



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# POROVNÁNÍ TĚCH METOD SVAŘOVÁNÍ TIG, MAG A CMT

COMPARISON OF THE METHODS OF WELDING TIG, MAG AND CMT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Šoulák

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Petr Šoulák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**  
Akademický rok: 2016/17

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

## Porovnání TOO metod svařování TIG, MAG a CMT

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tavné svařování jako tepelný proces silně ovlivňuje základní materiál kolem svarového kovu. Tepelně ovlivněná oblast (TOO) kolem svaru je charakteristická změnou strukturního složení a mechanických vlastností. Úkolem práce je porovnat vliv svařování u tří obloukových metod u uhlíkové a korozivzdorné oceli.

### Cíle bakalářské práce:

1. Provést rozbor strukturního složení tepelně ovlivněné oblasti nízkouhlíkové oceli.
2. Vypracovat literární studii svařování metodou MAG, TIG a CMT.
3. Vyhodnotit parametry a podmínky svařování, které mají vliv na šířku tepelně ovlivněné oblasti.
4. Navrhnout parametry pro experimentální ověření jednotlivých vlivů na hloubku průvaru a šířku TOO.
5. Provést a vyhodnotit experiment.

### Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan a kol. Technologie II, 2 vyd. CERM Brno, 7/2004, 237 s. ISBN 80-214-2683-7

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009

BARTÁK, J. Výroba a aplikované inženýrství, 1 vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009

KOUKAL, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3

AMBROŽ, O. a KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0

VEJVODA, S. a KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1 vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249 s. ISBN 80-85771-70-5

BARTÁK, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214 s. ISBN 80-85771-72-1

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1 vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5-5

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Šoulák Petr: Porovnání TOO metod svařování TIG, MAG a CMT

---

V bakalářské práci bylo za úkol porovnat velikost TOO pro metody TIG, MAG a CMT. Svařované materiály byly nízkouhlíková ocel a austenitická korozivzdorná ocel. Vzorky o velikosti 250x50 mm a tloušťce 2 mm byly svařeny tupým svarem bez mezery. V první části experimentu byly vzorky svařeny stejnou svařovací rychlostí. Druhá část se týkala pouze metody CMT, kde byla použita optimální svařovací rychlost. U vybraných vzorků byla měřena a porovnávána velikost TOO na makroskopických snímcích.

Klíčová slova: TOO, nízkouhlíková ocel, austenitická korozivzdorná ocel, TIG, MAG, CMT

## **ABSTRACT**

Šoulák Petr: Compared HAZ the methods of welding TIG, MAG and CMT

---

The bachelor thesis was to compare the HAZ size for the TIG, MAG and CMT methods. The welded materials were low carbon steel and austenitic stainless steel. Samples of 250x50 mm size and 2 mm thick were welded with butt weld without a gap. In the first part of experiment, samples were welded at the same welding speed. The second part concerned only CMT, where the optimal welding speed was used. For selected samples, the HAZ size was measured and compared in macroscopic images.

Keywords: HAZ, low carbon steel, austenitic stainless steel, TIG, MAG, CMT

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠOULÁK, Petr. *Porovnání TOO metod svařování TIG, MAG a CMT*. Brno, 2017. 45s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 25.5.2017

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavovi Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Také děkuji firmě Fronius za umožnění svaření vzorků pro bakalářskou práci a za poskytnutí informací.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu a trpělivost při tvorbě této práce.

## **OBSAH**

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	9
1 ROZBOR STRUKTURNÍHO SLOŽENÍ TOO NÍZKOUHLÍKOVÉ OCELI .....	10
1.1 Pásmo částečné překrystalizace .....	11
1.2 Pásmo normalizace .....	11
1.3 Pásmo přehřátí .....	12
1.4 ARA diagramy .....	12
2 PARAMETRY A PODMÍNKY, KTERÉ MAJÍ VLIV NA VELIKOST TOO .....	13
3 METODA MAG .....	14
3.1 Přenos kovu v oblouku .....	15
3.2 Ochranné plyny .....	18
3.3 Přídavné materiály .....	19
4 METODA TIG .....	20
4.1 Svařování stejnosměrným proudem .....	20
4.2 Svařování střídavým proudem .....	21
4.3 Svařování impulsním proudem .....	21
4.4 Netavící se elektrody .....	21
4.5 Ochranné plyny .....	22
4.6 Přídavné materiály .....	22
5 METODA CMT .....	23
6 EXPERIMENT .....	24
6.1 Svařování metodou TIG .....	25
6.2 Svařování metodou MAG a CMT .....	26
6.3 Příprava vzorků pro hodnocení TOO .....	31
6.4 Výpočet tepelného příkonu .....	32
6.5 Velikost tepelně ovlivněné oblasti .....	34
6.6 Šířka oxidického pásma .....	41
6.7 Zhodnocení experimentu .....	42
ZÁVĚR .....	43

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

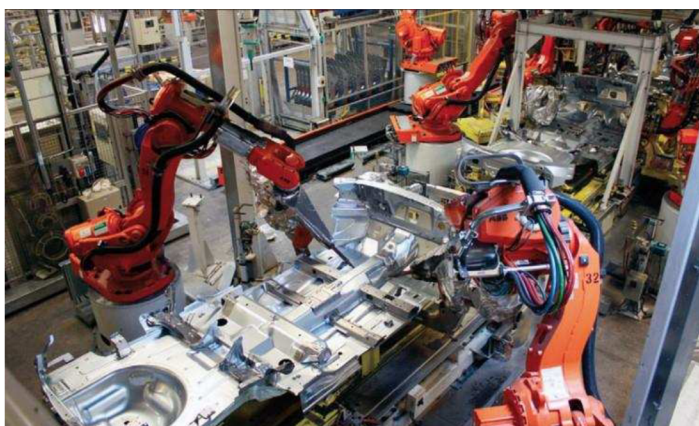


## ÚVOD [13], [20], [30]

Technologie svařování je významnou technologií nejen ve strojírenství. Využívá se téměř ve všech výrobních oborech, například při výrobě nových strojů, stavbě mostových konstrukcí ve stavebnictví, výrobě jaderných reaktorů v energetice a v mnoha dalších oborech. Velký podíl zastoupení má v automobilovém průmyslu, kde se využívá především robotizovaného svařování.

Svařování je proces, při kterém vzniká nerozebíratelné spojení dvou nebo více částí kovů. Požadavkem na spojení je vytvoření termodynamických podmínek, kde dochází ke vzniku nových meziatomových vazeb. Spojení na této úrovni je velmi obtížné dosáhnout za běžných podmínek (teplota a tlak), proto je potřeba při svařování působit teplem a tlakem. Svařování tak dělíme na tavné a tlakové.

Tavné svařování, jako tepelný proces, silně ovlivňuje základní materiál kolem svarového kovu. Oblast ovlivněná teplem se nazývá tepelně ovlivněná oblast, kde dochází ke změně strukturního složení a mechanických vlastností. Svařovat můžeme materiály podobných i různých vlastností, kovové i nekovové materiály, ale pro každý typ spojení je vhodná jiná metoda svařování.

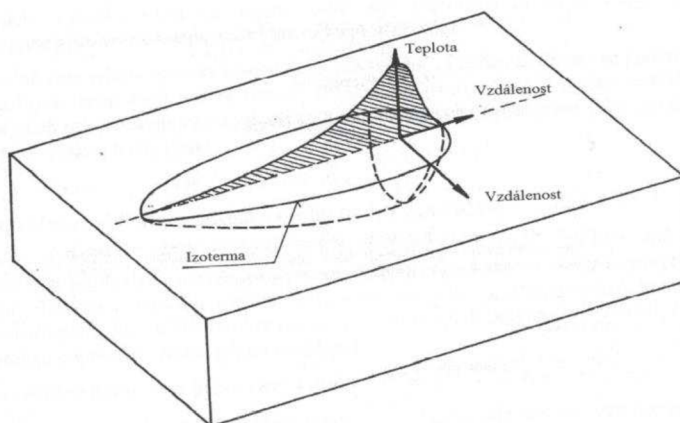


Obr. 1 Využití technologie svařování (svařování karosérie vozů Volvo koncernu Zhejiang Geely Holdings Group, svařování ocelové konstrukce mostu přes Lochkovské údolí) [12], [33]

# 1 ROZBOR STRUKTURNÍHO SLOŽENÍ TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ OBLASTI NÍZKOUHLÍKOVÉ OCELI [4], [14], [15], [16], [30]

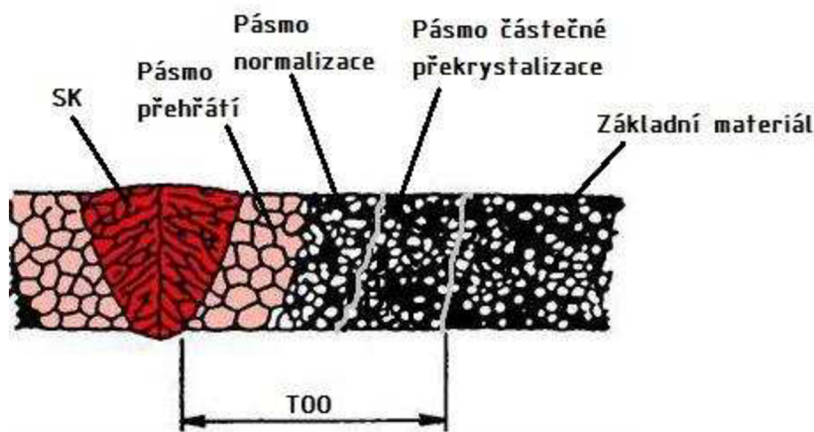
Pro natavení základního a přídavného materiálu při tavném svařování je potřeba použit koncentrovaný zdroj tepla, při kterém vzniká teplotní pole (obr. 2). Velikost a tvar teplotního pole je závislý na použité metodě svařování, vlastnostech materiálu a rychlosti svařování. Působení a vedení tepla je příčinou vzniku teplotního cyklu, díky kterému můžeme posuzovat strukturu a vlastnosti svarových spojů. Teplotní cyklus vyjadřuje závislost průběhu teploty na čase v určitém místě svaru. Je charakterizován růstem teploty z počáteční na konečnou hodnotu (maximální).

Po dosažení maxima dochází k ochlazení (křivka klesá).



Obr. 2 Teplotní pole [14]

Oblast ovlivněná zdrojem tepla se nazývá tepelně ovlivněná oblast (TOO obr. 3), která se dále dělí na pásmo přehřátí, pásmo normalizace a pásmo částečné překrytality. Tyto oblasti u svarových spojů můžeme pozorovat na mikrovýbrusech po naleptání a zvětšení. Velikost tepelně ovlivněné oblasti lze rozpoznat na makrovýbrusech. Při svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny (měď, nikl, hliník) se v tepelně ovlivněné oblasti mikrostruktura nemění, může se pouze změnit substruktura nebo nastat růst zrn.



U polymorfni kovů a slitin naopak dochází k výrazným změnám v tepelně ovlivněné oblasti, které mění vlastnosti svarového spoje. Změny závisí na chemickém složení, původní mikrostruktuře a teplotním cyklu.

Obr. 3 Tepelně ovlivněná oblast [14]

## 1.1 Pásmo částečné překrystalizace [14], [15], [16]

Pásmo částečné překrystalizace se vyskytuje mezi teplotou  $Ac_1$  a  $Ac_3$ . U nízkouhlíkových ocelí s feriticko perlitickou strukturou, začíná postupná transformace perlitu na austenit po dosažení překrystalizační teploty (nad teplotou  $Ac_1$ ), přičemž čím větší je rychlost ohřevu na začátku teplotního cyklu, tím větší je teplotní hystereze. Tato přeměna je závislá na rychlosti difuze. Pro tuto transformaci je potřebný určitý čas mezi teplotami  $Ac_1$  a  $Ac_3$ . Díky tomu neprobíhá transformace v celém zrně perlitu najednou. Z přetransformovaného austenitu difunduje uhlík do okolního nepřeměněného feritu a postupně se ferit mění na austenit. Celý ferit by se přeměnil při teplotě  $Ac_3$ , ale v tomto pásmu většinou tento proces nestihne proběhnout do úplného konce.

Při rychlosti ochlazování v tomto pásmu nestačí difundovat uhlík zpět do bývalého perlitického zrna, které dosud netransformovalo a vznikne forma perlitu zvaná „načechraný perlit“ nebo „chomáčkový perlit“ (obr. 4), protože rychlým ochlazením se okamžitý stav struktury většinou zachová. Zbytek austenitu se při vyšších rychlostech může zakalit na martenzit nebo na jinou přechodovou strukturu. Difuzí uhlíku přes hranice zrn se původní feritická zrna začínají drobit. Určitý objem původní netransformované struktury se vysoce popustí. Tyto změny v pásmu částečné překrystalizace způsobují nehomogenní strukturu po ochlazení.



Obr. 4 Struktura „načechraného“ perlitu [14]

## 1.2 Pásmo normalizace [14], [15], [16]

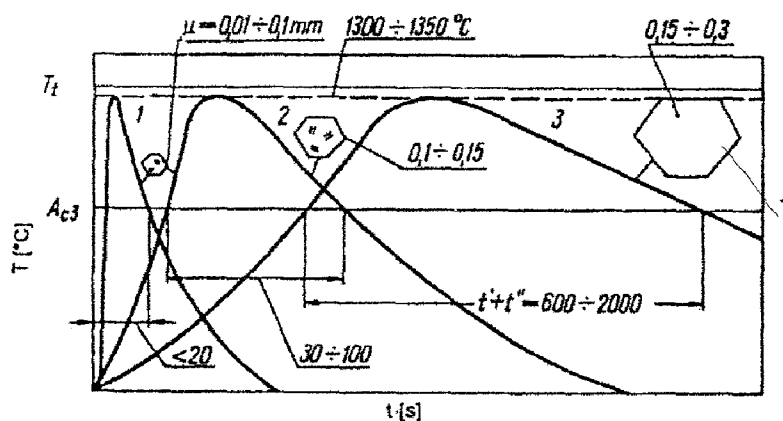
V tomto pásmu, které se pohybuje mezi teplotami  $Ac_3$  a teplotou přehřátí, probíhá úplná přeměna na austenit. Mikrostruktura v této oblasti je tedy austenitická s polyedrickými zrny.

Během ochlazování může vzniknout v závislosti na rychlosti několik mikrostruktur a to martenzitická, bainitická, feriticko-perlitická nebo smíšené kombinace. Tyto struktury se dají zjistit z rychlosti ochlazování v ARA digramu. Díky kratšímu času setrvání nad teplotou  $Ac_3$  a zároveň nižší, než je teplota přehřátí, nestihne zrno austenitu zhrubnout a tím po ochlazení zůstává jemnozrná struktura. Toto pásmo se proto vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi.

### 1.3 Pásmo přehřátí [14], [15], [16]

Toto pásmo se vyskytuje nad teplotou přehřátí a dochází zde stejně, jak v pásmu normalizace, k úplné transformaci na austenit. Při teplotě nad 1050 °C dochází k výraznému růstu zrn (obr. 5). Velikost růstu zrn je ovlivněn chemickým složením materiálu, metodou svařování a intenzitou tepelného ovlivnění, které charakterizuje měrný tepelný příkon (Q). Hrubnutím zrna se v materiálu zhorší plasticita pásem, která zvyšuje náchylnost na likvační, studené a žíhací trhliny. U kovů bez transformace snižuje pevnost.

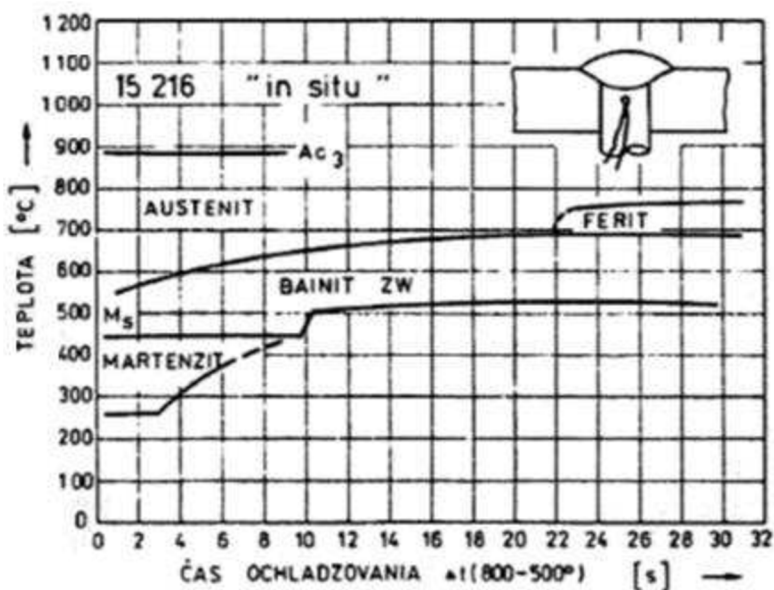
Při nižších rychlostech ochlazování se v tomto pásmu tvoří feriticko-perlitické a smíšené struktury. U vyšší rychlosti ochlazování se tvoří bainitické nebo martenzitické struktury, které se vyznačují vyšší tvrdostí.



Obr. 5 Růst zrna při svařování [14]

### 1.4 ARA diagramy [14], [15], [16]

ARA diagramy (anizotermické diagramy rozpadu austenitu) nám slouží k určení pravděpodobné mikrostruktury a mechanických vlastností v jednotlivých oblastech tepelně ovlivněné oblasti ze znalosti teplotních cyklů, vypočítaných nebo naměřených. Naopak můžeme také zjistit podmínky chladnutí, abychom získali požadovanou strukturu. ARA diagramy jsou pro každou jakost ocele jiné a při jejich konstrukci se neprojevuje teplotní hystereze mezi teplotami  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  a neprojeví se ani stupeň homogenizace chemického složení austenitu. Pro přesnější odhady mikrostruktur se používají diagramy konstruované pro podmínky svařování, ARA „in situ“ (obr. 6), které mají na vodorovné ose místo logaritmu času parametr  $t_{8/5}$ . Parametr  $t_{8/5}$  je doba chladnutí z teploty 800 °C na 500 °C, která charakterizuje transformaci austenitu a je u svařování a zároveň pro svařeče lépe měřitelná.



Obr. 6 ARA „in situ“ [14]

## 2 PARAMETRY A PODMÍNKY, KTERÉ MAJÍ VLIV NA VELIKOST TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ OBLASTI [14], [16], [30]

Parametry, které mají vliv na velikost TOO vycházejí především ze vzorce pro tepelný příkon (někdy také vnesené teplo). Dále TOO ovlivňuje průběh teplotního cyklu, jeho vzdálenost od osy svaru a chemické složení materiálu.

*Vztah pro výpočet tepelného příkonu:*

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.1)$$

Kde: Q – množství tepla přivedeného do svarového spoje na jednotku délky [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ],

k – koeficient tepelné účinnosti metody svařování tab. 1,

U – napětí při svařování [V],

I – intenzita svařovacího proudu [A],

v – rychlost svařování [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Tab. 1 Koeficient tepelné účinnosti metod svařování [14]

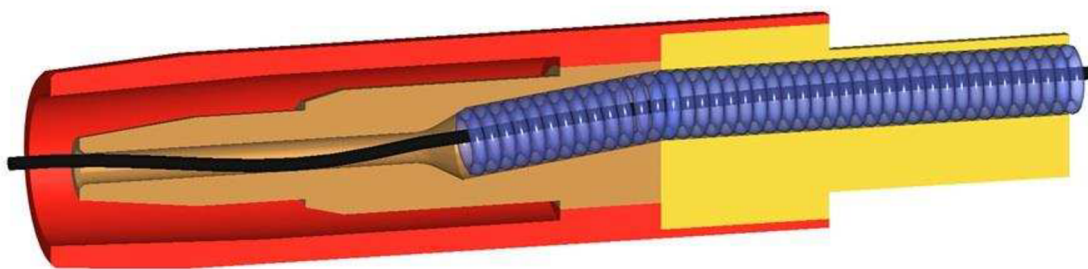
Číslo metody	Metoda svařování	Koeficient k
121	svařování pod tavidel drátovou elektrodou	1,00
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,80
114	obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,80
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu: MIG svařování	0,80
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu: MAG svařování	0,80
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,80
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,80
138	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,80
139	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,80
141	obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu: WIG (TIG) svařování	0,60
15	plazmové svařování	0,60

Napětí je rozdíl potenciálu mezi povrchem svarové lázně a drátem elektrody. Na odtavovací výkon má malý vliv, především ovlivňuje šířku svarové housenky. Největší vliv na průřez svarové housenky má svařovací proud. S jeho růstem roste odtavovací výkon a zvětšuje se hloubka závaru. Platí tedy, že čím větší je svařovací proud a napětí, tím větší by měla být velikost tepelně ovlivněné oblasti. Velká rychlost svařování způsobuje kratší dobu ovlivnění teplotním polem, proto větší rychlost snižuje velikost tepelného příkonu (vneseného tepla) a tím i velikost tepelně ovlivněné oblasti.

Dalším faktorem ovlivňující TOO je počet navařovaných housenek. S jejich množstvím roste čas, kdy do základního materiálu prostupuje teplo, které napomáhá rozšiřování tepelně ovlivněné oblasti.

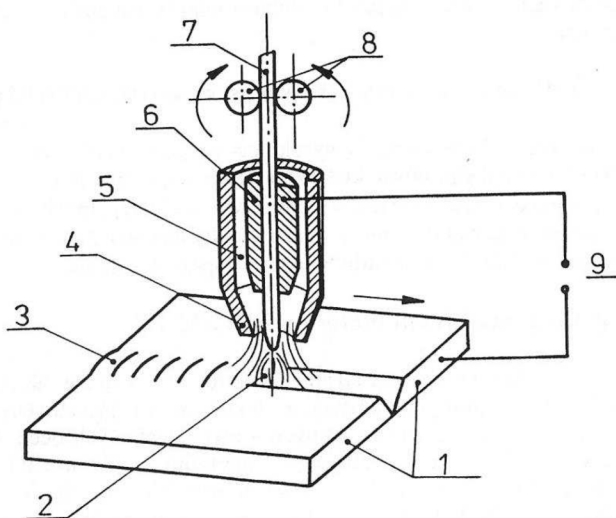
### 3 METODA MAG [4], [19], [27], [30]

Metoda MAG (metal active gas) je metoda obloukového svařování v atmosféře aktivního plynu (obr. 8), která vedle metody svařování obalenou elektrodou patří mezi nejrozšířenější metody na světě. Mezi hlavní důvody patří velký výběr přídavných materiálů, ochranných plynů, snadná možnost automatizace a velké množství vyráběných svařovacích zařízení.



Obr. 7 Schéma svařovacího hořáku [27]

U metody MAG dochází k hoření oblouku mezi elektrodou (drátem) a základním materiálem v atmosféře aktivního plynu. Přívod elektrického proudu na drát je zajištěn pomocí tření na špičce hořáku, tak aby elektrické zatížení drátu bylo co nejkratší. Špička je vyrobena z dobře vodivého materiálu, který je zároveň tvrdý a odolný proti opotřebení. “Nekonečný“ drát je pomocí dvou nebo čtyř kladek přiváděn bovdenem do svařovacího hořáku (obr. 7). Volný konec drátu je obklopen plynovou hubicí, která zprostředkovává přívod ochranné atmosféry. Ze všech obloukových metod má metoda MAG největší proudovou hustotu a to až  $600 \text{ A}\cdot\text{mm}^2$ , se svařovacím proudem od 30 do 800 A. Přenos kovu v oblouku je závislý na velikosti proudu, napětí a použité ochranné atmosféře. Díky vysokým proudům dokážeme touto metodou svařovat rychlostí až  $150 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ , kde rychlost kapek se pohybuje kolem  $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Teplota tavné lázně v závislosti na svařovacích parametrech, chemickém složení a vlastnostech svařovaného materiálu se pohybuje od 1600 do 2100 °C, přičemž teplota kapek roztaveného kovu je v rozmezí od 1700 do 2500 °C.

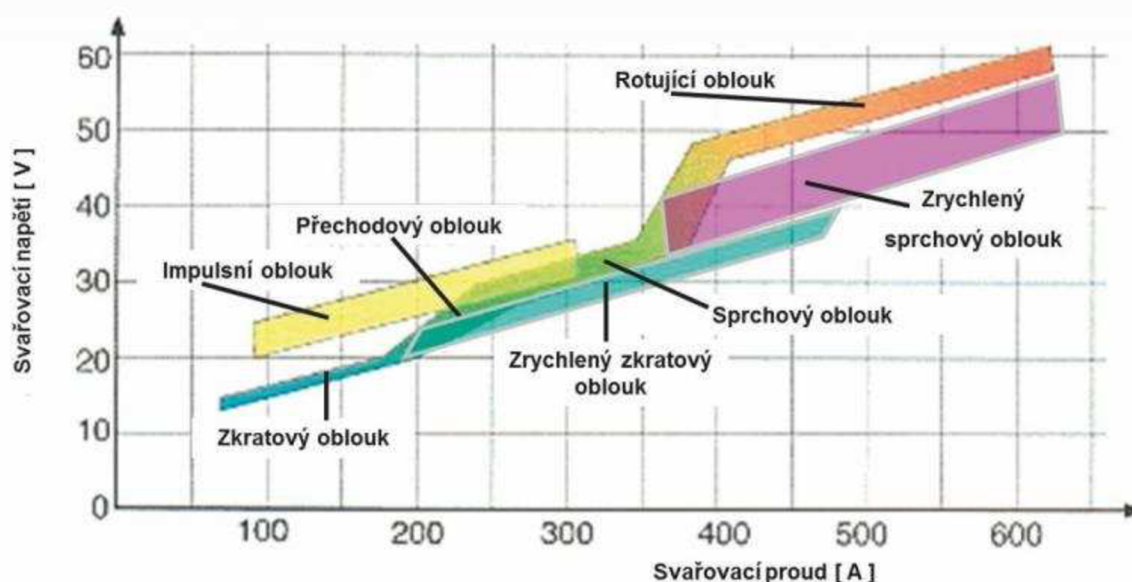


1. Svařovaný materiál
2. Elektrický oblouk
3. Svar
4. Plynová hubice
5. Ochranný plyn
6. Kontaktní špička
7. Přídavný drát
8. Podávací kladky
9. Zdroj proudu

Obr. 8 Princip svařování metodou MAG [27]

### 3.1 Přenos kovu v oblouku [27], [30]

Základní charakteristika u obloukového svařování je přenos kovu v oblouku (obr. 9). Díky různým parametrům svařování, hlavně napětí a proudu, se mění druh přenosu kovu, na který má vliv i ochranná atmosféra a přídavný materiál. Tyto přenosy můžeme rozdělit na jednotlivé typy.



Obr. 9 Přenos kovu v oblouku [6]

- krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu,
- krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem,
- přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty,
- dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem,
- impulsní bezzkratový oblouk,
- moderovaný bezzkratový přenos,
- dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu.

#### ❖ Krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu

U zkratového přenosu se na tavicí se elektrodě začíná odtavovat kapka kovu, která při doteku se svařovaným materiálem způsobí zkrat a přeruší oblouk. Zkratem dojde ke zvýšení proudu, kapka kovu se utrhne, dopadne do svarové lázně a opět se zapálí oblouk. Tento proces probíhá v rozsahu proudu od 60 do 180 A a napětí okolo 14-22 V. Výkon navaření se pohybuje okolo 1-3 kg.hod<sup>-1</sup> a proces může probíhat v čistém CO<sub>2</sub> nebo ve směsích argonu a CO<sub>2</sub>. Při zvýšení napětí se sníží frekvence odtavovaných kapek, které mají větší velikost a také je větší jejich rozstřík. Díky opakovanému zhasínání elektrického oblouku dochází k nižšímu vnosu tepla do svařovaného materiálu a tím dochází i k menším tepelným deformacím. Toho se využívá při svařování tenkých plechů a při navařování kořenových vrstev. Pro tento přenos kovu je potřebný dynamický zdroj, aby pojmul proudové špičky. Zkratový přenos je specifický svým rovnoměrným praskavým zvukem.

❖ Krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem

Zrychlený zkratový přenos se svými parametry blíží sprchovému přenosu. Napětí se sice pohybuje jako u klasického zkratového přenosu okolo 14–25 V, ale proud je nad 200 A. Vyšší je i podávací rychlost drátu a výkon navaření, okolo 3-10 kg.hod<sup>-1</sup>. Drát je pod velkým úhlem sklonu hořáku tlačěn do místa svaru vysokou podávací rychlostí. Vysoká frekvence zkratu neumožňuje velký růst kapek, proto je potřeba zajistit vyšší průtok ochranného plynu (20-30 l.min<sup>-1</sup>). Zrychlený zkratový přenos umožňuje vysokou rychlostí svařovat tenké plechy, kořeny svarů a polohové svary. Svařování probíhá ve směsi argonu a 8 % CO<sub>2</sub>. Metoda se vyznačuje malým rozstříkem, bez uplívání kapek roztaveného kovu na povrchu materiálu.

❖ Přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkratky

Tento typ oblouku nastává při parametrech napětí kolem 22 až 28 V a proudu 190 až 300 A. Někdy se tento oblouk označuje také jako kapkový. Vlivem vysokého proudu se na konci elektrody taví velká kapka, která je vymrštěna vysokou rychlostí, ale malou frekvencí kolem 5-40 kapek za sekundu. Přechodový oblouk (obr. 10) se vyskytuje v čistém CO<sub>2</sub> a vyznačuje se velkým rozstříkem kvůli nepravidelným zkratům a mimoosým uvolňování kapek roztaveného kovu. Pro tyto vlastnosti se tento typ oblouku často nepoužívá.



Obr. 10 Přechodový oblouk [27]

❖ Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem



Obr. 11 Sprchový přenos kovu [27]

Sprchový přenos (obr. 11) se dá realizovat ve směsích CO<sub>2</sub> a argonu (minimálně 80 % argonu). Hlavním důvodem je snadná ionizace plynu, díky které plazma obklopuje a přehřívá konec tavicího se drátu. Díky tomu se na konci drátu tvoří ostrý hrot. Pro tento přenos jsou typické hodnoty proudu od 200 do 500 A a napětí od 28 do 40 V. V důsledku vysokého proudu a působení elektromagnetických sil se vytvářejí vysokou frekvencí drobné kapky, které tvoří tzv. sprchu. Tento oblouk je plynulý a nezhasíná, proto do základního materiálu vnáší velké teplo. Má nízký rozstřík a vyznačuje se velkým výkonem navaření 3-12 kg.hod<sup>-1</sup>. Využívá se pro svařování výplňových housenek u středních a velkých tloušťek materiálu. Svarová housenka je hladká a během svařování se sprchový přenos vyznačuje syčícím zvukem s občasným prasknutím.



### Impulsní bezzkratový oblouk

Pro snížení rozstříku a vad ve svařech byla vyvinuta metoda impulsní (obr. 12). Jedná se o zvláštní metodu bezzkratového přenosu, která má průběh řízen elektronickou cestou (mikroprocesorem svařovacího zdroje). Základní proud slouží k ionizaci plynu a tím vedení proudu. Tento proud je nízký od 20 do 50 A. V řízených intervalech se přechází na impulsní proud, který můžeme nastavovat. Umožňuje tak kontrolované odtavování kapek roztaveného kovu. Tento průběh se dá tvarově i časově měnit a může být pravouhlý, oblý nebo u digitálních



Obr. 12 Impulsní oblouk [9]

zdrojů různě tvarovaný podle druhu přídavného materiálu. Nastavovaný proud překrývá oblast zkratového i sprchového přenosu. Frekvence pulsů se běžně pohybuje mezi 25-500 Hz. Výhoda impulsního přenosu je nízký vnos tepla do základního materiálu při vysokém výkonu navaření ( $2-5 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ ). To způsobuje nižší deformace teplem. V důsledku vysokého emitovaného elektromagnetického záření je nutná vyšší ochrana svářeče a osob nacházejících se v blízkosti.

### ❖ Moderovaný bezzkratový přenos

Tento přenos kovu se pohybuje ve vysokých výkonech svařování. Svařovací proud je od 450 do 750 A a napětí v rozmezí od 40 do 50 V. Díky vysokému výkonu a velké rychlosti posuvu drátu, která se pohybuje od 20 do 45  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , se odtavují velké kapky kovu, které velkou rychlostí a frekvencí dopadají do tavné lázně. Kapky dosahují velikosti okolo průměru drátu. Tavná lázeň se vysokou rychlostí a velikostí kapek tvaruje do úzkého, hlubokého závaru. Jako ochranný plyn se používá směs argonu s 8 %  $\text{CO}_2$  a kvůli vysokým svařovacím parametrům je potřeba průtok plynu v rozmezí 18-25  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Výkon navaření dosahuje až  $25 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ , proto se metoda používá k svařování velkých tloušťek materiálu.

### ❖ Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu

Parametry svařování jsou podobné jako u moderovaného bezzkratového přenosu, liší se pouze ve velikosti napětí, které je u této metody vyšší a dosahuje až na hodnotu 65 V. Vlivem silového magnetického pole a délkou volného konce drátu, který může dosahovat vysunutí nad 20 mm, je tavící se drát roztáčen a kapky kovu tvoří při odtavování kuželovou plochu, proto rotující oblouk vytváří hluboký a široký svar.

### 3.2 Ochranné plyny [29], [30]

Důležitou součástí u svařování metodou MAG je ochranný plyn. Jeho úkol je chránit svar před vlivy okolní atmosféry, která způsobuje oxidaci svarového kovu a zhoršuje jeho mechanické vlastnosti. Dalším úkolem je svojí ionizační schopností zlepšit stabilní hoření oblouku a podpořit přenos tepelné energie. Pro metodu MAG se používají aktivní plyny, které se podílejí na chemických a metalurgických vlastnostech svarové lázně. Ochranné plyny ovlivňují vlastnosti způsobu přenosu kovu, hloubku závaru, množství rozstříku, rychlost svařování a stabilitu elektrického oblouku. Aktivní plyn je buď čistý oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) nebo směs plynů argonu a oxidu uhličitého, někdy s malým množstvím kyslíku. Základní rozdělení plynů je uvedeno v normě EN 439 (ČSN EN 439). Z důvodu velkého množství plynů a rozdílného označení mezi výrobcí bylo níže popsáno pouze několik nejčastějších ochranných svařovacích plynů.

#### ❖ Oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ )

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn, který je nehořlavý a těžší než vzduch. Má dobrou tepelnou vodivost a spolu s teplem získaným z exotermické oxidační reakce umožňuje hluboký průvar. Optimální oblast svařování je oproti směsným plynům užší a je tedy složitější nastavení svařovacích parametrů. Oxid uhličitý kvůli velkému povrchovému napětí, které se snaží udržet kapky na elektrodě, způsobuje značný rozstřík svarového kovu a tím zvyšuje náklady při čištění svařence. Další z nevýhod používání oxidu uhličitého je zamrzání redukčních ventilů, ke kterému dochází při odpařování a expanzi plynu, proto používáme redukční ventily s ohříváním plynu (obr. 13).



Obr. 13 Redukční ventil s ohříváním plynu [24]

#### ❖ Kyslík ( $\text{O}_2$ )

Kyslík je plyn, který podporuje oxidační hoření. Vyrábí se podobně jako argon nebo dusík, a to destilací z kapalného vzduchu. Přidává se zhruba 5 % do směsi argonu a oxidu uhličitého, protože zvyšuje povrchové napětí roztaveného kovu, tekutost svarové lázně a zlepšuje odplynění.

#### ❖ Směsný plyn Ar + 8 % $\text{CO}_2$

Plyn vhodný pro sprchový nebo impulsní přenos kovu. Napomáhá vysoké rychlosti svařování a vyznačuje se nízkým rozstříkem kovu.

❖ Směsný plyn Ar + 15 až 25 % CO<sub>2</sub>

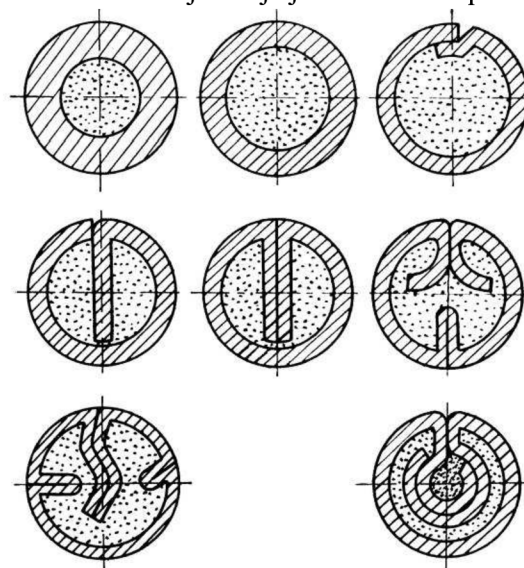
Nejpoužívanější plyn z této skupiny je Ar + 18 % CO<sub>2</sub>. Jedná se o univerzální plyn vhodný pro nelegované a nízkolegované oceli. Mezi jeho vlastnosti patří dobrá stabilita oblouku, hluboký závar a hladký povrch svaru. Je vhodný pro všechny tloušťky materiálu a umožňuje zkratový i sprchový přenos kovu.

❖ Směsný plyn Ar + 5 až 13 % CO<sub>2</sub> + 5 % O<sub>2</sub>

Tento plyn s obsahem kyslíku, který zlepšuje tekutost lázně a odplynění, se vyznačuje klidným svařovacím procesem s měkkým elektrickým obloukem. Používá se pro svařování malých a středních tlouštěk pro mechanizované nebo robotizované svařování. Svary v tomto ochranném plynu jsou čisté a hladké.

### 3.3 Přídavné materiály [21], [30]

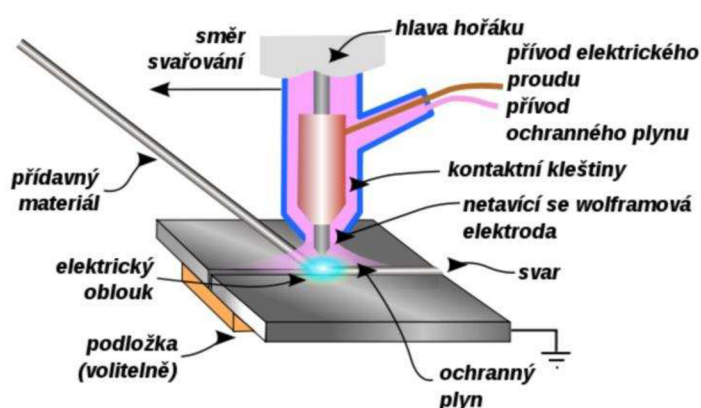
Metodou MAG je možné svařovat velké množství materiálů, kterým musí složením odpovídat i přídavný materiál. Forma přídavného materiálu je buď plný, nebo plněný drát, který se dodává navinutý na cívkách o hmotnosti od 5 do 30 kg. Drát dále obsahuje dezoxidující a legující prvky, které zlepšují vlastnosti svarového kovu, a zároveň doplňuje propálené prvky. Plný drát je vyráběn tažením za studena a nejčastěji je dodáván o průměru od 0,8 do 1,6 mm. Plněný drát (trubičkový drát, obr. 14) je vyroben svinutím tenkého nízkouhlíkového pásku plechu, který je spojen tvarovým stykem nebo svařením. Náplň trubičkového drátu jsou tavidla, struskotvorné přísady a kovový prášek s legujícími a dezoxidačními prvky. Trubičkové dráty se vyznačují dobrým natavováním svarových ploch, nižším nebezpečím vzniku studených spojů, nízkou náchylností na tvorbu trhlin, dobrými mechanickými vlastnostmi svarových spojů a možností dolegování a mikrolegování. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena. Při průchodu drátu mezi podavačem a svařovacím hořákem dochází ke tření, proto se často svařovací dráty poměďují, tím se tření sníží a zároveňlepší elektrická vodivost.



Obr. 14 Průřezy plněných (trubičkových) drátů [30]

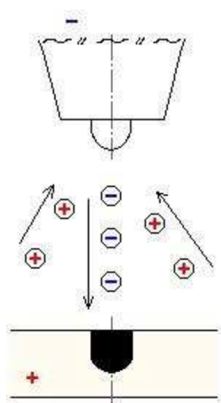
## 4 METODA TIG [22], [28], [30], [31]

Zkratka TIG (Tungsten Inert Gas) označuje metodu svařování netavící se wolframovou elektrodou v atmosféře inertního plynu (obr. 15). WIG (Wolfram Inert Gas) je zněmčina a označuje stejnou metodu. Při svařování hoří oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Aby nedocházelo k odtavování, musí elektroda být z materiálu, který odolá teplotám svařování, proto se používají wolframové elektrody, které mají teplotu tavení okolo 3380 °C. Elektrody se vyrábějí čisté bez příměsí nebo legované oxidy kovů. Upnuty jsou pomocí kleštiny ve svařovacím hořáku. Ochranný plyn je přiváděn pomocí hubice do místa svařování, kde vytváří inertní atmosféru, která chrání lázeň před přístupem vzduchu a zlepšuje zapálení oblouku. Jako ochranný plyn se u metody TIG používá argon, helium nebo směs těchto plynů. Svařovat můžeme roztavením a slitím základního materiálu nebo s přídavným materiálem, který je do svařovací lázně ve formě drátu přidáván ručně nebo automaticky podavačem drátu. Svařování touto metodou se dělí podle druhu svařovacího proudu na svařování stejnosměrným proudem a svařování střídavým proudem.



Obr. 15 Princip svařování metodou TIG [28]

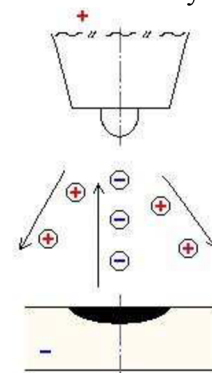
### 4.1 Svařování stejnosměrným proudem [30], [32]



Obr. 16 Přímé zapojení [32]

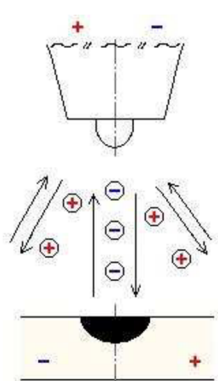
Při svařování stejnosměrným proudem se nejčastěji používá přímé zapojení (obr. 16), kde je elektroda připojena k zápornému pólu zdroje a svařovaný materiál na kladný pól. Teplota oblouku je rozdělena z jedné třetiny na elektrodu a ze dvou třetin na svařovaný materiál. Nedochází tak k tepelnému přetěžování elektrody a získáme více tepla pro tavení materiálu, které způsobí hluboký a úzký závar. Toto zapojení je vhodné pro svařování nízko legovaných i vysoko legovaných ocelí, nerezových ocelí, materiálů na bázi niklu, mědi, titanu a pro navařování tvrdých vrstev. Pro stabilní oblouk se funkční konec elektrody brousí do špičky a během broušení je nutné elektrodu orientovat tak, aby vzniklé stopy po broušení byly v podélném směru. U nepřímého zapojení (obr. 17), kde elektroda je zapojena na kladný pól a svařovaný materiál na záporný pól, dochází k velkému tepelnému namáhání elektrody a může dojít až k jejímu natavení.

Tato metoda se využívá jen velmi málo, a to ke svařování tenkých hliníkových konstrukcí z důvodu své schopnosti čistit materiál pomocí katodové skvrny, která se vytváří při hořícím oblouku na záporné elektrodě a pohybuje se do míst s nižší emisní energií, kde skvrna svojí energií odpařuje oxidy. Tomuto jevu napomáhá dynamický účinek oblouku, který proudem kladných iontů směrem do svarové lázně napomáhá rozbít vrstvu oxidu.



Obr. 17 Nepřímé zapojení [32]

## 4.2 Svařování střídavým proudem [30], [32]

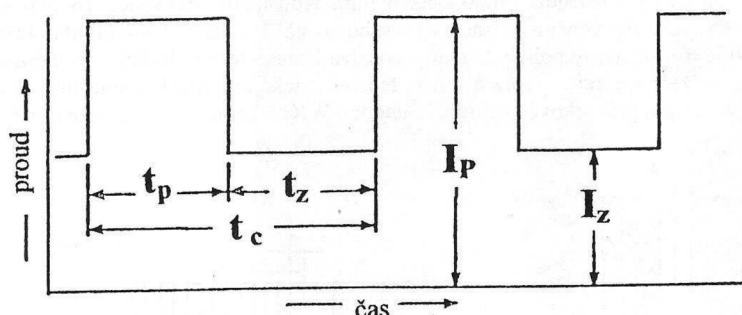


Obr. 18 Střídavá polarita [32]

U svařování střídavým proudem (obr. 18) dochází k periodickému střídání polarity. Díky tomu můžeme využívat výhod přímého i nepřímého zapojení. Přímé zapojení nám umožňuje materiál tavit a svařovat. Nepřímé zapojení čistí lázeň a narušuje vrstvu oxidu. Tento efekt se využívá při svařování hliníku, na kterém se vytváří vrstva oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tato vrstva má teplotu tavení okolo  $2050\text{ }^\circ\text{C}$  a brání metalurgickému spojení materiálu, protože pokrývá povrch roztaveného hliníku s teplotou tavení kolem  $658\text{ }^\circ\text{C}$ . Poměr mezi přímým a nepřímým zapojením můžeme měnit.

## 4.3 Svařování impulsním proudem [30], [32]

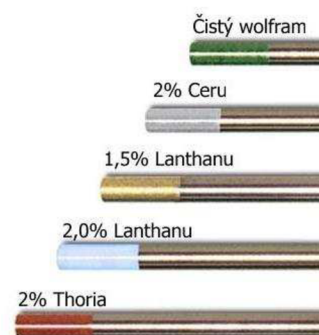
Pulsní svařování se používá u svařování stejnosměrným i střídavým proudem. Principem je pravidelná změna mezi základním proudem  $I_z$  a impulsním proudem  $I_p$  (obr. 19). Funkcí základního proudu je ionizovat a udržet oblouk po určenou dobu  $t_z$ . Tento proud je nižší a pohybuje se okolo 20-50 % impulsního proudu. Delší dobou  $t_z$  se může docílit úplného ztuhnutí svarové lázně, čehož se využívá u svařování vysokolegovaných ocelí. Kratší dobou se zmenší rozměry lázně a vytvoří hladký svar. Impulsní proud taví svarovou lázeň i přídavný materiál a trvá po dobu  $t_p$ . Velikost svarové lázně ovlivňuje amplituda impulsního proudu a doba trvání impulsu. Dochází tak k regulaci svařovacího režimu, který nám umožňuje dávkovat vnesené teplo do svařovaného materiálu. Hodnota svařovacího proudu u impulsní metody je nižší než u svařování konstantním proudem, proto bývá i menší tepelně ovlivněná oblast a deformace.



Obr. 19 Průběh impulsního proudu [30]

## 4.4 Netavící se elektrody [22], [30]

Netavící se elektroda (obr. 20) je podobná jehle a vyrábí se spékáním. Materiál je buď čistý wolfram (čistota 99,9 %) nebo wolfram s legurami oxidů kovů thoria (Th), lanthanu (La), ceru (Ce), zirkonu (Zr) nebo yttria (Y), které zvyšují životnost, zlepšují zapalování a stabilitu oblouku. Průměr elektrod je od 0,5 do 10 mm a délka 50 až 175 mm. Každá elektroda je na jednom konci barevně označena. Opotřebení je poznat podle otupení hrotu, proto je potřeba elektrodu pravidelně přebrušovat.



Obr. 20 Wolframové elektrody [34]

## 4.5 Ochranné plyny [8], [28], [30]

Pro metodu TIG se používají inertní plyny, které chrání elektrodu a svarovou lázeň před nežádoucími účinky okolní atmosféry, a to hlavně před oxidací a naplyněním. Slouží také pro snadnější zapalování a stabilní hoření oblouku. Plyny pro běžné svařování se používají v čistotě minimálně 99,995 %, ale materiály s vysokou afinitou ke kyslíku (titan, zirkon, tantal) vyžadují větší čistotu 99,999 %.

### ❖ Argon

Argon je jednoatomový inertní plyn, který nevytváří s žádným prvkem chemické sloučeniny. Díky jeho malé tepelné vodivosti a nízkému ionizačnímu potenciálu se elektrický oblouk snadno zapaluje a má i při velké délce oblouku dobrou stabilitu. Malý přechod tepla do okolí způsobuje úzký sloupec oblouku, který vytváří hluboký a úzký závar. Argon je vhodný pro všechny svařitelné materiály, proto je nejběžněji používaným plynem.

### ❖ Helium

Helium je inertní lehký plyn, který se vyrábí separací některých druhů zemních plynů. Pro jeho nízkou hmotnost je nutný vyšší průtok plynu, aby došlo k potřebné ochraně. Helium v porovnání s argonem má opačné vlastnosti, a to vyšší tepelnou vodivost a nižší ionizační potenciál, který způsobuje horší zapalování oblouku. Vysoká tepelná vodivost helia výborně přenáší teplo do svarové lázně a poskytuje široký profil závaru. Toho se využívá pro svařování materiálů s větší tloušťkou a vysokou tepelnou vodivostí (hliník, měď). V důsledku horší stability oblouku se helium používá spíše pro mechanizovaný způsob svařování.

### ❖ Směs argonu a helia

Směs argonu a helia se používá pro využití výhod obou plynů. Snadné zapalování oblouku u argonu a vysoký tepelný výkon oblouku u helia. Vyšší poměr helia ve směsi zvyšuje rychlost svařování a zvětšuje hloubku závaru. Nejčastěji používané směsi jsou 70 % Ar + 30 % He, 50 % Ar + 50 % He a 30 % Ar + 70 % He, které se dodávají už namíchané v tlakových lahvích.

## 4.6 Přídavné materiály [30], [31]

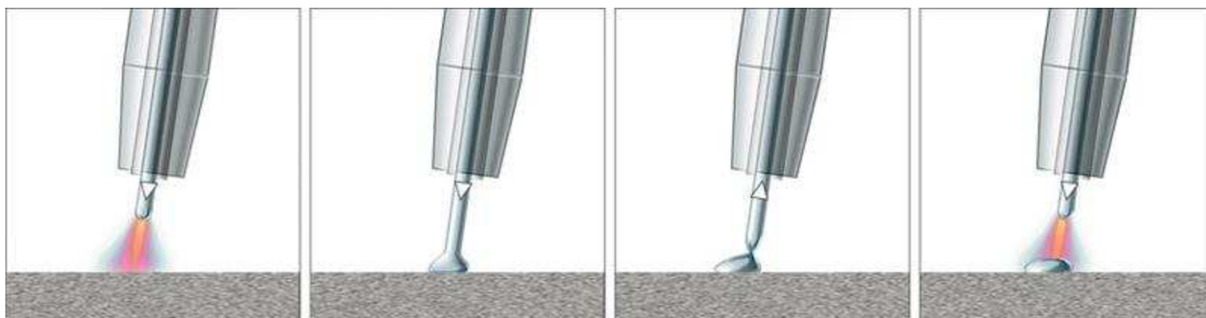
Přídavný materiál musí mít vhodné chemické složení. Má za úkol doplnit potřebný objem svarového kovu, dolegovat svarový kov a zlepšit tak jeho vlastnosti a dále zabezpečit dezoxidaci a odplynění. Pro ruční svařování se přídavný materiál používá ve formě tyček kruhového průřezu s průměrem od 1 do 8 mm a délce 600 až 1000 mm. Pro mechanizované svařování je drát o průměru od 0,6 do 2,4 mm navinut na cívce a pomocí podavače přiváděn do místa svaru (obr. 21).



Obr. 21 Podávání studeného drátu [1]

## 5 METODA CMT [2], [3], [30]

Zkratka CMT má význam Cold Metal Transfer a jedná se o modifikovanou metodu obloukového svařování v ochranné atmosféře (MIG/MAG, obr.22). Principem je střídání horké a studené fáze oblouku, kdy během horké fáze dochází ke zkratu a je taven přídavný a základní materiál. U studené fáze dochází ke snížení svařovacího proudu a zatahování drátu zpět do hořáku okamžitě potom, co svařovací zdroj identifikuje zkrat. Tím je podpořeno oddělení kapky bez rozstříku a do materiálu je vnášeno teplo jen po krátkou dobu hoření oblouku.



Obr. 22 Princip metody CMT [3]

Celý proces je digitálně řízený a probíhá až 90x za sekundu, proto je potřeba speciálního hořáku (obr. 23), který nám tento pohyb umožňuje. Hlavní podavač zajišťuje konstantní podávání drátu a pro vyrovnávání přídavných pohybů v obou směrech slouží tzv. pufrovací člen (absorbér). Metoda CMT umožňuje nízké tepelné zatížení a malé tepelné deformace, které snižují nároky na následné opracování. Jedna z největších výhod této metody je možnost spojování ocele s hliníkem. Jedná se o tzv. svarové pájení, kde ocelový materiál se pouze smáčí a hliníkový materiál je nataven. Dále je možné svařování velmi tenkých hliníkových plechů 0,3-0,8 mm bez podložky. Velké využití má tato metoda v automobilovém průmyslu, kde procesem MIG je možné realizovat pájené spoje pozinkovaných materiálů pomocí svařovacího drátu ze slitiny měď-křemík.



Obr. 23 Hořák pro metodu CMT [5]

## 6 EXPERIMENT

Porovnání tepelně ovlivněné oblasti metod svařování TIG, MAG a CMT bylo prováděno na dvou materiálech, nízkouhlíkové oceli a austenitické korozivzdorné oceli. Pro porovnání těchto metod byl zvolen jako konstantní parametr svařovací rychlost, která se odvíjela od nejpomalejší metody. Nejpomalejší v tomto experimentu byla metoda TIG. Na vzorcích o rozměrech 250x50 mm a tloušťce 2 mm byl proveden svar na tupo („I“) bez mezery. Vzorky byly zhotoveny metodou stříhání. Svařovací část experimentu probíhala v Praze ve firmě Fronius, která umožnila svaření vzorků pomocí jejich zařízení.

### ❖ Nízkouhlíková ocel [11], [18], [23]

Na vzorky byla zvolena ocel S235 JR, které odpovídá normě ČSN 11 375. Jedná se o neušlechtilou konstrukční uklidněnou ocel vhodnou ke všem obvyklým způsobům svařování. Ocel je používána na tavné svařování konstrukcí a strojů středních tlouštěk, které jsou namáhány staticky i dynamicky. Dále je ocel vhodná pro součásti podélně svařovaných dutých profilů, tlakových nádob pracujících s omezeným přetlakem, podtlakem a teplotou do 300 °C. Chemické složení hotového výrobku a mechanické vlastnosti pro tloušťku 2 mm jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu S235JR [23]

Materiál S235JR							
Maximální hodnoty chemického složení hotové tavby [%]						Minimální mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]
C	Mn	Si	P	S	N		
0,190	1,500	-	0,045	0,045	0,014	235	360-510

### ❖ Austenitická korozivzdorná ocel [7], [26], [35]

Zvolena byla ocel X5CrNi18-10, podle DIN 1.4301, které odpovídá normě ČSN 17 240. Jedná se o základní nerezavějící paramagnetickou austenitickou ocel obsahující 18 % chromu a 10 % niklu. Má vynikající odolnost proti korozi, kterou lze zvýšit povrchovým leštěním. Svařitelnost je zaručená a obrobitelnost ztížená. Použitelnost této oceli je do 350 °C v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Jedná se o nejvíce používanou nerezavějící ocel označovanou někdy jako potravinářskou. Chemické složení a mechanické vlastnosti pro tloušťku 2 mm jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu X5CrNi18-10 [35]

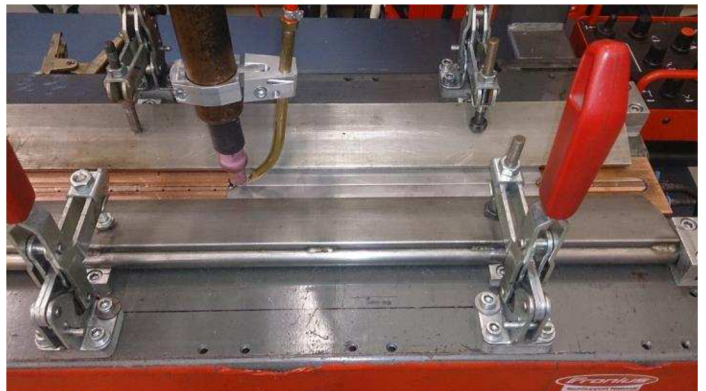
Materiál X5CrNi18-10							
Chemické složení tavby [%]							
C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
0,07	1,00	2,00	max 0,045	max 0,030	0,11	17,00-19,50	8,00-10,50
Mechanické vlastnosti							
Tvrdość [HB]	Smluvní mez kluzu Rp <sub>0,2</sub> [Mpa]			Mez pevnosti [Mpa]			
215	190			500-700			



## 6.1 Svařování metodou TIG

Vzorky pro metody TIG byly ručně na začátku a na konci nabodovány. Dalším krokem bylo upnutí vzorku do přípravku (Obr. 24). Tento přípravek se skládal z měděné chlazené desky, ve které byly otvory pro přívod formovacího plynu na ochranu kořene svaru a několika upínek.

Pohyb při svařování obstarávalo lineární polohovadlo Flextrack FOU 30/ML10, které umožňovalo nastavení konstantní svařovací rychlosti. Svařovací zdroj byl použit Magic Wave 3000 s podavačem studeného drátu KD 7000D-11 (obr. 25).



Obr. 24 Přípravek pro svaření vzorků metodou TIG

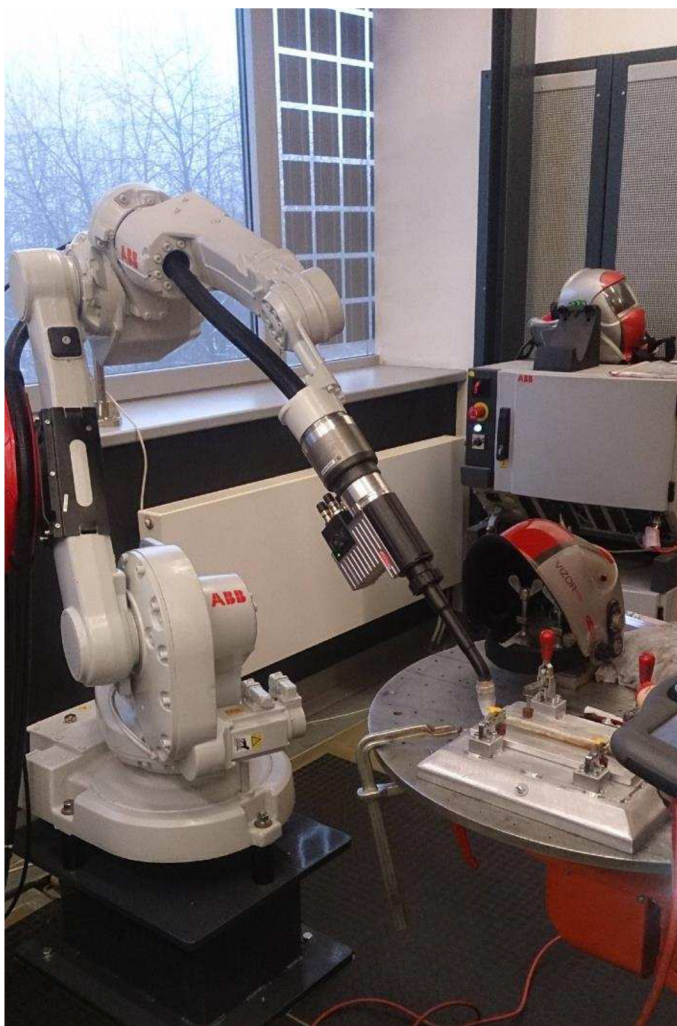


Obr. 25 Svařovací sestava

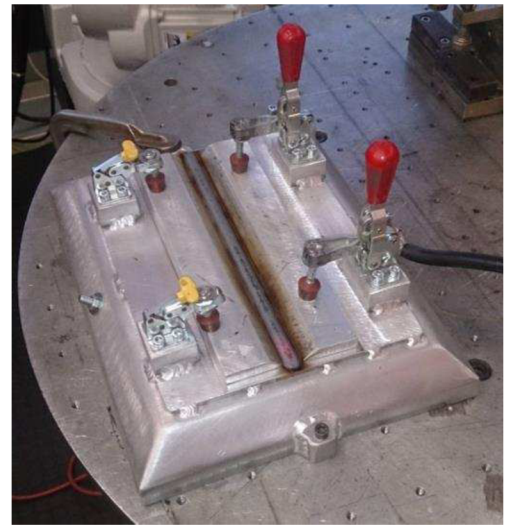
Pro zavaření prvního vzorku byli nastavované parametry odhadnuty. Po vizuální kontrole kořene svaru byl postupně navyšován výkon, dokud nedošlo k úplnému provaření. Tímto způsobem bylo postupováno u obou svařovaných materiálů. Všechny svařovací parametry u jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab. 4 a 5. Ochranný plyn byl použit čistý Argon pro oba materiály. Přídavný materiál byl pro nízkouhlíkovou ocel použit G3Si1 o průměru 1 mm a pro austenitickou korozivzdornou ocel CrNi 19 9 o průměru 1 mm. U této metody bylo docíleno svařovací rychlosti 40 cm/min, která byla použita pro ostatní metody.

## 6.2 Svařování metodou MAG a CMT

Vzorky pro metody MAG a CMT byly svařeny stejným zařízením CMT Advanced 4000 s podavačem drátu VR 7000CMT a dálkovým ovládním RCU 5000i, kde se měnilo pouze nastavení svařovacího režimu. U vzorků metodou MAG byl použit impulsní režim. Stejně jako u metody TIG byly vzorky na začátku a na konci ručně nabodovány a upnuty do přípravku (obr. 26). Svařovací pohyb obstarával robot od firmy ABB s označením IRB 1600x/1.45 (obr. 27).



Obr. 27 Svařovací robot ABB IRB 1600c/1.45



Obr. 26 Svařovací přípravek pro metody MAG a CMT

Nastavení souřadnic robota probíhalo ručním najetím na polohu a převzetím hodnoty. Následovalo svařování vzorků odhadnutými parametry s konstantní svařovací rychlostí 40 cm/min. Po vizuální kontrole kořene byli upraveny parametry svařování. Parametry svařování metodami CMT a MAG jsou uvedeny v tab. 4 a 5. U nízkouhlíkové ocele byl použit ochranný plyn M21 Ar + 18 % CO<sub>2</sub> s přídavným materiálem G3Si1 o průměru 1 mm. Ochranný plyn M12 Ar + 2,5 % CO<sub>2</sub> a přídavný materiál CrNi 19 9 o průměru 1 mm byl použit pro austenitickou korozivzdornou ocel.

Tab. 4 Parametry svařování nízkouhlíkové ocele

Parametry svařování: nízkouhlíková ocel tl. 2mm svařováno konstantní rychlostí 40cm/min							
Metoda svařování	Číslo vzorku	Proud [A]	Napětí [V]	Přísuv drátu [m.min <sup>-1</sup> ]	Přídavný materiál	Ochranný plyn	Poznámka
CMT	1	194	15,6	8,7	G3Si1/1 mm	M21 Ar+18 %CO <sub>2</sub>	-
PULS	1	80	19,5	3,9	G3Si1/1 mm	M21 Ar+18 %CO <sub>2</sub>	s korekcí oblouku
	2	80	19,5	3,9			-
TIG	1	170	11,7	0,6	G3Si1/1 mm	čistý Ar	-
	2	177	11,8	0,6			-
	3	177	12,0	0,6			chlazená lišta s moderovaným plynem

Tab. 5 Parametry svařování austenitické korozivzdorné ocele

Parametry svařování: austenitická korozivzdorná ocel tl. 2mm svařováno konstantní rychlostí 40cm/min							
Metoda svařování	Číslo vzorku	Proud [A]	Napětí [V]	Přísuv drátu [m.min <sup>-1</sup> ]	Přídavný materiál	Ochranný plyn	Poznámka
CMT	1	135	12,8	5,8	CrNi19 9/1 mm	M12 Ar+2,5 %CO <sub>2</sub>	-
	2	119	13,5	6,5			-
	3	110	13,2	5,8			-
PULS	1	86	18,0	4,0	CrNi19 9/1 mm	M12 Ar+2,5 %CO <sub>2</sub>	s korekcí oblouku
	2	86	18,0	4,0			-
TIG	1	145	10,8	0,5	CrNi19 9/1 mm	čistý Ar	-
	2	155	11,0	0,6			-
	3	165	11,2	0,6			-
	4	170	11,3	0,6			-

Z důvodu náročnosti přípravy pro makroskopickou kontrolu byl porovnáván pouze jeden vzorek od každé metody u obou materiálů. Byl to vždy vzorek s dostatečně provařeným kořenem a zároveň s nejnižšími svařovacími parametry (nejvyšší číslo vzorku u svařovací metody obr. 28 až 39). Vzorky byly dále připraveny pro porovnávání tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 28 Fotografie svaru austenitické korozivzdorné ocele metodou CMT



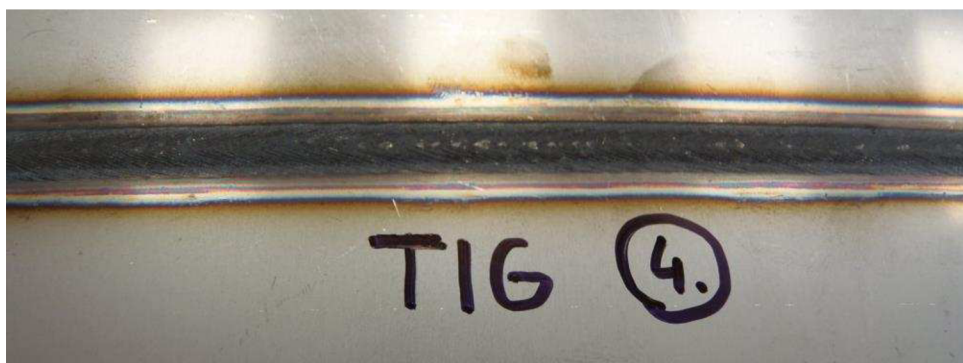
Obr. 29 Fotografie kořene svaru austenitické korozivzdorné ocele metodou CMT



Obr. 30 Fotografie svaru austenitické korozivzdorné ocele metodou MAG



Obr. 31 Fotografie kořene svaru austenitické korozivzdorné ocele metodou MAG



Obr. 32 Fotografie svaru austenitické korozivzdorné ocele metodou TIG



Obr. 33 Fotografie kořene svaru austenitické korozivzdorné ocele metodou TIG



Obr. 34 Fotografie svaru nízkouhlíkové ocele metodou CMT



Obr. 35 Fotografie kořene svaru nízkouhlíkové ocele metodou CMT



Obr. 36 Fotografie svaru nízkouhlíkové ocele metodou MAG



Obr. 37 Fotografie kořene svaru nízkouhlíkové ocele metodou MAG



Obr. 38 Fotografie svaru nízkouhlíkové ocele metodou TIG



Obr. 39 Fotografie kořene svaru nízkouhlíkové ocele metodou TIG

### 6.3 Příprava vzorků pro hodnocení TOO

Na porovnání a hodnocení tepelně ovlivněné oblasti bylo zapotřebí svařené vzorky připravit pro makroskopickou kontrolu pod mikroskopem. Rozměrově velké vzorky musely být nejprve ostříženy na padacích nůžkách, aby bylo možné je upnout do rozbrušovací pily na přípravu vzorků. Po ostřížení byly vzorky rozřezány na rozbrušovací pile Struers Labotom 5 (obr. 40), příčně na osu svaru, aby řez zahrnoval svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál.



Obr. 40 Rozbrušovací pila Struers Labotom 5 [17]



Obr. 41 Brousící zařízení ATA Saphir 330 [25]

Dalším krokem v přípravě bylo ohnutí vzorků z důvodu lepší stability při broušení. Ohnutí bylo provedeno na ruční ohýbačce. Následné broušení probíhalo pod vodou na zařízení ATA Saphir 330 (obr. 41), kde se postupovalo od brusného papíru se zrnitostí 800 až po zrnitost 1200.

Pro vyvolání makrostruktury bylo zapotřebí provést leptání vzorků. Leptadlem pro vzorky z nízkouhlíkové ocele byl 10 % Nital (obr. 42). Na vzorky z austenitické korozivzdorné ocele bylo použito leptadlo Marble (obr. 43). Leptání obou materiálů trvalo přibližně 15 minut. Následně byly vzorky omyty a usušeny.



Obr. 42 Leptání vzorků z nízkouhlíkové ocele



Obr. 43 Leptání vzorků z austenitické korozivzdorné ocele

## 6.4 Výpočet tepelného příkonu

Velikost tepelně ovlivněné oblasti má souvislost s velikostí tepelného příkonu (vneseného tepla), proto byl proveden výpočet u všech svařených vzorků. Dále pak bude výsledek porovnáván s velikostí TOO, která bude změřena pomocí mikroskopu u vybraných vzorků. Výpočet byl proveden podle vzorce 2.1. Koeficient tepelné účinnosti byl použit z tab.1. Pro výpočet byla potřeba svařovací rychlost převést z  $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$  na  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Výsledky jsou pro jednotlivé materiály uvedeny v tab. 5 a tab. 6. Vzorový výpočet bude proveden pro vzorek číslo 3 z austenitické korozivzdorné oceli metodou CMT, kde parametry svařování pro tento vzorek jsou uvedeny v tab. 4.

Tab.4 Parametry svařování pro vzorek č.3 z austenitické korozivzdorné oceli metodou CMT

Metoda svařování	Číslo vzorku	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Koeficient tepelné účinnosti [-]
CMT	3	110	13,2	6,67	0,8

Výpočet tepelného příkonu pro vzorek č.3 z austenitické korozivzdorné oceli metodou CMT:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} = 0,8 \cdot \frac{13,2 \cdot 110}{6,666666667} \cdot 10^{-3} = 0,17424 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- kde: Q – množství tepla přivedeného do svarového spoje na jednotku délky [ $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ ],  
k – koeficient tepelné účinnosti metody svařování [-] (tab. 1),  
U – napětí při svařování [V],  
I – intenzita svařovacího proudu [A],  
v – rychlost svařování [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Tab. 5 Parametry a hodnoty tepelného příkonu pro nízkouhlíkovou ocel

Výpočet tepelného příkonu: nízkouhlíková ocel tl. 2 mm svařováno konstantní rychlostí $40 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$				
Metoda svařování	Číslo vzorku	Proud [A]	Napětí [V]	Tepelný příkon [ $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ ]
CMT	1	194	15,6	0,3632
PULS	1	80	19,5	0,1872
	2	80	19,5	0,1872
TIG	1	170	11,7	0,1790
	2	177	11,8	0,1880
	3	177	12,0	0,1912



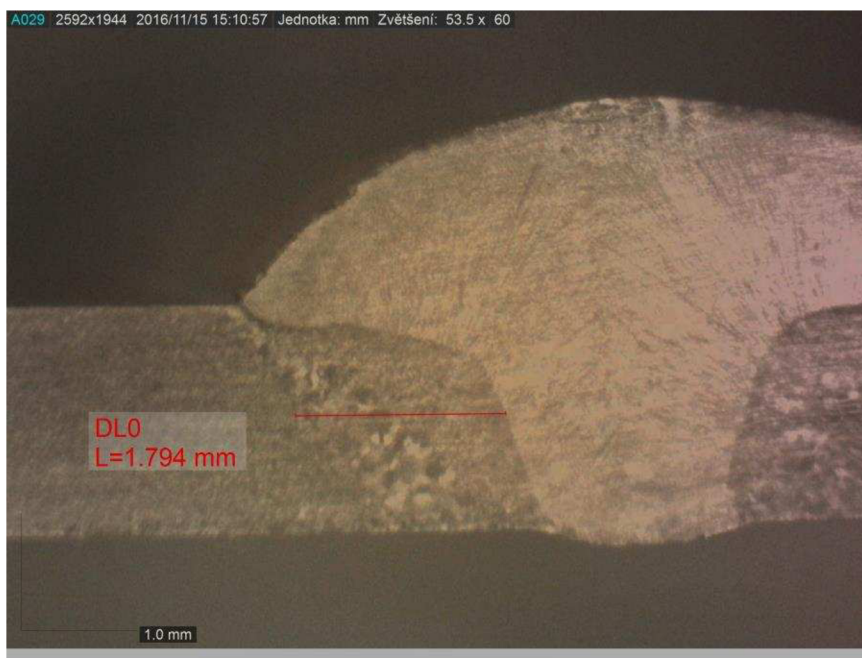
Tab. 6 Parametry a hodnoty tepelného příkonu pro austenitickou korozivzdornou ocel

<b>Výpočet tepelného příkonu:</b> austenitická korozivzdorná ocel tl. 2 mm svařováno konstantní rychlostí 40 cm.min <sup>-1</sup>				
Metoda svařování	Číslo vzorku	Proud [A]	Napětí [V]	Tepelný příkon [kJ.mm <sup>-1</sup> ]
CMT	1	135	12,8	0,2074
	2	119	13,5	0,1928
	3	110	13,2	0,1742
PULS	1	86	18,0	0,1858
	2	86	18,0	0,1858
TIG	1	145	10,8	0,1409
	2	155	11,0	0,1535
	3	165	11,2	0,1663
	4	170	11,3	0,1729

## 6.5 Velikost tepelně ovlivněné oblasti

Velikost tepelně ovlivněné oblasti byla měřena pomocí programu Dino Capture 2.0 na snímku vytvořeném mikroskopem SSM-5E od firmy SCHUT a kamery Dino-Eye Eyepiece. Zvětšení mikroskopu bylo nastaveno na 53,5 x. Focena byla vždy levá i pravá část svaru, kde byla měřena přibližně největší část TOO.

- Austenitická korozivzdorná ocel, metoda CMT, vzorek č.3



Obr. 44 Makroskopický snímek levé části svaru, metoda CMT, vzorek č.3

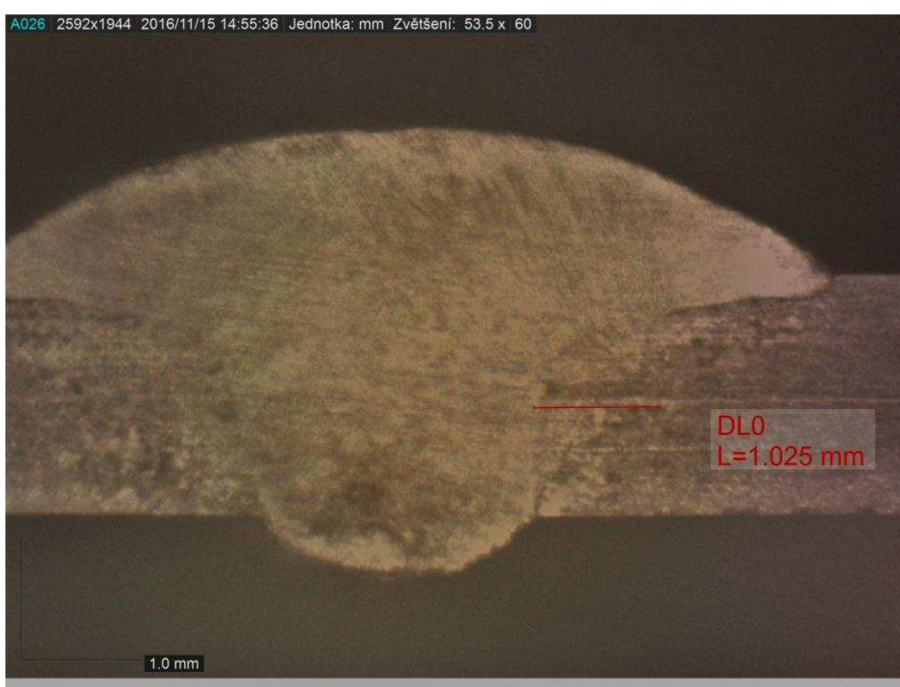


Obr. 45 Makroskopický snímek pravé části svaru, metoda CMT, vzorek č.3

- Austenitická korozivzdorná ocel, metoda MAG PULS, vzorek č.2

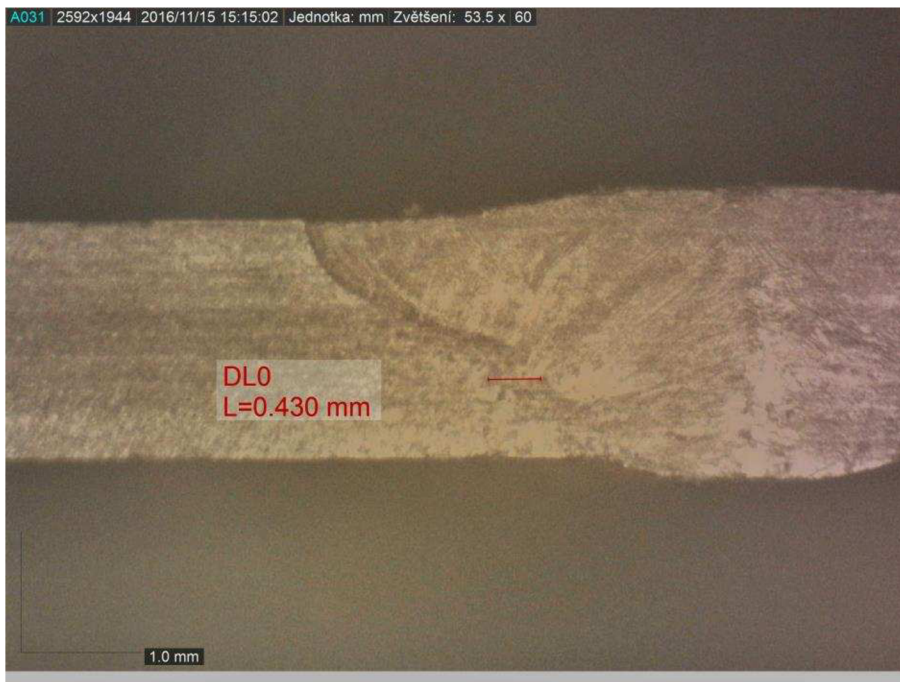


Obr. 46 Makroskopický snímek levé části svaru, metoda MAG PULS, vzorek č.2

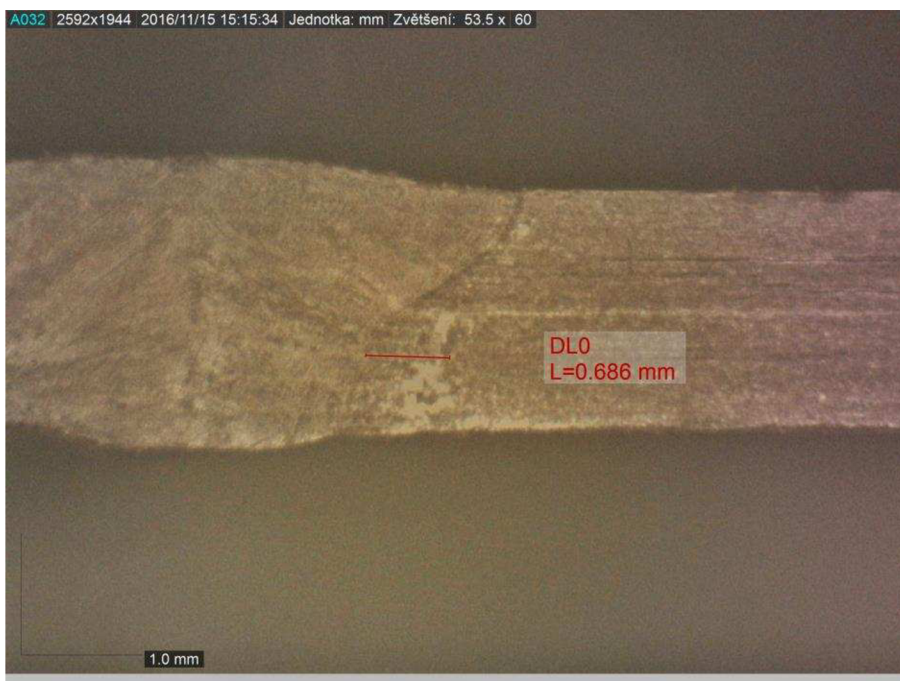


Obr. 47 Makroskopický snímek pravé části svaru, metoda MAG PULS, vzorek č.2

- Austenitická korozivzdorná ocel, metoda TIG, vzorek č.4



Obr. 48 Makroskopický snímek levé části svaru, metoda TIG, vzorek č.4

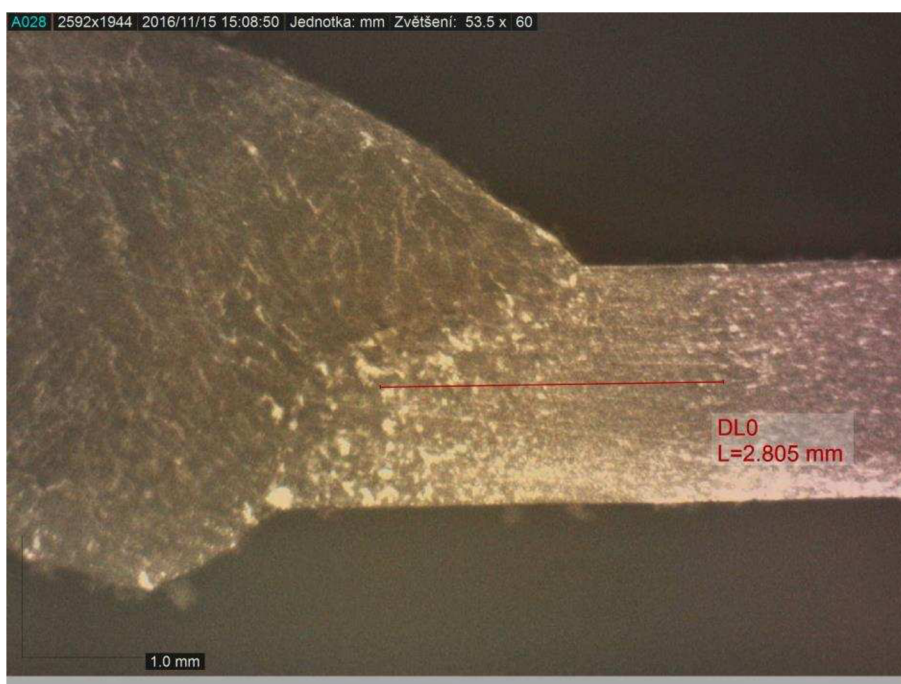


Obr. 49 Makroskopický snímek pravé části svaru, metoda TIG, vzorek č.4

- Nízkouhlíková ocel, metoda CMT, vzorek č.1



Obr. 50 Makroskopický snímek levé části svaru, metoda CMT, vzorek č.1

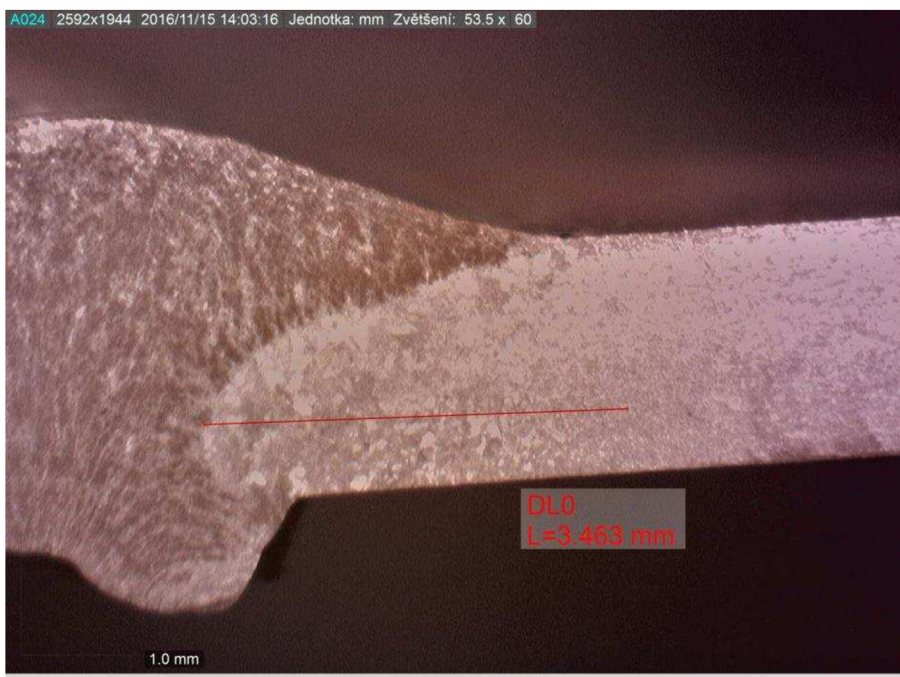


Obr. 51 Makroskopický snímek pravé části svaru, metoda CMT, vzorek č.1

- Nízkouhlíková ocel, metoda MAG PULS, vzorek č.2



Obr. 52 Makroskopický snímek levé části svaru, metoda MAG PULS, vzorek č.2

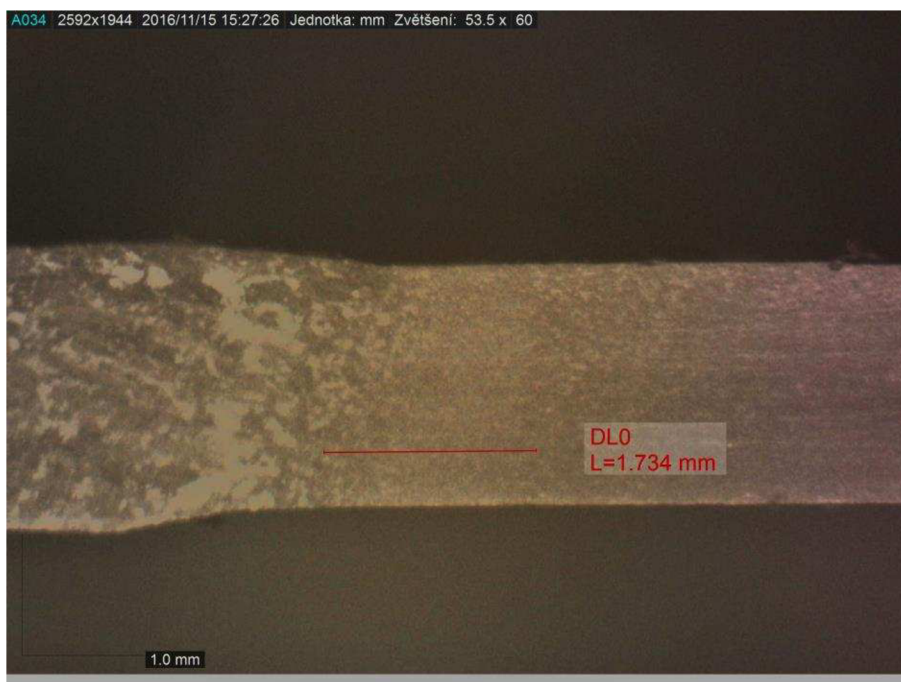


Obr. 53 Makroskopický snímek pravé části svaru, metoda MAG PULS, vzorek č.2

- Nízkouhlíková ocel, metoda TIG, vzorek č.3



Obr. 54 Makroskopický snímek levé části svaru, metoda TIG, vzorek č.3



Obr. 55 Makroskopický snímek pravé části svaru, metoda TIG, vzorek č.3

Tab. 7 Velikost TOO a tepelný příkon vzorků

Austenitická korozivzdorná ocel				
Metoda	Vzorek	Velikost TOO levé části svaru [mm]	Velikost TOO pravé části svaru [mm]	Tepelný příkon [kJ.mm <sup>-1</sup> ]
CMT	3	1,794	1,447	0,1742
MAG PULS	2	1,417	1,025	0,1858
TIG	4	0,430	0,686	0,1729
Nízkouhlíková ocel				
Metoda	Vzorek	Velikost TOO levé části svaru [mm]	Velikost TOO pravé části svaru [mm]	Tepelný příkon [kJ.mm <sup>-1</sup> ]
CMT	1	3,236	2,805	0,3632
MAG PULS	2	3,759	3,463	0,1872
TIG	3	1,704	1,734	0,1912

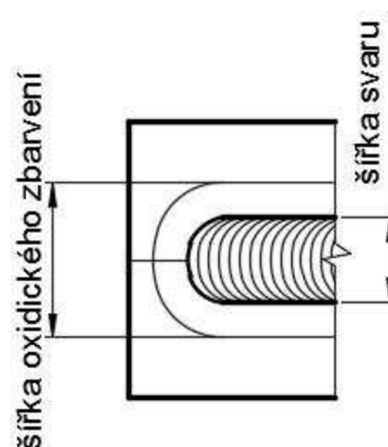
U austenitické korozivzdorné oceli je na snímcích (obr. 44 až 49) vidět, že kolem svarového kovu je oblast zhrublého zrna, která přes velmi malou oblast jemnozrné struktury přechází do struktury základního materiálu. Dále je vidět dendritická struktura svarového kovu, která je nejlépe vidět na snímku od metody CMT (obr. 44 a 45). Tato dendritická struktura bývá typická pro nízkou svařovací rychlost, protože kov tuhne směrem k povrchu svaru.

Nízkouhlíková ocel (obr. 50 až 55) má také pásmo zhrublé struktury, které přechází do poměrně velkého pásma jemnozrné struktury oproti korozivzdorné oceli. Jemnozrnnost může být způsobena krátkou dobou setrvání nad teplotou  $A_{c3}$  a teplotou nižší, než je teplota přehřátí, proto zřejmě zrna nestihla zhrubnout. Tato část by se vyznačovala dobrými mechanickými vlastnostmi. Na pásmo s jemnozrnnou strukturou plynule navazuje struktura základního materiálu. Nízkouhlíková ocel má v porovnání s korozivzdornou ocelí větší velikost TOO, což může být způsobeno chemickým složením a rozdílnou tepelnou vodivostí materiálů.



## 6.6 Šířka oxidického pásma

Šířka oxidického pásma byla měřena na vzorcích, které byly vybrány pro porovnávání TOO. Měření bylo provedeno pomocí digitálního posuvného měřítka. Šířka oxidického pásma byla měřena na rozhraní fialově zbarveného povrchu a barvou základního materiálu. Pro srovnání metod byla navíc změřena i šířka svaru a porovnáván byl rozdíl mezi velikostí oxidického zbarvení a velikostí svaru (obr. 56). Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 8 a tab. 9.



Obr. 56 Schéma měření oxidického zbarvení

Tab. 8 Šířka oxidického pásma pro nízkouhlíkovou ocel

Šířka oxidačního pásma Materiál: nízkouhlíková ocel			
Vzorek:	Šířka svaru [mm]	Šířka oxidačního zbarvení [mm]	Rozdíl šířek [mm]
CMT č.3	8,9	21,0	12,1
PULS č.2	8,2	24,6	16,4
TIG č.4	7,1	15,3	8,2

Tab. 9 Šířka oxidického pásma pro austenitickou korozivzdornou ocel

Šířka oxidačního pásma Materiál: austenitická nerez ocel			
Vzorek:	Šířka svaru [mm]	Šířka oxidačního zbarvení [mm]	Rozdíl šířek [mm]
CMT č.3	6,9	14,8	7,9
PULS č.2	7,2	14,4	7,2
TIG č.4	6,7	12,9	6,2

Velikost oxidického pásma u nízkouhlíkové oceli je daleko větší než u korozivzdorné oceli. To je způsobeno rozdílnou tepelnou vodivostí. Pro uhlíkové oceli je tepelná vodivost kolem  $45$  až  $55 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Pro austenitické chrom-niklové oceli je tepelná vodivost okolo  $18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Z tohoto důvodu se teplo v nízkouhlíkových ocelích může šířit rychleji a oxidační pásmo je tak větší.

Rozdíl velikosti oxidického pásma mezi svařovacími metodami pro nízkouhlíkovou ocel je nejspíše způsoben velikostí napětí při svařování, které ovlivňuje šířku tepelného ovlivnění v povrchové vrstvě. Velikost napětí a šířka oxidického zbarvení jsou uvedeny v tab. 10. U korozivzdorné oceli z důvodu nižší tepelné vodivosti nejsou příliš velké rozdíly ve velikosti oxidického pásma.

Tab. 10 Hodnoty napětí a šířky oxidického zbarvení pro nízkouhlíkovou ocel

Metoda	CMT	MAG PULS	TIG
Napětí [V]	15,6	19,5	12,0
Šířka oxidického zbarvení [mm]	21,0	24,6	15,3

## 6.7 Zhodnocení experimentu

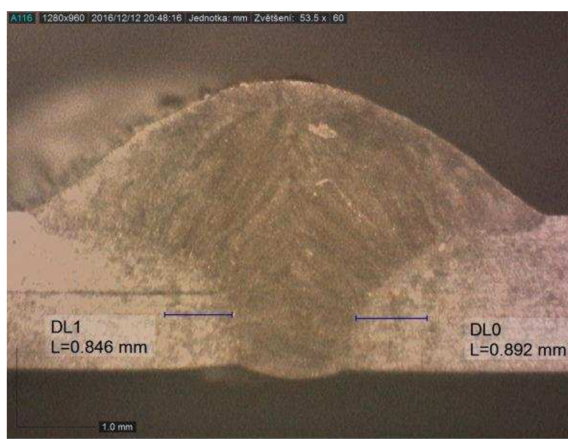
V experimentu byly porovnávány metody při konstantní rychlosti svařování. U metody TIG byla svařovací rychlost optimální, a proto tepelný příkon a velikost tepelně ovlivněné oblasti byla oproti ostatním metodám malá. Pro metody CMT a MAG v režimu PULS by optimální rychlost byla mnohem větší. Z tohoto důvodu byla provedena druhá část experimentu, kde byly pouze metodou CMT zavařeny nové vzorky. Použity byly vzorky ze stejného materiálu o stejné tloušťce a rozměrech. Svařování bylo provedeno optimální rychlostí tak, aby byl dostatečně provařený kořen. Parametry svařování a vypočítaný tepelný příkon je uveden v tab. 11. Dále byly zavařené vzorky připraveny na makroskopické snímky, které jsou na obr. 57 a 58.

Tab. 11 Parametry svařování a tepelný příkon pro optimální podmínky metodou CMT

Metoda CMT optimální svařovací rychlost				
Materiál:	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Tepelný příkon [kJ.mm <sup>-1</sup> ]
Nízkouhlíková ocel	250	16,0	20	0,1600
Austenitická korozivzdorná ocel	207	16,7	19	0,1456



Obr. 57 Makroskopický snímek svaru nízkouhlíkové oceli optimálními parametry metodou CMT



Obr. 58 Makroskopický snímek svaru austenitické korozivzdorné oceli optimálními parametry metodou CMT

Z makroskopického snímku (obr. 57) je vidět, že u nízkouhlíkové oceli, při optimálních parametrech metodou CMT není tepelně ovlivněná oblast. Svar byl přitom správně provařený. U austenitické korozivzdorné oceli je na snímku (obr. 58) vidět malá tepelně ovlivněná oblast, kde zhrublo zrno. Na levé straně svaru byla naměřena velikost 0,846 mm a na pravé straně 0,892 mm. Tepelně ovlivněnou oblast by bylo možné zmenšit, kdyby u tupého („I“) svaru byla použita mezera mezi vzorky. Díky tomu by při stejných svařovacích parametrech, bylo možné provařit kořen za vyšší svařovací rychlosti. Z tohoto důvodu by byl menší tepelný příkon a menší TOO.

## ZÁVĚR

V práci byla porovnávána tepelně ovlivněná oblast tří metod svařování TIG, MAG a CMT. Metoda MAG byla v impulsním režimu. Svařována byla austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 a nízkouhlíková ocel S235JR. Vzorky o velikosti 250x50 mm a tloušťce 2 mm byly svařeny tupým svarem bez mezery. Svařovací pohyb vykonával robot nebo lineární polohovadlo kvůli konstantnímu průběhu svařovací rychlosti.

U svaru, kde pro všechny metody byla použita svařovací rychlost  $40 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  má nejlepší výsledky metoda TIG, která měla nejmenší TOO u obou materiálů. U této metody byla svařovací rychlost optimální. Pro nízké svařovací rychlosti se metoda TIG u materiálů o tloušťce 2 mm jeví jako nejvhodnější. Metody CMT a MAG byly nízkou rychlostí znehodnoceny, jelikož docházelo k velkému převýšení svaru. Při použití nižších svařovacích parametrů (napětí a proud), však nedošlo k dostatečnému provaření kořene. Porovnáme-li metody CMT a MAG zjistíme, že u austenitické korozivzdorné oceli je u metody CMT menší tepelný příkon, ale o trochu větší TOO, což u méně tepelně vodivého materiálu způsobuje vyšší svařovací proud oproti metodě MAG. U nízkouhlíkové oceli má metoda CMT velký tepelný příkon, ale menší tepelně ovlivněnou oblast ve srovnání s metodou MAG. Metoda CMT střídá horkou a studenou fázi, a proto je materiál schopen s velkou tepelnou vodivostí dostatečně odvádět teplo během studené fáze. To se projevuje menší TOO.

Svary v druhé části experimentu metodou CMT za optimální svařovací rychlosti měly velmi dobré výsledky. Bylo docíleno správného provaření základního materiálu i kořene. Tepelný příkon byl pro oba materiály menší než u metod v první části experimentu, avšak velikost TOO byla u austenitické korozivzdorné oceli o trochu větší než u metody TIG. U nízkouhlíkové oceli, která má dobrou tepelnou vodivost a dokáže dostatečně odvést teplo, nevznikla TOO žádná.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Aplikátor studeného drátu TIG 301/321 pro CWF Multi. Migatronic [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://shop.migatronic.cz/hlavni-oddeleni/kategorie/prislusenstvi/zdroje/tig-wig/aplikator-na-tig-301321-pro-cwf-multi?=980>
2. CMT. Fronius [online]. c2006-2017 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-52F3AE57-8FB57144/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_3917.htm#.WPn0ZvmLTIV](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-52F3AE57-8FB57144/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3917.htm#.WPn0ZvmLTIV)
3. CMT: tři písmena za kterými se ukrývá nejstabilnější svařovací proces na světě. Fronius [online]. c2016-2017 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-765FF007-EFB173D2/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_10724.htm#.WPn0XvnyjIV](https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-765FF007-EFB173D2/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_10724.htm#.WPn0XvnyjIV)
4. DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 8021426837.
5. Fronius rozšiřuje svařovací zdroj TPS/i o proces CMT. *Autoservis magazín* [online]. 2016 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.autoservismagazin.cz/aktuality/2016-12-16-spolecnost-fronius-rozsiruje-svarovaci-zdroj-tpsi-o-svarovaci-proces-cmt#prettyPhoto>
6. HALLA, Petr. Použití technických plynů pro výrobky z vysokopevnostních ocelí. *Konstrukce* [online]. 2016 [cit. 2017-04-21]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pouziti-technickyh-plynu-pro-vyrobky-z-vysokopevnostnich-oceli/>
7. Charakteristika nerezových ocelí. *ALU KÖNIG FRANKSTAHL* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.akfs.cz/akfs/index.php?menu=234>
8. CHUDÍK, Ivan. Výběr ochranných plynů pro obloukové svařování. *Konstrukce* [online]. 2008 [cit. 2017-04-21]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vyber-ochrannych-plynu-pro-obloukove-svarovani/>
9. Impuls – odborné svařování materiálů CrNi, hliník a měď. Ewm group [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.ewm-group.cz/impuls/>
10. Invertec STT II. CZ WELD s.r.o. [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [http://www.czweld.cz/z\\_stt2.htm](http://www.czweld.cz/z_stt2.htm)
11. Jakosti ocelí. Feromat [online]. Brno, c2010 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)
12. Kompletace, svařování a výsuny ocelové konstrukce mostu přes Lochkovské údolí. *Silnice železnice* [online]. 2009 [cit. 2017-04-21]. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/kompletace-svarovani-a-vysuny-ocelove-konstrukce-mostu-pres-lochkovske-udoli/>

13. KOUKAL, Jaroslav. Historie tavného svařování kovů. Konstrukce [online]. 2002 [cit. 2017-04-21]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/historie-tavneho-svarovani-kovu/>
14. KOUKAL, Jaroslav a kolektiv. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1vyd. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
15. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 9788024820255.
16. KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. ISBN 04-211-86.
17. LABOTOM-5/-15. Struers [online]. c2017 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.struers.com/en-GB/Products/Cutting/Cutting-equipment/Labotom>
18. Materiálové normy. Ferona [online]. c2004-2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)
19. MIG/MAG svařování. Fronius [online]. 0017n. 1. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-319A3BBF-0A8F5968/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_3916.htm#.WPnFcvnyjIU](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-319A3BBF-0A8F5968/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3916.htm#.WPnFcvnyjIU)
20. PILOUS, Václav. Tepelné zpracování konstrukcí svařených z normalizačně žíhaných a normalizačně válcovaných ocelí S235 a S355 ve shodě s ČSN EN ISO 17663. Konstrukce [online]. 2012 [cit. 2017-04-21]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/tepelne-zpracovani-konstrukci-svarenych-z-normalizacne-zihanych-a-normalizacne-valcovanych-oceli-s235-a-s355-ve-shode-s-cs-en-iso-17663/>
21. Plněné elektrody (trubičkové dráty). Linde Gas a.s. [online]. c2008 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.linde-profihaus.cz/nabidka/svarovaci-technika/materialy-pro-svarovani/plnene-elektrody-trubicke-draty.htm>
22. Popis svařování hliníku metodou TIG/WIG. *Kovo Dvořák* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.kovodvorak.cz/tig.php>
23. Přehled vlastností oceli S235JR. Bolzano [online]. Kladno, c2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
24. Redukční ventily. *Svářečky-obchod* [online]. c2008-2017 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://www.svarecky-obchod.cz/prislusenstvi/redukcni-ventily/869-redukcni-ventil-s-ohrevem-24v.htm>
25. Saphir 330 Polisher/Grinders. Metprep [online]. c2017 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://metprep.co.uk/product/saphir-330-polishergrinders/>

26. Specifikace nerezových materiálů. Armat [online]. c1994-2016 [cit. 2017-05-13].  
Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
27. Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. ELUC [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1807>
28. Svařování TIG – základní seznámení. *Svářečky*-elektrody [online]. [cit. 2017-04-21].  
Dostupné z: <http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-124>
29. Technické plyny pro svařování a dělení materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technicke-plyny-pro-svarovani-a-deleni-materialu.html>
30. Technologie II.-svařování: Díl 1 Základní metody tavného svařování. Odbor technologie *svařování a povrchových úprav* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
31. TIG svařování I – základní principy. Svarinfo [online]. 2009 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>
32. TIG svařování II – AC nebo DC. Svarinfo [online]. 2009 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008122801>
33. Volvo expanduje v Asii za pomoci nástrojů digitální továrny. *Konstruktor* [online]. 2015 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.konstruktor.cz/2015/02/06/volvo-expanduje-v-asii-za-pomoci-nastroju-digitalni-tovarny/>
34. Wolframové elektrody. *Centrum nářadí* [online]. c2011-2017 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.centrum-naradi.cz/e-shop/svarovaci-technika/6-horaky/62-tig/wolframove-elektrody/>
35. X5CrNi18-10: Materiálové listy. Bolzano [online]. Kladno, c2017 [cit. 2017-05-13].  
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>
36. ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. Brno: Vysoké učení technické, 1988. ISBN 55-573-88.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>Symbol</b>	<b>Popis</b>	<b>Jednotka</b>
Ac <sub>1</sub>	překrystalizační teplota	[°C]
Ac <sub>3</sub>	překrystalizační teplota	[°C]
ARA	anizotermický diagram rozpadu austenitu	[-]
CMT	cold metal transfer	[-]
I	svařovací proud	[A]
I <sub>p</sub>	impulsní proud	[A]
I <sub>z</sub>	základní proud	[A]
k	koeficient tepelné účinnosti	[-]
MAG	metal active gas	[-]
Q	tepelný příkon	[kJ.mm <sup>-1</sup> ]
t <sub>c</sub>	celkový čas impulsního cyklu	[s]
t <sub>p</sub>	doba trvání pulsního proudu	[s]
t <sub>z</sub>	doba trvání základního proudu	[s]
t <sub>8/5</sub>	doba chladnutí z 800 °C na 500 °C	[s]
TIG	tungsten inert gas	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
U	svařovací napětí	[V]
v	svařovací rychlost	[mm.s <sup>-1</sup> ]
WIG	wolfram inert gas	[-]