálu

Zapálení elektrického oblouku krátkodobým dotykem elektrody se základním materiálem při nastaveném svařovacím proudu. Po dotyku elektrody je místo dotyku ohřáto na vysokou teplotu pomocí elektrického odporu a zkratového proudu. Tím je zajištěna termo emise primárních elektronů, které v okolí plynného prostředí ionizují. Následuje proudění elektrického proudu v plynu. Oddalováním elektrody od základního materiálu je způsoben rozvoj oblouku, při kterém se zvyšuje odtavování a odpařování částí kovů, které jsou potřebné pro vznik stabilního sloupce oblouku. Zapálení krátkodobým dotykem je využíváno u ručního obloukového svařování, automatického svařování pod tavidlem a u metod MIG a MAG. [2]

4.2.2 Bezdotykové vysokofrekvenční

Při bezdotykovém zapalování je elektrický oblouk zapálen pomocí vysokého napětí s vysokou frekvencí. Zdrojem napětí je vysokofrekvenční ionizátor, který ve vzdálenosti několika milimetrů zapálí elektrickou jiskru, která ionizuje plynné prostředí výbojem. Tím jsou vytvořeny podmínky pro vedení elektrického proudu, rozvíjí se disociace a ionizace ochranného plynu a dochází k zapálení oblouku. Proces bezdotykového vysokofrekvenčního

svařování se využívá pro spoje vysoké metalurgické kvality. Bezdotykový vysokofrekvenční zapalování je využíváno převážně při svařování metodou TIG. [3]

4.2.3 Dotykové zapálení tzv. startovacím proudem

Dotykové zapalování umožňuje současné řízení a kontrolu svařovacích procesů. Nízká intenzita startovacího proudu (max. 10 A) ohřívá hrot wolframové elektrody. Ohřev trvá delší dobu a při oddálení elektrody je zvýšen proud na svařovací hodnotu. Výhodou tohoto zapalování je možnost přesného umístění začátku svaru na svarovém úkosu. Zapálení oblouku startovacím proudem je využíváno u metody TIG. [3]

4.3 Části oblouku

Elektrický oblouk je složen z jádra a obalu. Teplota jádra dosahuje teploty 16 000 K teplota obalu je 7000 K. Teploty jsou závislé na prostředí, ve kterém oblouk hoří. Charakteristickou veličinou oblouku je obloukové napětí U_{OB} . [4]

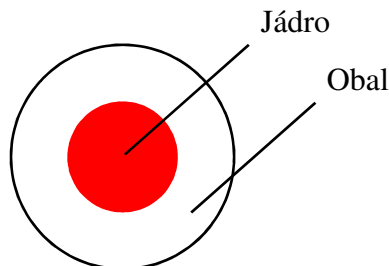
Napětí na elektrodách při hoření elektrického oblouku je v porovnání s ostatními elektrickými výboji nízké. Průběh napětí je rozděleno na tři hlavní části: Anodový úbytek U_A , Katodový úbytek U_K a úbytek ve sloupci oblouku U_S . V oblastech úbytků napětí na katodě a anodě musí být vytvořeno dostatek nositelů nábojů pro přenos elektrického proudu. [5]

Výpočet obloukového napětí. [4]

$$U_{OB} = U_K + U_A + U_S \quad [V] \quad (1)$$

Jádro oblouku je tvořeno ionizovaným plynem (tzv. plazmatem) (Obr. 2). V plazmatu jsou přítomny elektrony a ionty, které působením elektrického pole se pohybují a přenášejí svůj náboj. Z důvodu menší molekulární hmotnosti elektronů a jejich lehčího pohybu, je pomocí elektronů přenášen elektrický proud. V Obalu oblouku (tzv. rekombinační zóně) dochází k neutralizaci iontu. [5]

Obr. 2 Řez elektrickým obloukem [5]



4.3.1 Základní oblasti oblouku

a) Katodová oblast

V těsné blízkosti žhavé katody se nachází přesně ohraničená katodová skvrna (Obr. 3). V katodové skvrně dochází k vyzařování prvotních elektronů z důsledku působení termické emise. Elektronů jsou důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí. V oblasti katodového úbytku napětí elektrony získávají vysokou kinetickou energii, díky které jsou při srážkách schopny ionizovat neutrální atomy na kladné ionty. Katodová skvrna může být stabilní nebo se může pohybovat po povrchu katody v závislosti na vnějších parametrech. Proudová hustota v katodové skvrně dosahuje velmi vysokých hodnot. [2]

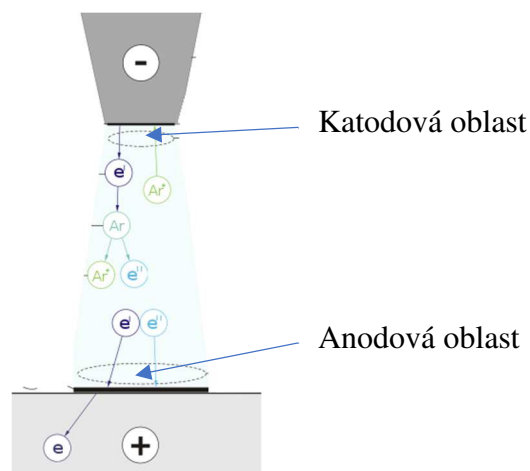
b) Anodová oblast

Kladné ionty, které vznikají u anody se pohybují směrem ke katodě. Na části povrchu anody, na kterém dochází k pohlcování elektronů se nachází anodová skvrna. Anodová skvrna provádí neutralizaci a odvod dopadajících záporných částic. Zároveň dochází k transformaci kinetické energie na tepelnou energii a vzniká elektromagnetické záření. Teplota anodové skvrny dosahuje teploty varu materiálu. [2]

c) Sloupec elektrického oblouku

Sloupec oblouku je zářící oblast mezi elektrodami, která dosahuje vysokých teplot a malého napětí. V sloupci se pohybují odtržené molekuly, volné elektrony a ionty, které vytvářejí plazmat. Teplota plazmatu roste se zvyšujícím se proudem. Plazmat dosahuje rychlostí až $600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Pohyb plazmatu je způsoben elektromagnetickými silami a prudkým vypařováním elektrodoých materiálů. Urychlením plazmatu a par vycházejících z kovového materiálu vznikne zpětný tlak na elektrodu (tzv. reakce). Směr pohybu plazmového toku se určí magnetohydrodynamickým účinkem dvou proti sobě působících plazmových toků (anodový a katodový). Směr pohybu má značný vliv na rozdělení tepla v elektrickém oblouku. [5]

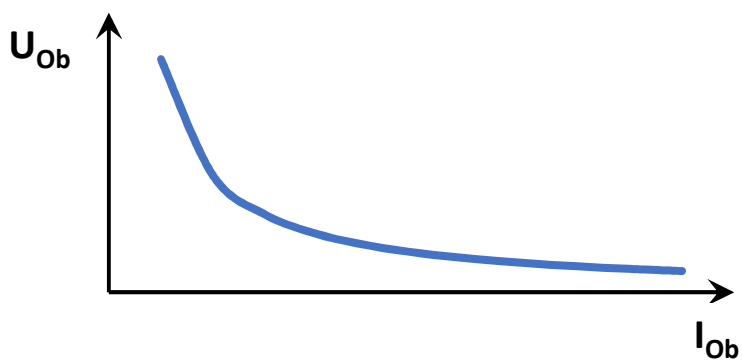
Obr. 3 Schéma elektrického oblouku [6]



4.3.2 Statické vlastnosti elektrického oblouku

Velikost aktivních elektrodových skvrn ovlivňuje hodnota svařovacího proudu. Průřez sloupce oblouku je ovlivněn svařovacím proudem a hustotou proudu. Při zvyšování proudu a zároveň malé proudové hustotě odpor obloukového sloupce klesá, proto dochází k nárůstu stupně ionizace prostředí. Napětí potřebné pro hoření elektrického oblouku klesá s rostoucím proudem. Křivka závislosti hodnot napětí na svařovacím proudem pro konstantní délku oblouku je statická charakteristika elektrického oblouku (Obr. 4). Hodnotu napětí elektrického oblouku ovlivňuje velikost proudu a délka oblouku, dále pak polarita, materiál elektrody a složení atmosféry v okolí oblouku. [5]

Obr. 4 Statická charakteristika elektrického oblouku [4]



4.3.3 Stabilita elektrického oblouku

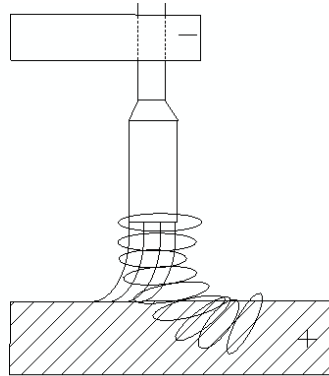
Stabilitu elektrického svařovacího oblouku zaručuje několik faktorů. Elektrický oblouk musí mít stabilní hoření. Během stability dochází k nahodilým poruchám stability elektrického oblouku, které jsou zapříčiněny vzájemnými zkratovými doteky elektrody a svařovaného materiálu. Jedna z poruch stability je také prodloužení elektrického oblouku způsobené oddálením elektrody od materiálu během hoření. [7]

4.3.4 Foukání oblouku

Elektrický oblouk je pružný plynný vodič, na který působí stejné magnetické síly jako na vodič z kovového materiálu, a tak se kolem oblouku vytváří stejné magnetické pole. Vychylování oblouku z osy elektrody do míst s nižší hustotou siločar je způsoben nestejným rozdělením siločar v poli, které jsou v místě přechodu z oblouku do materiálu. Na vychylování oblouku má také značný vliv nerovnoměrné rozdělení proudu ve svaru a rozdílné intenzity u elektromagnetického pole. [2]

Účinek foukání oblouku může zapříčinit ohřev obloukem jiného místa, než kam dopadá roztavený materiál elektrody (Obr. 5). Nastane stav, kdy svar nemá dostatečně hluboký závar a vznikne studený spoj bez metalurgického spojení. [2]

Obr. 5 Foukání oblouku [6]



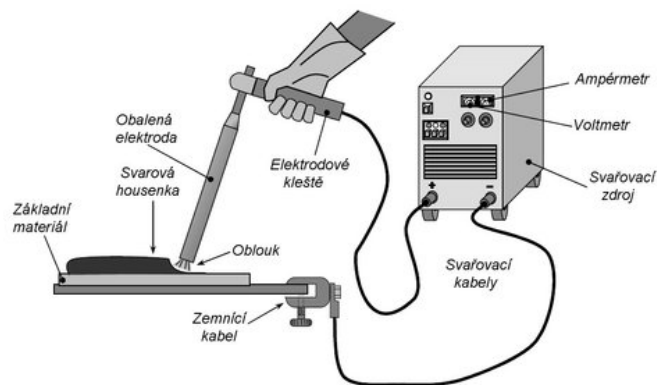
Foukání oblouk se dá předejít změnou sklonu elektrody nebo přemístěním uzemňovací svorky proti směru foukání. Další ochranou před foukání oblouku je provedení hustšího stehování kořenové části, anebo zabránění zmagnetizování svarových ploch. [6]

4.4 Zdroje proudu pro svařování elektrickým obloukem

Zdroj elektrického proudu poskytuje elektrickou energii, která je potřebná pro zapálení a hoření elektrického oblouk. Elektrický proud je dodáván do uzavřeného svařovacího obvodu (Obr. 6). Svařovací zdroj zahrnuje spínací a signalizační komponenty, dále obsahuje měřicí, ovládací přístroje a automatické regulátory pro nastavování svařovacích veličin.

Svařovací zdroje musí zaručit vznik dobrého zapálení oblouku, který musí být stabilní. Jedna z nutných podmínek je schopnost plynulé a jemné regulace svařovacího proudu, případně i napětí v závislosti na zvolené metodě svařování. Zdroj musí mít plynulý výkon s vysokou účinností. Napětí naprázdno musí odpovídat druhu proudu a zvolenému způsobu svařování. Zdroj musí být odolný proti krátkodobému zkratu při přenosu kovu z elektrody na materiál. Dynamická charakteristika musí zabezpečit po zkratu rychlý nárůst svařovacího napětí. Konstrukce zdroje musí zajistit bezpečnost provozu v souladu s normou ČSN EN 60974-1. [2]

Obr. 6 Schéma svařovacího obvodu u Ručního obloukového svařování obalenou elektrodou [8]



Základní rozdělení obloukových svařovacích zdrojů dle normy ČSN EN 60974-1 [9]

- a) Druh svařovacího proudu.
 - Stejnoseměrný proud (Dynamo).
 - Střídavý proud (Transformátor).
 - Usměrněný proud (Měniče, usměrňovače).
- b) Způsob přeměny elektrické energie
 - Zdroj rotační (Svařovací dynamo).
 - Zdroj statický, netočivý.
- c) Podle tvaru statické VA charakteristiky (Obr.10).
 - Strmá s konstantním napětím.
 - Mírně klesající s konstantním výkonem.
 - Plochá s konstantním napětím.

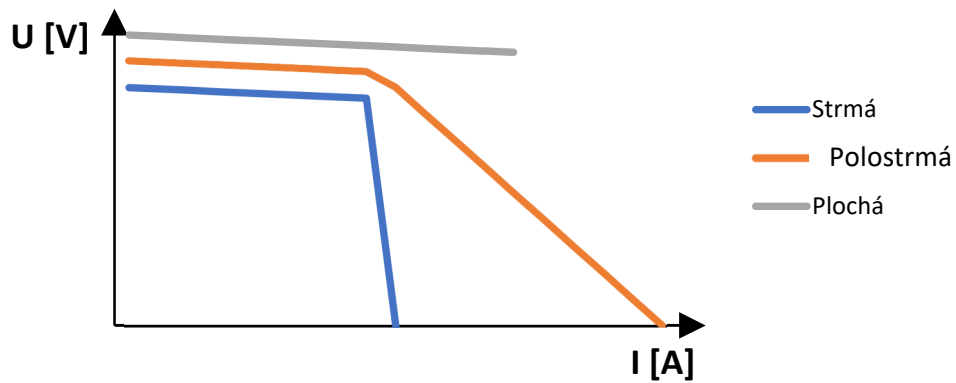
4.4.1 Statická charakteristika svařovacího zdroje

Při zatěžování zdroje vzniká křivka závislosti pracovního napětí zdroje na svařovacím proudu při ustáleném stavu, za podmínky nezměněného nastavení regulačního stupně zdroje. Krajiné body charakteristiky jsou určeny stavem naprázdno a nakrátko. U zdrojů s konstantním napětím (u tzv. tvrdých zdrojů) vznikají s navyšováním proudu pouze malé změny napětí. Zatěžovací charakteristika je plochá a je vhodné ji použít pro mechanizované způsoby svařování.

Zdroje s konstantním proudem (tzv. měkké zdroje) vykazují v závislosti se změnou napětí na oblouku pouze nepatrnou změnu proudu. Zatěžovací charakteristika je strmá a je vhodná pro ruční svařování obalenou elektrodou.

Zdroje s konstantním výkonem mají při rostoucím proudu takový pokles napětí, že výkon je konstantní. Zatěžovací charakteristika je polostrmá (Obr.7). U všech svařovacích zdrojů je možné nastavit každou ze zatěžovacích charakteristik. Nastavování se provádí stupňovitým nebo plynulým přepínáním. [10]

Obr. 7 Statické charakteristiky zdrojů [Autor]



4.4.2 Dynamická charakteristika svařovacího zdroje

Dynamická charakteristika zdroje sděluje schopnost zdroje vyrovnat se s náhlými krátkodobými změnami hodnot napětí. Charakteristika zachycuje časovou závislost proudu a napětí při cyklech: „Naprázdno–Zkrat–Naprázdno“ a „Zatížení – Zkrat – Zatížení „(Obr. 8). Posuzujeme strmost počátečního proudu, která musí být v přesném rozsahu. Tvar dynamické charakteristiky je významný při zapalování oblouku, přenosu svarového kovu obloukem a rozstříku kovu. [10]

Obr. 8 Dynamická charakteristika [10]



5 Svařování elektrickým obloukem

5.1 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou

5.1.1 Popis metody

Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou, někdy nazýváno metoda MMA (Manual Metal Arc welding) je jedna z nejrozšířenějších metod svařování, nicméně je v poslední době snaha tuto metodu nahradit produktivnějšími metodami. Metoda je finančně nenáročná a zastává se její využití především v obtížně mechanizované výrobě, při menších sériích výroby anebo montážních či servisních prací. Velkou výhodou metody je rozsáhlý výběr elektrod.

Elektrický oblouk nastává mezi koncem obalené elektrody a základním materiálem. Na konci elektrody vznikají vlivem vysokých teplot přenosové kapky. Uvolněné plyny z rozpadlých organických látek a uhličitánů z obalu elektrody proudí okolo kovového tavicího se jádra elektrody a napomáhají k oddělování a urychlování kapek. Roztavené kapky kovu z elektrody jsou pomocí oblouku přenášeny do svarové lázně, kde dochází k jejich ochraně pomocí plynů vzniklých z rozkladu obalu. Roztavená struska se dostává na povrch svarové lázně a během tuhnutí ochraňuje svarový kov před atmosférickými plyny. Po ukončení procesu je nutné u každé housenky strusku odstranit. (Obr. 9). [11]

Obr. 9 Tvorba svaru u metody Ruční obloukové svařování [10]



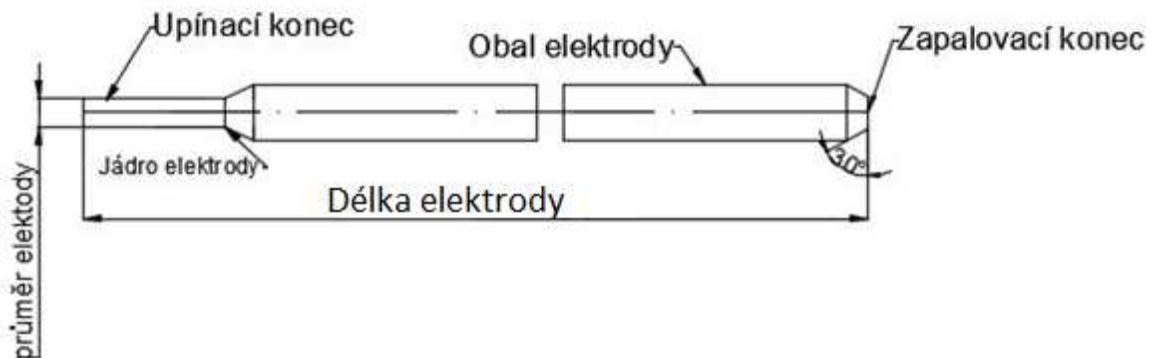
5.1.2 Elektrody

Při ručním svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou je přídavným materiálem obalená elektroda. Elektroda je složena z obalu a jádra (Obr. 10). Obal elektrody obstarává tři základní funkce, metalurgickou, elektrickou a fyzikální. [1]

Metalurgická funkce obalu vytváří v hořícím oblouku plynovou ochranu roztaveného kovu. Ochrana zabraňuje vlivům atmosférickým plynům. Metalurgická funkce obalu zároveň zajišťuje dezoxidaci a rafinaci svarového kovu. K dolegování svarového kovu dochází pomocí prvků (C, Mn, Si, Cr, Mo, Ni, V, Nb). [11]

- 1) Elektrická funkce obalu zabezpečuje vznik stabilního hoření oblouku ionizací vzniklého plynu. Funkce zajišťuje ochranu před atmosférickými plyny pomocí strusky. [11]
- 2) Fyzikální funkce obalu snižuje povrchové napětí svarového kovu pokrytého struskou. Funkce zajišťuje ochranu před atmosférickými plyny pomocí strusky při chladnutí roztaveného kovu. Struska funguje jako tepelná izolace na svarovém kovu, z toho důvodu dochází ke snížení rychlosti ochlazování. [11]

Obr. 10 Řez obalenou elektrodou [Autor]



Svařovací elektrody jsou rozříděny do skupin podle základního materiálu obalu. Pro výběr vhodné elektrody je hlavním požadavkem konečná kvalita svarového kovu. Obal elektrody se vybírá podle potřebných operativních a mechanických požadavků na svarový kov. Jednotlivé typy obalů elektrod lze rozdělit: [1]

- **A – Kyselý obal**

Obsahuje vysoké množství oxidů železa. Elektrody jsou pro svařování stejnosměrným a střídavým proudem. Při aplikaci stejnosměrného proudu se elektrody připojí na záporný pól. Elektrody vydrží vysoké svařovací proudy s přetížením. Svarová lázeň se řídce roztéká. Dochází k hlubokému svarovému průvaru při kterém povrch svaru zůstává plochý, hladký a úhledný s plynulým přechodem do základního materiálu. Strusku lze snadno odstranit. [1]

- **B – Bazický**

Nejrozšířenější druh obalu, ve kterém převládá složení fluoritu a vápence. Elektrody se využívají pro svařování stejnosměrným proudem a zapojují se na kladný pól. Elektrody jsou náchylné na přetížení svařovacím proudem, při vyšších hodnotách svařovacího proudu se rozpalují. Pro svoji správnou funkčnost požadují svařování pomocí krátkého oblouku. Z důvodu hustého tečení svarové lázně lze s elektrodou dobře manipulovat v různých polohách. Kvůli malé hloubce závaru se elektroda využívá převážně na návary. Kresba housenka není úhledná a struska je těžko odstranitelná. Bazický obal dobře absorbuje nežádoucí prvky, tím vzniká houževnatost svarového kovu a odolnost proti vzniku trhlin. [1]

- **C – Celulózový**

Obal je tvořen převážně organickými látkami, především celulózou. Elektrody se využívají při svařování stejnosměrným a střídavým proudem. Svarová lázeň má schopnost rychlého tuhnutí, tím je dáno dobrá manipulace s elektrodou v různých polohách, např. je možné svařovat svisle nahoru. Hloubka závaru je dostatečná. Strusku lze snadno odstranit. Povrch svaru je drsný a houževnatost svarového kovu je nízká. [1]

- **R – Rutilový**

Obal je tvořen převážně rutilem. Elektrody se využívají pro svařování stejnosměrným a střídavým proudem. Svarová lázeň má schopnost hustého tečení a rychlého tuhnutí. Dochází k poměrně malé hloubce závaru. S elektrodou lze svařovat ve všech polohách. Elektrody se používají převážně pro svařování tenkých plechů, stehování, svařování kořenových housenek, přerušovaných svarů apod. Strusku lze snadno odstranit. [1]

Dalšími druhy elektrod jsou kombinace výše popsaných obalů. [2]

- RA – rutil-kyselý
- RB – rutil bazický
- RC – Rutil-celulózový
- RR – Rutilový tlustý

Průměr elektrody je určen technologickým postupem a údajem ve výkresu. Průměr se zvolí podle tloušťky základního materiálu, tvaru a rozměru svaru. Norma ČSN EN 20544 stanovuje délku elektrod závislou na průměru. (Tab. 1). Při svařování do kořene je vhodné zvolit průměr elektrody 2 nebo 2,5 mm. [1]

Tabulka 1 Rozdělení proudu a napětí podle průměrů [1]

Průměr [mm]	Parametry svařování	
	Proud [A]	Napětí [V]
1,6	30-80	20 24
2,0	45-110	20-25
2,5	60-120	21-26
3,2	90-150	22-27
4,0	120-180	21-27
5,0	170-250	22-27
6,0	200-330	22-28

5.1.3 Svařovací parametry a podmínky svařování

Délka oblouku je závislá na typu obalu elektrody a poloze při svařování. Optimální délkou je vzdálenost 1,5násobek průměru elektrody. Krátký oblouk dosahuje délky rovnající se průměru elektrody. Při krátkém oblouku dochází k menšímu rozstříku, nastává slabý propal prvků a zároveň vznikají malé tepelné ztráty. Dosahuje se větší hloubky závaru a vzniká pravidelný povrch svaru. Dlouhý oblouk se pohybuje v délce větší než 1,5násobku průměru elektrody. Vzniká rozsáhlý rozstřík, velký propal prvků a hloubka závaru je malá. Tvar housenky je nepravidelný a housenka je plochá a široká.

Svařovací proud je určen výrobcem u jednotlivých průměrů a druhů obalů elektrod. Mez svařovacího proudu má dolní a horní hranici tzv. minimální a maximální hodnotu proudu. Nejsou-li k dispozici údaje o velikosti svařovacího proudu je nutné pro zjištění proudu použít výpočet. [12]

Proud pro elektrody s rutilovým obalem

$$I = (40 \div 55) \cdot d \quad [A] \quad (2)$$

Proud pro elektrody s bazickým obalem

$$I = (35 \div 50) \cdot d \quad [A] \quad (3)$$

d – průměr jádra elektrody

Napětí na elektrickém oblouku je dáno statickou charakteristikou a svářeč nemusí nastavovat jeho hodnotu. Při ukončení svaru nesmí vzniknout staženina v koncovém kráteru. Svářeč musí po dokončení svaru zatavit a odtavit určité množství kovu, které vyplní kráter. [11]

5.1.4 Příslušenství

Svařovací kabely jsou jednožilové a propojují svařovací zdroj s držákem elektrod nebo se svařovací svěrkou. Průřez jádra kabelu je navržen podle maximální svařovacího proudu, aby nedocházelo ke vzniku úbytku napětí na svařovacích kabelech. Při svařování jsou elektrody uchyceny v držáku elektrod. Držák elektrody musí splňovat základní ergonomické požadavky, musí být lehký, bezpečný a dobře ovladatelný při svařování v různých polohách. Svařovací svěrky přivádějí druhou polaritu od svařovacího zdroje. Nezbytné je pevné uchycení svařovací svěrky na svařovaném materiálu, minimalizuje se tím přechodový odpor. [11]

5.1.5 Průvarové svařování obalenou elektrodou

Metoda průvarového svařování obalenou elektrodou umožňuje bodové spojení tenkých ocelových výrobků k libovolně tlustým materiálům. Přídavným materiálem je v tomto případě obalená elektroda s rutilovým obalem. [11]

Svařovací proces probíhá ve třech fázích. [13]

- 1) Elektroda je nejdříve mechanicky přitlačena ke svařovanému materiálu a po následném zapálení svařovacího oblouku je do materiálu propálena díra. Zároveň je nastaven mechanický posun elektrody pružinou
- 2) Posuvem elektrody dojde k postupnému odtavování a zataví se propálená díra.
- 3) Povrchová část svaru se vytvoří délkou odtavení elektrody, u které je předem nastaveno referenční napětí pro vypnutí svařovacího napětí

Nastavení posuvu elektrody má význačný vliv na hloubku průvaru. Minimální posuv elektrody se využívá při svařování plechu tloušťky 0,6 mm. Maximální délka posuvu je řízena schopností elektrody dostatečným vyplnění vypáleného prostoru.

Jako přídavné zařízení se používá průvarová pistole STIME. Do pistole je upevněna elektroda a po nastavení všech parametrů probíhá svařování bez potřeby ochranných pomůcek proti ozáření elektrickým obloukem. [13]

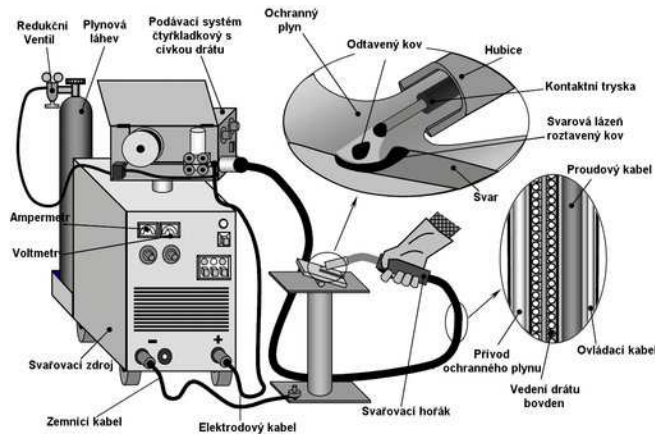
5.2 MIG/MAG

5.2.1 Princip metody

Svařování metodou MIG/MAG funguje na principu hoření oblouku mezi tavící se elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře interního nebo aktivního plynu.

K předání elektrického proudu do drátové elektrody dochází v ústí hořáku pomocí třecího kontaktu. Tím je délka proudového zatížená zkrácena na minimum. Přídavný materiál je dodáván do svarové lázně pomocí posuvných kladek (Obr. 11). Hodnota svařovacího proudu je přímo závislá na podávací rychlosti drátu. Charakteristika přenosu kovu je závislá na parametrech svařování a ochranném plynu. [14]

Obr. 11 Schéma svařovacího obvodu u metody MIG/MAG [15]



5.2.2 Přenosy kovu

Přenos kovu nastává při roztavování přídavného materiálu důsledkem hoření elektrického oblouku. Způsob přenosu kovu ovlivňují proudová hustota zároveň se svařovacím napětím a složením ochranné atmosféry (Obr. 12). Velikost a směr sil působících na odtavovaný kov udávají svařovací parametry. [16]

Krátký oblouk se zkratovým přenosem

Při přenosu se z elektrody odtavují kapky kovu, které vyplňují mezeru mezi elektrodou a svarovou lázní. Tím nastává zhasínání oblouku a elektrický zkrat. Elektrickým zkratem je zvýšena teplota, která zapříčiňuje odpadávaní kapek do svarové lázně. Při dopadu je oblouk obnoven. S rostoucí hodnotou svařovacího napětí se snižuje frekvence odtavujících se kapek z elektrody. Zároveň je zvětšován rozměr kapek a jejich rozstřík. Při tomto přenosu má svařovací proud hodnotu 60–180 A. Z důvodu malého proudu je do sváru dopraveno malé množství tepla a svarový kov není příliš tekutý a rychle dochází k tuhnutí. Tento způsob je nejvíce využíván při svařování v obtížných polohách např. nad hlavou a při svařování tenkých plechů. [17]

Přechodový oblouk s kapkovým přenosem

Při přechodovém oblouku s kapkovým přenosem jsou nutné vysoké svařovací hodnoty pro kapkový přenos. Hodnota svařovacího proudu je v rozmezí 190–300 A, napětí 22–28 V. Konec elektrody se nataví do velké kapky, která bývá větší než průměr elektrody. [17]

Sprchový oblouk

Sprchový přenos kovu vznikne při nastavení svařovacího proudu v rozmezí 200–500 A, svařovací napětí se pohybuje v hodnotách od 28–40 V. Při vysokých hodnotách proudu se nestačí tvořit větší kapky, ale pouze menší, které s vysokou frekvencí tvoří sprchu. Velké předností je nízký rozstřík. Přenos se využívá při svařování vodorovně shora a ve vynucených polohách. [17]

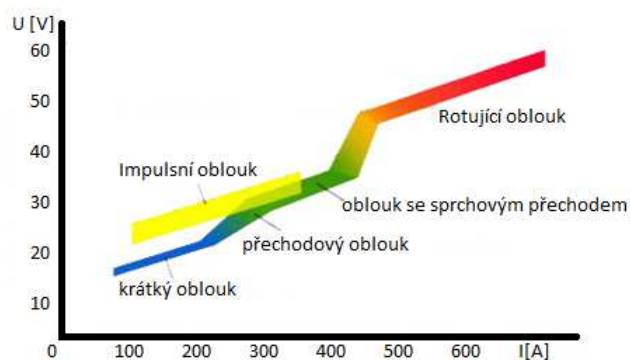
Impulsní sprchový přenos

Impulsní přenos se využívá pro snížení rozstříku a vad ve svarech. Svařovací proud je řízen v závislosti na čase pomocí mikroprocesoru. Základní svařovací proud se zachovává na takové hodnotě, při které vzájemně dochází k ionizaci plynu a vedení elektrického proudu. V nastavených intervalech je zvedán svařovací proud a napěťové pulsy. U tohoto typu přenosu dochází k vysokému výkonu odtavení. [17]

Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem

Drát je při průchodu vysokého proudu je odporem zahříván na teplotu tavení. Silné magnetické pole roztáčí plastický konec tavící se elektrody. Kapky vytvářejí při rotačním přenosu kuželovou plochu. Tímto přenosem je dosahováno hlubokého a širokého závaru. [17]

Obr. 12 Charakteristiky přenosu kovu [17]



5.2.3 Přídavný materiál

Při svařování tavící se elektrodou se jako přídavný materiál využívá plný a plněný drát. Dráty jsou navinuty na plastových cívkách. Průměrná hmotnost cívky se pohybuje okolo 15 kg, ale je možné najít cívky o hmotnosti od 5 do 200 kg. Ty nejtěžší 200 kg se používají pro svařování robotem. Nejvyužívanější průměrem plného drátu je 0,8 a 1,6 mm. V poslední době jsou také velice oblíbené plněné dráty. Pláště plněných drátů jsou převážně z nízkouhlíkových ocelí. Náplň drátu může být bazická, kyselá, rutilová a fluoridová. Výhodou plněných drátů je bezpečné natavení svarových ploch se snížením rizika tvorby studených spojů. Drát zároveň disponuje velice dobrou smáčivostí povrchu a výsledný povrch je hladký. Tavidlo ochraňuje svarovou lázeň jako ochranný plyn. V některých případech vzniká při svařování vlastní ochranná atmosféra a není nutné mít při svařování ochranný plyn. [14]

5.2.4 Ochranné plyny

MAG – Metal Active Gas – ochranný plyn je aktivní.

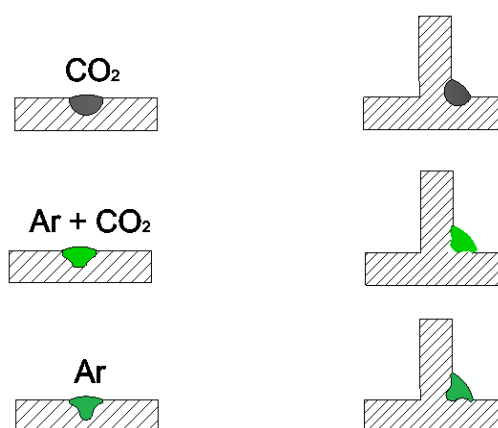
MIG – Metal Inert Gas – ochranný plyn je inertní. [15]

Ochranný plyn mají za úkol znepřístupnit vstup okolní atmosféry ke svarové lázni. Výskyt vzduchu vyvolává oxidací a nitridací svarového kovu a markantně zhoršují mechanické vlastnosti svarového spoje. Ochranný plyn díky své ionizaci umožňuje stabilní hoření elektrického oblouku a podílí se na přenosu tepelné energie do svaru. Ochranné plyny svým složením a množstvím ochranného plynu ovlivňují přenos svarového kovu, hloubku závaru a profil kovu (Obr. 13). Plyn také má vliv na rychlost svařování a stabilitu oblouku.

Interní plyn nezasahuje do chemické reakce konající se ve svarové lázni. Nejpoužívanějšími interními plyny jsou Argon a Helium případně jejich směsi. Interní plyny se nejvíce využívají pro svařování kovů ve 100 % čistotě, a to především Mg, Ni, Cu, Ti a slitin Al.

Aktivní plyn zajišťuje ochranu před vstupem vzduchu do svarové lázně a zároveň koná chemickou reakci v lázni. Aktivními plyny jsou CO₂ a směsné plyny. Směsi plynů jsou vždy v závislosti s Argonem a mohou být dvousložkové, tříložkové nebo čtyř složkové. CO₂ a směsné plyny se využívají pro svařování nelegovaný a nízkolegovaných ocelí. Ochranné plyny jsou skladovány v tlakových láhvích, které jsou označeny barevným pruhem podle druhu plynu. Láhve jsou naplněny přetlakem 300 bar. Průtok plynu se reguluje redukčním ventilem s indikátorem průtoku v závislosti na svařovacích parametrech, prostředí nebo průměru drátu. [2]

Obr. 13 Vliv ochranného plynu na tvar a závar svarové housenky [14]



Oxid uhličitý CO₂

Oxid uhličitý je nehořlavý, bezbarvý plyn disponující vysokou tepelnou vodivostí s vysokým přenosem tepla do svarové lázně. Plyn je 1,5x těžší než vzduch. Přenosem získaného tepla od exotermické reakce je zabezpečeno velmi dobré natavování svarových hran zajištění hlubokého průvaru s oválným profilem svarové housenky a kvalitní odplynění svarové lázně. Ideální pracovní oblast CO₂ je podstatně užší než u směsných plynů. Plyn vyvolává vysoké povrchové napětí na roztaveném konci elektrody, které udržuje kapky na elektrodě. Kapky se následně oddělují ve větším objemu a po natavení na materiál způsobují pracně odstranitelný rozstřík. [18]

Kyslík O₂

Kyslík je nehořlavý plyn, který podporuje oxidační hoření. Plyn se používá jako přísada ve směsných plynech. Zřetelně zvyšuje tekutost svarové lázně a povrchové napětí roztaveného kovu. Tyto dvě vlastnosti jsou nejvýznamnější důvodem jeho přidání do ochranného směsného plynu. Kyslík zkvalitňuje odplynění svarové lázně, profil svarové housenky a přechody svarového kovu do materiálu. [18]

Argon Ar

Argon má malou tepelnou vodivost a malý ionizační potenciál. Vlastnosti plynu zaručují malý přechod tepla z oblouku do okolních zón. Oblouk je formován do úzkého sloupce, který postupně zhotovuje hluboký závar a relativně úzký profil svaru. Argon má nepatrnou náchylnost pro vytváření zápalů nebo nedostatečné kresby svaru vyvolané nedostatkem tepla na vnějších okrajích svarové lázně. U svařování tavící se elektrodou argon podporuje sprchový přenos přídavného materiálu. [18]

Helium He

Helium se využívá hlavně pro svařování netavící se elektrodou. V porovnání s argonem má helium vysokou tepelnou vodivost a ionizační potenciál, který poskytuje obrácené účinky na svar a svařovací oblouk. Helium umožňuje široký profil závaru, kvalitní smáčivost na okrajích housenky a přináší do svarové lázně vyšší teplotu. Může vzniknout horší zapálení oblouku z důvodu vysokého ionizačního potenciálu. Tento problém se netýká vysokofrekvenčního a kapacitního zapalování u metody TIG. [19]

Druhy směsných plynů [18]

Dvou složkové – Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + He

Třísložkové – Ar + CO₂ + O₂

Čtyř složkové – Ar + He + CO₂ + O₂

5.2.5 Parametry a podmínky svařování

Napětí na oblouku znázorňuje potenciální rozdíl mezi drátem elektrody a povrchem svarové lázně. Napětí výrazně ovlivňuje šířku svarové housenky a je nastavováno na svařovacím zdroji. Při svařování čistým CO₂ je nutné napětí zvýšit oproti svařování se směsnými plyny. Napětí na oblouku má významný vliv pro dosažení ideálních podmínek samoregulace a ustáleného pracovního bodu. Napětí působí na tvar a rozměr oblouku. Při vysokém napětí se zvyšuje délka oblouku a propal prvků. U svarů dochází k pórovitosti a je zesílen rozstřík. Svarová lázeň je široká a mělká. Nízké napětí vznikne při nestabilním procesu a má za následek úzké housenky s velkým převýšením. Nízké napětí nastane při vysoké rychlosti svařování.

Svařovací proud ovlivňuje tvar průřezu svarové housenky. Se zvyšujícím se proudem roste velikost svarové lázně, tekutost a odtavování elektrod. Při stálém napětí na oblouku a růstu proudu výrazně roste hloubka závaru s poměrně malým rozrůstáním šířky housenky. Nastavením svařovacího proudu je výrazně ovlivněn přenos kovu v oblouku. S růstem proudu nabývá frekvence kapek. Síly působící na kapku jsou ovlivňovány intenzitou proudu. Z hlediska jakosti svaru je vhodné používat malý průměr drátu, z důvodu vzniku většího počtu drobných kapek a dobré kvality housenky. [20]

5.2.6 Příslušenství

Při svařování metodou MIG/MAG se využívají svařovací zdroje s plochou statickou charakteristikou. Stejnoseměrný proud se používá pro svařování ocelí. V případě svařování slitin hliníku se používá zdroj se střídavým proudem. Mechanizované poddávání drátu zajišťuje kladkový mechanismus. Kladky mohou být dvě, čtyři anebo jen jedna. Multifunkční kabel zajišťuje přívod drátu a ochranného plynu. Svařovací hořák zabezpečuje přísun drátu do místa svařování. V hořáku také dochází k napájení drátu elektrickým proudem a laminárnímu proudění ochranného plynu okolo drátu. [21]

5.2.7 CMT

Svařovací proces CMT (Cold metal transfer) byl vyvinut pro možnost spojení oceli a hliníku společností Fronius. Funguje na principu metody MIG/MAG s velmi malým přísunem tepla. Odloučené kapky od elektrody využívají střídavého pohybu drátu, dopředu a zpět. Při posuvu drátu dopředu dochází ke vzniku zkratu se základním materiálem a ke vzestupu proudu. Zvýšený proud zapříčiní přerušení zkratu a znovu zapálí oblouk. Posuv drátu je řízen dobou, než nastane zkrat, poté je směr posuvu otočen a drát se zatahuje zpět. Hned poté co dochází k přerušení zkratu se směr posuvu znovu obrátí a celý proces je znova zahájen (Obr. 14). Další důležitý aspekt u metody CMT, je že se přenos materiálu koná skoro bez proudu. Přerušení zkratu vznikne zatažením drátu zpět, a ne působením proudu jako to bývá u jiných procesů. Pohyb drátu se podílí na uvolnění kapky s povrchovým napětím tavné lázně. Ve výsledku toho uvolnění je možné udržovat proud ve stadiu zkratu na velmi malé úrovni, tím je sníženo tepelné zatížení spoje. Efektem těchto zkratových procesů je bez rozstříkový svarový, nebo pájený spoj. U metody CMT je velmi snadné regulovat délku oblouku. K nastavení délky oblouku dochází automaticky. Oblouk zůstává stabilní bez závislosti na povrchu materiálu. Celý svařovací proces u metody CMT je automatizovaný. [22]

Obr. 14 přenos kovu metoda CMT [23]

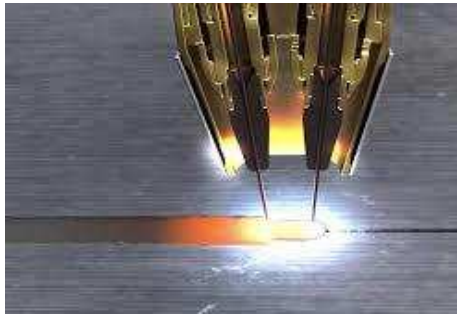


5.2.8 Tandemové svařování

Při tandemovém svařování probíhá hoření dvou elektricky nezávislých oblouků (Obr. 15) v jedné tavné lázni. První drát zaručuje dostatečně hluboký průvar, druhý drát zabezpečuje rychlé vyplnění svarové mezery přídavným materiálem a tím je prodloužena doba krystalizace. Delší doba tuhnutí zajišťuje dokonalé odplynění a omezuje vznik trhlin. Je možné nastavit odlišné svařovací parametry pro oba dva procesy. Při tandemovém svařování dochází k vysokému výkonu odtavení a tím je umožněna maximální svařovací rychlost. Proces je vyznačován snížením poklesem vnesené energie a dostatečnou přemostitelností, tímto je dosaženo menší deformaci dílů. Svařovací robot je vybaven senzorem, který zajišťuje dobrou kvalitu svaru. [23]

Tandemové svařování je využíváno při svařování hliníku vysokými rychlostmi, při svařování jeřábů a stavebních konstrukcí. Celkový proud, který napájí oba dráty má až 900 A. [11]

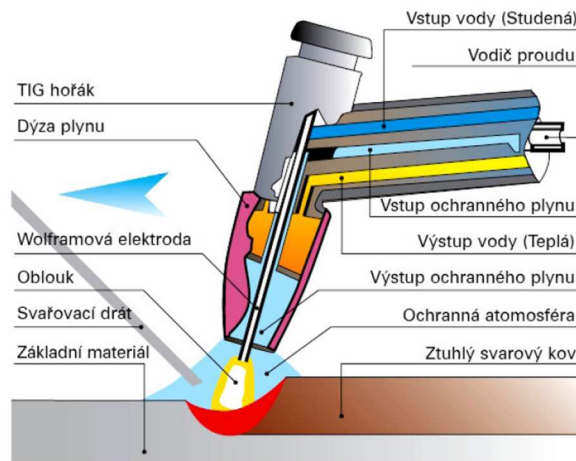
Obr. 15 Tandemový hořák [11]



5.3 TIG

Svařování metodou TIG (Tungsten, Insert, Gas) funguje na principu hoření oblouku mezi netavící se elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře interního plynu. Svařování materiálu probíhá pomocí přídavného materiálu v podobě drátu. Drát lze do svarové lázně přidávat ručně anebo pomocí automatického podavače (Obr. 16). Svařování metodou TIG je rozděleno podle proudů. Svařování střídavým proudem se používá pro slitiny Al a Mg. Svařování stejnosměrným proudem se využívá pro vysokolegované oceli, Cu, Ni, Ti. Elektroda je zhotovena z wolframu a dalších legujících prvků. Ochranným interním plynem je argon, helium, případně jejich směsi. [24]

Obr. 16 Hořák TIG [26]



5.3.1 Elektroda

Netavící se elektroda je tyčka kruhové průřezu. Zabezpečující přívod elektrického proudu a zároveň koncertuje a směřuje sloupec elektrického oblouku na místo svařování. Elektroda je vyráběna z čistého wolframu nebo wolframu, který je legován oxidy ThO_2 , ZrO_2 , LaO_2 a CeO_2 . Teplota tavení wolframové elektrody je $3410\text{ }^\circ\text{C}$. U elektrody, která je legována oxidy se zvyšuje proudová a tepelná zatížitelnost. Výběr typu elektrody je závislý na zvoleném svařovacím proudu, oblasti využití a požadavcích jakosti svarového spoje. [25]

Rozdělení elektrod

WP – Nelegovaná wolframová elektroda má malou žhavicí teplotu $3400\text{ }^\circ\text{C}$ používá se pro svařování slitin Al a Mg.

WT – Elektroda legovaná oxidem ThO_2 byla využívána převážně pro svařování vysokolegovaných ocelí, Cu, Ti. Svařování probíhalo stejnosměrným proudem. Dnes jsou elektrody zakázané z důvodu radioaktivních vlastností thoria.

WZ – Elektroda legovaná oxidem ZrO_2 je používána při svařování střídavým proudem lehkých kovů. Elektroda je odolná proti opotřebení, má dobré zapalovací vlastnosti. Žhavicí teplota elektrody je $3800\text{ }^\circ\text{C}$.

WC – Elektroda legovaná oxidem CeO_2 je používána pro svařování stejnosměrným proudem nízké intenzity.

WL – Elektroda legovaná oxidem LaO_2 má stejné vlastnosti jako elektroda legována ThO_2 . Elektrodu je možné navíc využít při svařování střídavým proudem. Elektroda má dlouhou životnost a žhavicí teplota je $4200\text{ }^\circ\text{C}$. [3]

Zvolením správné elektrody (Tab.2) lze ovlivnit vlastnosti elektrického oblouku a geometrii svaru. Velmi důležitá je také geometrie hrotu elektrody, ta ovlivňuje zásadní průběh svařování a kvalitu svaru. Správnou geometrií se zabrání proudovému přetížení hrotu, odtavování hrotu a wolframovým vměstkům ve svarovém kovu. [3]

Tabulka 2 – Rozdělení elektrod v závislosti na proudu [2]

Průměr elektrody [mm]	Stejnoseměrný proud [A]				Střídavý proud [A]	
	Elektroda záporná (-)		Elektroda kladná (+)		WP	WT, WL
	WP	WT, WL	WP	WT, WL		
0,5	2–20	2–20	-	-	2–15	2–15
1,0	10–75	10–75	-	-	15–55	15–70
1,6	40–130	60–150	10–20	10–20	45–90	60–125
2,0	75–180	100–200	15–25	15–25	65–125	85–160
2,5	130–230	170–250	17–30	17–30	80–140	120–210
3,2	160–310	225–330	20–35	20–35	150–190	150–250
4,0	275–450	350–480	35–50	35–50	180–260	240–350
5,0	400–625	500–675	50–70	50–70	240–350	350–460

5.3.2 Přídavný materiál

Přídavný materiál se využívá v podobě tyček pro ruční svařování. V případě mechanizovaného a robotizovaného svařování je používán drát navinutý na cívkách. Svařovací tyčky jsou vyráběny v průměrech od 1–8 mm a délce 600–1000 mm. Průměry svařovacích drátů jsou 0,6 – 2,4 mm. Přídavný materiál musí doplnit objem svarového kovu a zhotovit svar požadovaného tvaru a průřezu. Přídavný materiál leguje svarový kov přísadami, které zkvalitňují vlastnosti svaru. Dodání přísad do svarového kovu zajišťuje dezoxidaci, odplynění a kladně působí na metalurgický děj ve svarovém kovu. [2]

5.3.3 Svařovací proudy

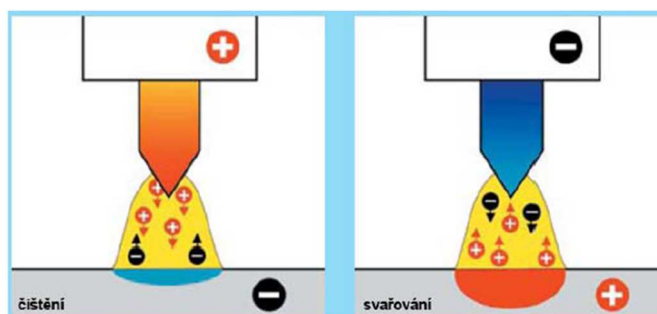
Stejnoseměrný proud

Svařování stejnosměrným proudem je primární způsob pro zapojení při svařování netavící se elektrodou. Elektroda je zapojena k zápornému pólu zdroje a svařovaný materiál je připojený na kladný pól. Rozvržení tepla je nerovnoměrné. Zhruba 1/3 tepla působí na elektrodu a 2/3 celkového tepla jsou přenášeny do základního materiálu. Z důvodu nerovnoměrného rozdělení tepla není elektroda tepelně přetížena a svarová lázeň má dostatečnou hloubku závaru. Hloubku závaru ovlivňuje i dopad elektronů, které svojí kinetickou energii transformují na tepelnou. Svařování stejnosměrným proudem s přímou polaritou je využíváno pro spojení všech typů ocelí, Cu, Ni, Ti. Zapojení přímou polaritou lze použít i pro svařování hliníku v ochranné atmosféře směsi argonu a 75 % helia. Při svařování hliníku je z důvodu vysoké vodivosti helia předáno velké množství tepla do svarové lázně, které umožňuje roztavit povrchové oxidy. Oxidy se působením povrchových sil se odsunují na povrch taveniny a střed lázně zůstává čistý. [26]

Střídavý proud

Svařování střídavým proudem je využíváno kvůli jeho čistícím účinkům, které nastanou na slitinách Al, Mg při kladné polaritě elektrod. Na hliníku se nachází vrstva oxidu hlinitého, která má za úkol chránit hliník proti oxidaci. Vrstva oxidu hlinitého má teplotu tavení 2050 °C a při zapojení stejnosměrného proudu je v argonu zabráněno metalurgickému spojení. Čistící účinek vznikne při připojení elektrody na kladný pól zdroje (Obr. 17). Na základním materiálu je vytvořena nestabilní katodová skvrna, která se pohybuje na místa pokrytá oxidy. Místa pokrytá oxidy mají malou emisní energii pro vznik emise elektronů. Oxidy, které jsou zasaženy katodovou skvrnou se snadněji odpařují. Druhá fáze čistícího účinku se projeví při rozkladu argonu na kladné ionty a elektrony. Argonové ionty o poměrně vysoké hmotnosti jsou urychlovány směrem k tavné lázni, kde působí na oxidy mechanickými účinky. Dynamickým účinkem střídavého proudu nastává odsun vrstvy oxidu k okrajům svarové lázně. Při připojení kladného pólu vznikne pouze malý závar. Hlubokého závaru se dosáhne po zapojení elektrody k zápornému pólu zdroje. Tím do tavné lázně dopadají urychlené elektrony. [26]

Obr. 17 Způsob využití střídavého proudu [26]



Impulsní proud

U impulsního svařování se intenzita proudu střídá mezi dvěma proudovými hladinami v závislosti na čase. Hranice hladin určují základní proud I_z a impulsní proud I_p . Podle charakteristiky zdroje je tvar průběhu impulsů. Z důsledku zvolení svařování impulsním proudem je možné dosáhnout přesné regulace ve svařovacím režimu a tím řídit rozdělení vneseného tepla do svaru a tvarování svarové lázně. [26]

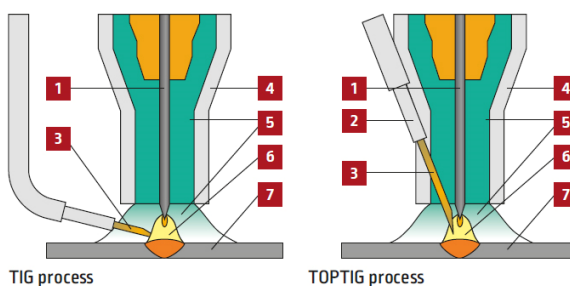
5.3.4 TOPTIG

Hlavní předností svařování metodou TIG je vysoká kvalita svarů, naproti tomu má svařovací proces nízkou rychlost a malý průvar. Tyto dva nedostatky vyřeší metoda TOPTIG. Metoda TOPTIG byla vyvinuta s cílem spojit kvalitu svařování metodou TIG s výkonnou a efektivní svařovací metodou MIG. TOPTIG se využívá převážně pro robotizované a automatizované svařování. Hlavním prvkem metody TOPTIG je konstrukční řešení svařovacího hořáku. Drát je přiváděn přímo do oblouku, kde je nejvyšší teplota a nastává zde přímé odkapávání přídavného materiálu (Obr. 18). V důsledku tohoto řešení není proces svařování vázaný s orientací hořáku vůči směru svařování. [27]

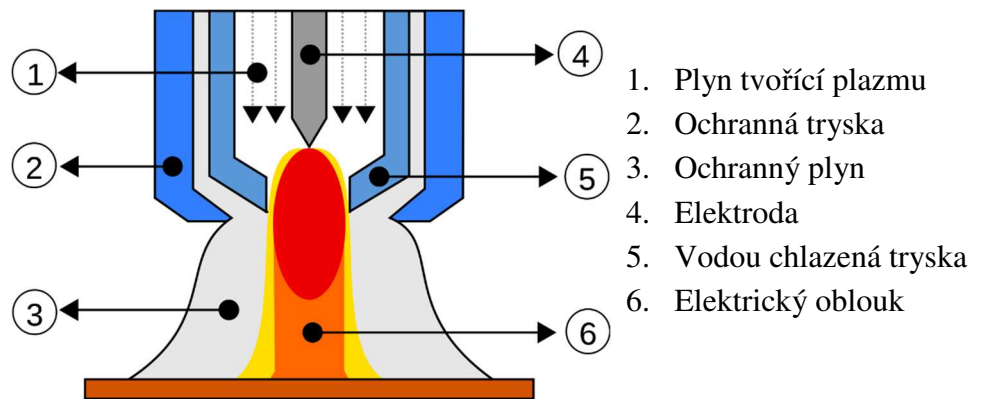
Velké výhody při svařování metodou TOPTIG :

- Rychlá pracovní rychlost při svařování
- Sváry jsou vysoké kvality bez vzniku rozstříku
- Ekonomicky optimální metoda
- Schopnost svařovat ve všech polohách [27]

Obr. 18 Porovnání hořáku metody TIG a TOPTIG [26]



Obr. 20 Schéma hořáku u metody PAW [30]



5.4.1 Typy plazmových oblouků

Pro metodu svařování plazmou se využívají hořáky s elektrickým obloukem napájené stejnosměrným proudem. [30]

Hořák s nepřeneseným obloukem

Při hoření plazmového oblouku je elektrický obvod uzavřen. Elektrický oblouk vznikne uvnitř hořáku mezi elektrodou a anodou, která je tvořena měděnou dýzou. Anoda zužuje elektrický oblouk. V důsledku zúžení oblouku dochází k nárůstu hustoty elektrického pole v dýze a tím vznikne ohřátí plazmového plynu. U tohoto typu hořáku odchází z hořáku pouze horký plazmový paprsek. Tento hořák se používá při nanášení ochranných povlaků. [30]

Hořák s přeneseným obloukem

Svařovaný materiál je anodou. K zapálení oblouku dochází pomocí vysokonapěťové jiskry, která vznikne mezi elektrodou a měděnou dýzou v hubici hořáku. V kanálu dýzy vzniká ionizace plazmového plynu. Proud plazmy odcházející z dýzy a je pomocným obloukem ionizován. Při přisunutí hořáku k svařovanému materiálu vznikne zapálení hlavního plazmového oblouku, který hoří mezi wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem. [30]

Hořák s kombinovaným zapojením

Je převážně využíván k nánosu prášků na povrch materiálu. Práškový materiál může být kovový a nekovový. Prášek se využívá jako ochrana před chemickým, mechanickým a tepelným namáháním. Prášek je nataven pomocí nepřeneseného oblouku a následně přeneseným obloukem roztaven a spojen se základním materiálem. [30]

5.4.2 Plyny

Plazmový plyn – proudíc okolo wolframové elektrody. Nejčastěji bývá využíván argon, kvůli mále ionizační energii

Ochranný plyn – je zvolen podle základního materiálu. Zpravidla se používá směs argon/vodík.

Fokusační plyn – proudí v odděleném okruhu mezi plazmovým a ochranným plynem. Plyn zostřuje paprsek plazmy po jeho vystoupení z trysky hořáku. Používá se argon nebo dusík. [30]

5.4.3 Parametry svařování

Tabulka 3 – parametry svařování [29]

Metoda svařování	Proud [A]	Tloušťka materiálu [mm]
Mikro plazmové	0,1-20	0,1-1
Středně plazmové	0,1-20	0,1-1
Klíčovou dírkou	>100	3,5-100

Svařovací proud

Svařovací proud působí na vlastnosti svaru pomocí výstupního tlaku plazmy a teploty. Zvýšený proud způsobuje rozšíření svaru na povrchu i v kořenu. V případě příliš velkého svařovacího proudu dochází k penetraci svarové lázně. [30]

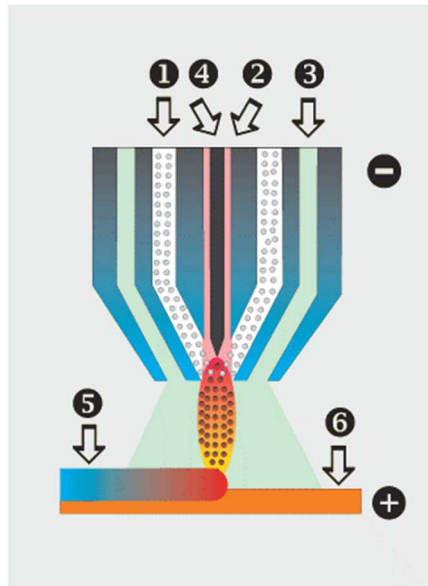
Rychlost toku plazmového plynu

Rychlost závisí na kinetické energii. S rostoucí tloušťkou materiálu se musí být zvýšena rychlost plazmového toku plynu. [30]

5.4.4 PTA

Plazmové navařování patří mezi nejmodernější technologie navařování. V průběhu navařování vzniká proud vysoce koncertované plasmy o vysoké teplotě z důsledku elektrického oblouku, který je mezi wolframovou elektrodou a navařovaným materiálem. Do proudu plasmy je přidáván materiál ve formě prášku, který tvoří návar. Zásluhou působení plasmy je oblast tavení úzká a dochází k minimalizaci tepelného ovlivnění základního materiálu. Mezi základním materiálem a návarem vzniká velice tenká přechodová vrstva cca 1-2 mm. Při použití polohovacího zařízení lze vytvořit rovnoměrné vrstvy návaru a snížit náklady na obrábění. Nevýhodou navařování je cena přídavného materiálu. Cena je nejvyšší v porovnání s elektrodou nebo drátem. [30]

Obr. 21 PTA schéma hořáku [30]

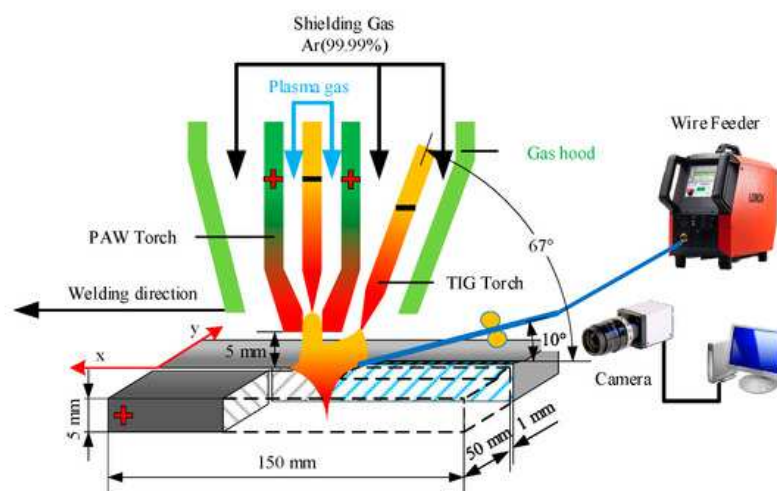


1. Přídavný materiál – prášek
2. Plasmový plyn – argon
3. Ochranný plyn – dusík
4. Wolframová elektroda
5. Návar
6. Podklad

5.4.5 PAW – TIG

Kombinované svařování Plazma – TIG (Obr.22) bylo navrženo pro zvýšení účinnosti a kvality využitím plně výhody svařovacích procesů plazmy a TIG. K sloučení oblouků dochází v závislosti Lorentzovy síly. Hořák TIG je umístěn na opačné straně svaru, aby vedl plazmový oblouk do klíčové dírky. Čímž je zajištěno přímé proudění proudu z plazmového hořáku přes svar do hořáku TIG. Místo klasické konvenční smyčky svařovacího proudu. Hybridní metoda svařování byla úspěšně implementována do výroby lodí a vesmírného průmyslu. [32]

Obr. 22 Hybridní hořák Plasma – TIG [32]

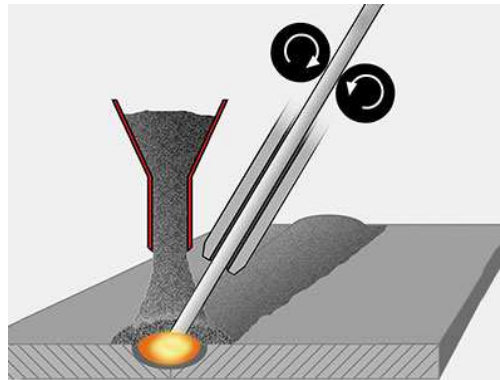


Svařování automatem pod tavidlem

Popis metody

Metoda svařování pod tavidlem, někdy nazývána SAW (Submerged arc welding), funguje na principu, kdy elektrický oblouk hoří mezi tavící se elektrodou a základním materiálem pod práškovým tavidlem (Obr. 23). Elektroda je v podobě drátu navinutá na cívce. Přísun drátu je mechanizovaný pomocí elektromotoru a kladek. Ochranu svarové lázně před oxidací zajišťuje práškové tavidlo. Svarová lázeň je po celou dobu svařování zasypávána vrstvou tavidla. Pod vrstvou tavidla hoří i elektrický oblouk. Elektrický oblouk není možné z důvodu jeho zakrytí tavidlem spatřit. Tímto jsou minimalizovány emise škodlivých dýmů a plynů. V dnešní době lze svařovat skoro ve všech polohách jen je nutné dodržet podmínku udržení stálé vrstvy tavidla. Metoda patří mezi nejvíce produktivní a s největší kvalitou sváru. [31]

Obr. 23 Svařování pod tavidlem [32]



5.4.6 Svařovací zařízení

Svařování pod tavidlem je prováděno zcela automatizovaně. Hořák je umístěný na elektricky poháněném vozíku tzv. Svařovacím traktoru (Obr. 24). Svařovací traktor zahrnuje cívku s drátem a podavačem, násypku na tavidlo a vysavač přebytečného tavidla. Traktor se může pohybovat po kolejnicích nebo přímo po svařovaném materiálu. Další variantou automatizovaného svařování je pomocí stacionární svařovací hlavy, pod kterou musí být posouván svařенец. Svařovací hlava může také být umístěna na ramenu schopného lineárního pohybu. Hořák má vždy nad svařencem stejnou výšku a pohybuje se vždy konstantní rychlostí bez ohledu na zvoleném svařovacím zařízení. [31]



5.4.7 Svařovací parametry

Stabilizaci oblouku je možné zajistit plochou statickou charakteristikou zdroje. Tím je drát do lázně podáván stejnou rychlostí. Dochází-li ke zkrácení oblouku, zdroj reguluje zvýšením proudu, tímto nastává rychlé uhoření drátu a oblouk je znovu prodloužen. Při přílišném prodloužení oblouku je proud snížen, dochází tak k pomalejšímu hoření drátu a zkrácení oblouku. Další možností pro stabilizaci oblouku je volba zdroje se strmou statickou charakteristikou a současném použití rychlé regulace rychlosti drátu. Hodnota dodávané proudu je skoro konstantní a tím zdroj ztrácí samoregulační schopnost. Vše je závislé na regulaci rychlosti podávaného drátu v závislosti na aktuální naměřené hodnotě napětí oblouku. Dochází-li ke klesání napětí, je nutné drát dodávat pomaleji a naopak.

Při zapalování oblouku dochází k posuvu drátu vpřed, dokud nenastane dotyk drátu se základním materiálem. Po dotyk dochází ke změně směru otáčení a drát je rychle zatáhnut zpět. Tímto dochází k zapálení a vytažení elektrického oblouku. Tento pohyb musí být včas vyhodnocen a je nutné znovu změnit smysl otáčení kladek, aby docházelo k opětovanému posuvu drátu do svarové lázně. Při svařování pod tavidlem lze zvolit mezi použitím střídavého nebo stejnosměrného proudu. V současné době je využíván převážně stejnosměrný proud, který lze efektivněji regulovat. [31]

5.4.8 Přídavné materiály a tavidla

Jako přídavný materiál je používán drát stejného složení, jako při svařování MIG/MAG. Průměry drátu se pohybují v rozmezí 3,2-8 mm. Pevně se používají plné dráty, ale je možné použít i dráty trubičkové. Při navařování velkých ploch je možné použít kromě drátu i kovový pásek.

Práškové tavidlo se za vlivu vysokých teplot taví a následně tuhne. Ochranný struskový kryt je vytvořen tuhým tavidlem, který ochraňuje tavenou lázeň a tuhnoucí svarový kov. Vyplavené nečistoty jsou vázány na tavidlo, které zároveň doleguje svarový kov a má kladný vliv na formování svaru. Z roztaveného tavidla jsou uvolňovány plyny, které tvoří ochrannou atmosféru. Oblouk hoří v dutině vytvořené plynem, a ne přímo

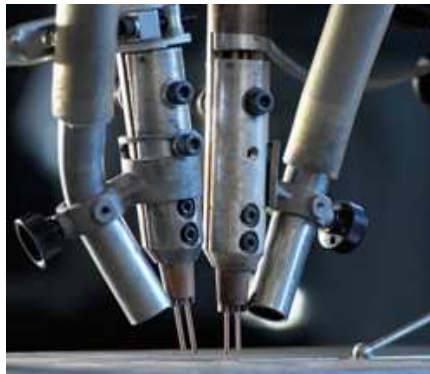
v tavidle. Neroztavená část tavidla je odsátá pro další použití. Tavidla jsou rozdělena podle druhu výroby na tavená, keramická, sintrovaná a aglomerovaná. [31]

5.4.9 Dvojdrátové a tandemové svařování pod tavidlem

Při dvojdrátovém svařování jsou v hořáku umístěny dva paralelní dráty, které jsou napájeny z jednoho svařovacího zdroje (Obr. 25). Používá se stejnosměrný svařovací proud. Tato metoda umožňuje až o 30 % větší dávkování a vyšší rychlost svařování.

Při tandemovém svařování pod tavidlem jsou využívány dva paralelní hořáky. Každý hořák je připojen na svůj vlastní svařovací zdroj a drát je zasypáván vlastní podávací jednotkou. První drát za pomoci vysokého stejnosměrného proudu zapálí elektrický oblouk, který s malým napětím zajišťuje hluboký průvar. Druhý oblouk u druhého drátu je zapálen s menším střídavým proudem kvůli odstranění foukání oblouku a zajišťuje hladký povrch svarové lázně. Dráty mají větší průměr v rozmezí 3-5 mm a tavíci výkon je roven dvojnásobku při použití jednoho drátu. Metoda tandemového a dvojdrátového svařování se používá při stavbě lodí, výrobě nosníků a výrobě větrných elektráren. Dále existují více drátové svařovací hlavice s možností až šesti drátů. Každý drát má v tomto případě vlastní svařovací zdroj. [33]

Obr. 25 Tandemové svařování dvoj drátem [34]



5.5 Hybridní svařování

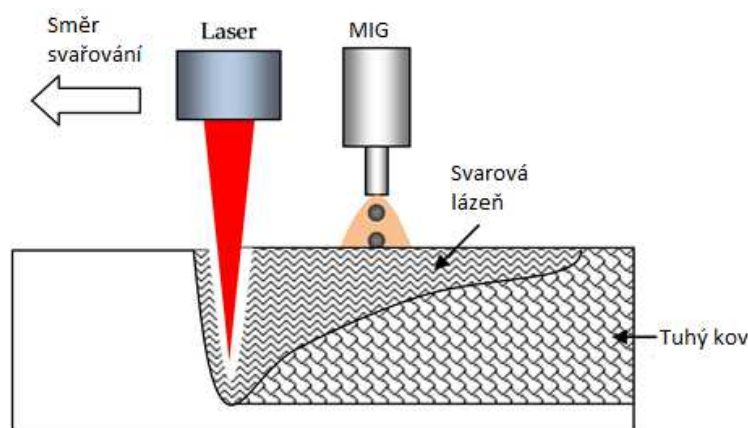
Při metodě Laser hybrid dochází ve svarové lázni ke součinnosti laserového paprsku a ke vzniku elektrického oblouku (Obr. 26). Výsledkem působení je efektivní výroba úzkého a kvalitního svaru. [34]

Laserový paprsek vytváří při procesu svařování úzkou a hlubokou svarovou lázeň. Úzký laserový svařovací paprsek zaručuje vyšší svařovací rychlost, která redukuje přinesené teplo a zamezuje vzniku termálního narušení svařovaných částí. Avšak využití svařování pomocí laserového paprsku je finančně nákladné a při svařování dochází ke vzniku špatných přechodových spojů. Před zahájením svařování je nezbytné materiál důkladně připravit. Laserové svařování není možné využít pro svařování reflexních materiálů jako je například hliník. [34]

Svařování elektrickým obloukem vytváří velmi dobrý přechodový spoj a zároveň je schopno svařovat reflektivní materiály. Cenová náročnost svařovacího procesu je značně nižší oproti metodě svařování laserem. Vznikem nízké energetické hustoty v průběhu se značně zpomaluje proces svařování a v návaznosti na zpomalení procesu nastává zvyšování přenosu tepla do svařované oblasti, ve které dochází k tepelnému narušení svařovaných částí. Existují dvě různé řešení pro využití kooperace Laserového svařování se svařováním elektrického oblouku. Hoření oblouku může probíhat před nebo za podáváním materiálem. Samostatné uspořádání zásadně ovlivňuje tvar svarové lázně a tepelně ovlivněnou oblast [34]

Key hole – Dochází k velmi rychlému ohřevu svařovaných ploch. Ve svařované oblasti vzniká paroplynový kanálek. Stěny kanálku jsou pokryty vrstvou taveniny a kanálek je naplněn parami odpařeného kovu a ochranným plynem. Za dutinou vzniká krystalizující a vznik svaru

Obr. 26 Proces svařování Laser hybrid [36]

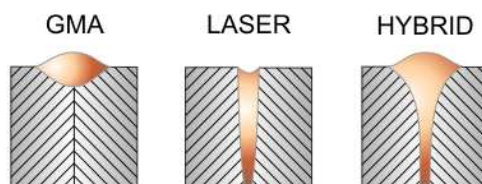


Vhodné využití metody laser hybridu je v místech, kde je nezbytné realizovat svary s požadavkem na vysokou kvalitu ve velkosériovém odbytu. Nejčastější využití je pro spojování hlinkových konstrukcí v automobilovém průmyslu. Dále pak je metoda využívána v oblastech letecké techniky, stavba lodí nebo například k výrobě zdravotnické techniky. [35]

5.5.1 Hybridní svařování Laser – MIG/MAG

Nejvíce používaná metoda hybridního svařování. Tvorba svaru vzniká pomocí tavení svarového spoje laserem a podávání přídavného materiálu. Laserový paprsek předává do svarové plochy energii, která pomocí odrazů od úkosové stěny rovnoměrně ohřeje celou svarovou plochu. Z tohoto důvodu je doporučena úprava svarové plochy zkosením 5° u materiálu nad 5 mm. Svar (obr. 27) je charakterizován vysokou vnitřní čistotou, tepelně ovlivněná oblast je malá a dochází k minimálním deformacím. Svary disponují vysokou pevností a povrchová kresba je velmi dobrá. Svařování pomocí metody Laser-hybrid je možné využívat pro provařování tupých svarů a koutových svarů. [35]

Obr. 27 Porovnání svarů [36]



Laserový paprsek a MIG/MAG soustava musí zachovat přesné působení tepelných zdrojů dle geometrie svařovací hlavy, tím lze dosáhnou nejmenšího vneseného tepla do okolní oblasti. Při moc velké vzdálenosti ohnisek dochází k nárůstu vneseného tepla. Naopak při malé vzdálenosti dochází ke vzniku pórů a materiálové struktury ve svaru jsou nestabilní. [35]

5.5.2 Laser – TIG

Při hybridním svařování Laser-TIG dochází ke vzniku elektrického oblouku v důsledku metody TIG. Použitím netavicí se elektrody je nezbytné dodávat přídavný materiál v průběhu svařování. Podíl přídavného materiálu při metodě Laser -TIG je značně menší než při metodě Laser-MIG, protože pouze zlomek tepla z elektrického oblouku je využit k roztavení přídavného materiálu. Díky oddělenému způsobu přidávání materiálu je možné nezávisle nastavovat svařovací proud. Ochranné plyny zajišťují ochranu svarové lázně a elektrody před působení atmosférických plynů a oxidů. Rychlost tavení základního materiálu u metody Laser-TIG dosahuje dvakrát vyšších hodnot než při použití metod Laser nebo TIG. Metoda hybridního svařování Laser – TIG byla vyvinuta pro možnost svařování nerezových ocelí, slitin hliníku a hořčíku. [34]

6 Závěr

Cílem práce bylo shromáždit a analyzovat poznatky o moderních procesech při svařování elektrickým obloukem. Svařování elektrickým obloukem je technologický proces, který má nezastupitelné místo ve výrobním průmyslu. Pro správnou optimalizaci výrobních procesů je v budoucnu očekáván další vývoj a modernizace svařovacích metod. V bakalářské práci je zpočátku představena obecná definice elektrického oblouku. Jsou popsány základní znaky a charakteristika oblouku. Hlavní cíl práce je zaměřen na moderní procesy svařování elektrickým obloukem. Jednotlivé klasické metod svařování jsou popsány a následně rozšířeny o moderní procesy, které vznikly modernizací klasických metod. Nejdříve je popsána metoda svařování obalenou elektrodou, která je v dnešní době používána převážně pro malé montážní a servisní práce. Svařovací vlastnosti této metody jsou rozdílné v závislosti na nastavených svařovacích parametrech a volbě obalu elektrody. Další popsanou metodou je svařování pomocí metody MIG/MAG u které je základním parametrem nastavení proudové intenzity, která ovlivňuje přenos kovu a tvorbu svarového spoje. Součástí svařování metodou MIG/MAG je volba ochranného plynu, který zajišťuje stabilní hoření elektrického oblouku a podílí se na přenosu tepelné energie do svaru. Ochranné plyny svým složením a množstvím ovlivňují přenos svarového kovu, hloubku závaru a profil kovu. Metoda MIG/MAG je využívána pro málo sériovou výrobu u součástí náročných na pevnost. Pro sériové výroby je hořák MIG/MAG umístěn na robotickou ruku a svařování je plně automatizované. Jeden z nových prvků je možnost využití při svařování trubičkového drátu bez nutné přítomnosti ochranného plynu. Tandemové hořáky je možné použít při svařování hliníku vysokými rychlostmi. Metoda CMT byla vyvinuta pro možnost spojení oceli s hliníkem. Metoda TIG, svařování netavicí se elektrodou je využíváno pro nejnáročnější svary, převážně dynamicky namáhané konstrukce. Rozšířením metody vznikla metoda TOPTIG kdy je přídatný materiál dodáván přímo do hořícího oblouku a je možné svářet ve všech polohách. Další vývojem vznikla metoda PAW svařování pomocí plazmového oblouku. Při svařování pod tavidlem je v průběh svařování svarový spoj zasypáván tavidlem, které chrání svarovou lázeň. Metoda se dnes využívá pro tvorbu dlouhých nepřerušovaných svárů. Vývojový vrchol je vynalezení metody Laser hybrid. Kdy dochází k efektivní kombinaci klasické metody s laserem. Spojením těchto metod vzniká velice kvalitní svar bez tepelné deformace okolní oblasti svařovaného materiálu.

Svařování pomocí metody laser-hybrid z důvodu zvyšování nároků na svarové spoje bude v budoucnu stále více využíváné. Dobré svařovací vlastnosti zaručují vysoké využití ve všech výrobních průmyslech. V dnešní době je výrobní proces svařování pomocí laser-hybridu finančně nákladnější než klasické metody.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] BARTOŠ, JAROSLAV, 1949-. *Učebnice pro kurz svařování metodou 111 : (ruční obloukové svařování obalenou elektrodou)*. Svařování. Ostrava: Zeross, 2006. ISBN 80-85771-77-2.
- [2] DOC.ING.OLDŘICH AMBROŽ, CSC , ING. BOHUMIL KANDUS, Ing. Jaroslav Kubíček. *Technologie svařování a zařízení : učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Svařování. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [3] BALEJ ZDENĚK, KUDĚLKA VLADIMÍR, 1955, OPLETAL JAN, 1951. *Učebnice pro základní kurz svařování ZK 141 8 : obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu vysokolegovaných austenitických ocelí : (TIG, WIG, GTAW)*. Svařování. Ostrava: Zeross, 2013. ISBN 978-80-85771-03-9.
- [4] MORAVEC, Jan. *Elektrický oblouk - jak vzniká a jak se zhasí ?* [online]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk/>
- [5] TMĚJ JAROSLAV, NEUMANN HEINZ, Jenší Stanislav. *Teorie svařování*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1990. ISBN 80-7083-010-7.
- [6] Obloukové technologie s ochranou tavidla. *Technologie I*. [online]. [vid. 2018-02-08]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvicheni10_prezetace.pdf
- [7] JAN, Prudký. *Teorie a metodika svařování*. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1986.
- [8] PAVEL, Havelka. *MMA (Manuall Metal Arc Welding)* [online]. [vid. 2018-03-06]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/obalena-elektroda-mma/>
- [9] IVO, Hlavnatý. Rozdělení svařovacích zdrojů. *VŠB TU Ostrava* [online]. 2008 [vid. 2018-02-27]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2008_SS1.pdf
- [10] LADISLAV, Blahuta. *Zdroje proudu pro svařování elektrickým obloukem I*. [online]. [vid. 2018-02-27]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/eu_penize_skolam/dum/zks_mag/vy_32_inovace_h13-1.pdf
- [11] JAROMÍR, Moravec. Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou. *Kurzy svářečských technologů a inženýrů IWT/IWE* [online]. [vid. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/38728580-Rucni-obloukove-svarovani-obalenu-elektrodou.html>
- [12] IVO, Hlavatý. Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou - 111. *VŠB TU Ostrava* [online]. [vid. 2018-03-06]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/05-111.pdf>
- [13] MIROSLAV, Štíhel. Kurz průvarového bodového svařování obalenou elektrodou. *ČSN 050705-ZP 11-9 W11* [online]. 2011 [vid. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/stime/data/kurz.pdf>
- [14] DOLEJSKÝ TOMÁŠ. *Základní kurz svařování MIG/MAG*. 4. vyd. Ostrava: Zeross, 2015. ISBN 80-86698-28-9.
- [15] PAVEL, Havelka. *MIG/MAG (CO2)* [online]. [vid. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://automig.cz/o->

svarovani/metody/migmag-co2/

- [16] IVO, Hlavatý. *Svařování MIG (131) a MAG (135)* [online]. [vid. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/07-08-131-135.pdf>
- [17] MILOSLAV, Otýpka. *Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře MIG/MAG* [online]. 2011 [vid. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33457&revision=-1&instance=2>
- [18] LADISLAV, Blahuta. *Ochranné plyny* [online]. [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/eu_penize_skolam/dum/zks_mag/vy_32_inovace_h15-1.pdf
- [19] CHUDÍK, Ivan. *Výběr ochranných plynů pro obloukové svařování* [online]. 2008 [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vyber-ochrannych-plynu-pro-obloukove-svarovani/>
- [20] BLAŠKOVIČ PAVEL, KOSEČEK MIROSLAV, Vehner Ladislav. *zváranie pod tavivom*. B.m.: Alfa, 1978.
- [21] VÁCLAV, Minařík. *Obloukové svařování*. Praha: Scientia, spol. s.r.o, 2003. ISBN 80-7183-285-5.
- [22] FRONIUS. *Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer)* [online]. [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html
- [23] *Meiller sází na tandemové svařování od firmy CLOOS* [online]. [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/meiller-sazi-na-tandemove-svarovani-od-firmy-cloos_38600.html
- [24] BALEJ ZDENĚK, KUDEĚLKA VLADIMÍR, 1955, OPLETAL JAN, 1951. *Základní kurz svařování metodou 141*. Ostrava: Zeross, 2013. ISBN 978-80-85771-03-9.
- [25] DUBENSKÝ RUDOLF, DUNOVSKÝ JIŘÍ, NOVOTNÝ JILJÍ, Pilous Václav. *Teorie svařování*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury Alfa, 1986.
- [26] IVO, Hlavatý. *Obloukové svařování wolframovou elektrodou v interním plynu WIG(TIG) - 141* [online]. [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/09-141.pdf>
- [27] BERTHIER, A; PAILLARD, P; CARIN, M; VALENSI, F; PELLERIN, S. TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation. Part 1 : Identification of Marangoni Effect. *Science & Technology of Welding & Joining* [online]. nedatováno. Dostupné z: doi:10.1179/1362171812Y.0000000024
- [28] LATHABAI, SRI & JARVIS, BRIAN & BARTON, K.J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium [online]. nedatováno. Dostupné z: doi:0.1016/S0921-5093(00)01408-8
- [29] IVO, Hlavatý. *Plazmové svařování (navarování) - 15* [online]. 2015 [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/2-01-15.pdf>
- [30] IVO, HLAVATÝ, Drahomír Schwarz. *Svařování plazmovým obloukem*. *Svět svaru* [online]. 2014

- [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/05/2014-1_SvarovaniPlasmou.pdf
- [31] KOUTNÝ JIŘÍ. *Svařování pod tavidlem (SAW)*. 2010.
- [32] BO WANG, Xun-Ming Zhu a Ji-Cai Feng , HONG-CHANG ZHANG, HONG-TAO ZHANG. Characteristics of Welding and Arc Pressure in the Plasma–TIG Coupled Arc Welding Process. *State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; wangybo@hit.edu.cn (B.W.); fengjc@hit.edu.cn (J.-C.F.)* [online]. nedatováno, **13**, 13. Dostupné z: doi:10.3390/met8070512
- [33] TOMAR, Rakesh. *Submerged Arc Welding*. 2013.
- [34] BAPPA ACHERJEE. No TitHybrid laser arc welding: State-of-art reviewle [online]. 2018, **99**, 60–71. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399217312410>
- [35] IVO, Hlavatý. Svařování Laser-hybridem. *VŠB TU Ostrava* [online]. 2009. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-04.pdf>

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Tupé a koutové svary [Autor].....	3
Obr. 2 Řez elektrickým obloukem [5]	5
Obr. 3 Schéma elektrického oblouku [6]	6
Obr. 4 Statická charakteristika elektrického oblouku [4]	7
Obr. 5 Foukání oblouku [6]	8
Obr. 6 Schéma svařovacího obvodu u Ručního obloukového svařování obalenou elektrodou [8].....	9
Obr. 7 Statické charakteristiky zdrojů [Autor]	10
Obr. 8 Dynamická charakteristika [10].....	10
Obr. 9 Tvorba svaru u metody Ruční obloukové svařování [10]	11
Obr. 10 Řez obalenou elektrodou [Autor]	12
Obr. 11 Schéma svařovacího obvodu u metody MIG/MAG [15]	16
Obr. 12 Charakteristiky přenosu kovu [17]	17
Obr. 13 Vliv ochranného plynu na tvar a závar svarové housenky [14]	19
Obr. 14 přenos kovu metoda CMT [23]	21
Obr. 15 Tandemový hořák [11]	22
Obr. 16 Hořák TIG [26].....	22
Obr. 17 Způsob využití střídavého proudu [26]	25
Obr. 18 Porovnání hořáku metody TIG a TOPTIG [26]	25
Obr. 19 Schéma hořáku K-TIG [28].....	26
Obr. 20 Schéma hořáku u metody PAW [30].....	27
Obr. 21 PTA schéma hořáku [30].....	29
Obr. 22 Hybridní hořák Plasma – TIG [32].....	29
Obr. 23 Svařování pod tavidlem [32]	30
Obr. 24 Svařovací traktor [33].....	31
Obr. 25 Tandemové svařování dvoj drátem [34].....	32
Obr. 26 Proces svařování Laser hybrid [36]	33
Obr. 27 Porovnání svarů [36]	34

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení proudu a napětí podle průměrů [2]	14
Tabulka 2 – Rozdělení elektrod v závislosti na proudu [5]	23
Tabulka 3 – parametry svařování [32].....	28