VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ PRODUKTIVITY TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ MAG A FCAW
COMPARISON OF THE WELDING PRODUCTIVITY MAG AND FCAW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Petr Kutil

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Petr Kutil**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Jaroslav Kubíček**
Akademický rok:	2018/19

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 produktivity technologie svařování MAG a FCAW

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování plněnou elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu FCAW (136) je vysoce produktivní metoda. Úkolem práce je porovnání metody 136 a svařování MAG (135) z hlediska kvality, času a ekonomiky (porovnání ceny elektrod, náročnosti svařování, výkonu navaření, a produktivity).

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod s rozborem využití obloukových metod svařování
2. Literární studie technologie MAG (metoda 135) a technologie FCAW (metoda 136)
3. Návrh a provedení experimentální práce
4. Vyhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.

FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFER, Věra OLŠANOVÁ, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír, SCHWARZ a Július VESELKO. Materiály a jejich svařitelnost. 2 vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

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

OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6,: vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosťmateriálov. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. :il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

KUTIL Petr: Porovnání produktivity technologie svařování MAG a FCAW.

Tato práce je zaměřena na obloukové svařování metodami MAG a FCAW. První část obsahuje stručný popis těchto technologií. Důraz je kladen na princip obloukového svařování v aktivním ochranném plynu a na přídavné materiály, zejména na plné a plněné svařovací dráty. Druhá, experimentální část, je zaměřena na porovnání metod MAG (135) a FCAW (136 a 138) z hlediska produktivity, nákladnosti a v neposlední řadě i kvality koutových svarů zhotovených v poloze svařování PF. Na základě vypočtených a naměřených hodnot získaných z experimentu byla vybrána nejvhodnější metoda pro danou polohu svařování.

Klíčová slova: obloukové svařování, MAG, FCAW, produktivita svařování, koutový svar, poloha svařování PF, plněný drát

ABSTRACT

KUTIL Petr: Comparison of the welding productivity MAG and FCAW.

This thesis is focused on arc welding with MAG and FCAW methods. The first part contains a brief description of these technologies. Emphasis is laid on the principle of arc welding in active shielding gas and on additional materials, especially on solid and flux-cored tubular wires. The second, experimental part, centres on the comparison of MAG (135) and FCAW (136 and 138) methods in terms of the productivity, costs and, last but not least, the quality of fillet welds made in PF welding position. Based on the calculated and measured figures obtained from the experiment, the most suitable method for the given welding position was chosen.

Keywords: arc welding, MAG, FCAW, welding productivity, fillet weld, PF welding position, flux-cored tubular wire

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUTIL, Petr. *Porovnání produktivity technologie svařování MAG a FCAW* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117315. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce 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 …… dne 24.5.2019

……
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům firmy ESAB Vamberk, s.r.o. za odborné konzultace a pomoc při zhotovení praktické části. V neposlední řadě patří velké díky mé rodině, která mě během bakalářského studia jak finančně, tak morálně podporovala.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

Str.

ÚVOD 9

1 ROZBOR ZADÁNÍ 10

2 SVAŘOVÁNÍ METODOU MAG 11
2.1 Princip svařování metodou MAG 12
2.2 Elektrický oblouk 13
2.3 Parametry svařování 14
2.4 Přenos kovu v oblouku 16
2.5 Metalurgické reakce 18
2.6 Přídavné materiály 19
2.7 Ochranné plyny a jejich chemické účinky 21
2.8 Zařízení pro svařování metodou MAG 23

3 SVAŘOVÁNÍ METODOU FCAW 25
3.1 Plněné dráty 26
3.2 Podmínky a parametry svařování metodou FCAW 28

4 NÁVRH A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI 29
4.1 Volba základního a přídavných materiálů 29
4.2 Použitá zařízení 30
4.3 Vlastní provedení experimentu 31

5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI 36
5.1 Porovnání z hlediska produktivity 36
5.2 Porovnání z hlediska nákladnosti 39
5.3 Porovnání z hlediska kvality 41

6 ZÁVĚRY 44

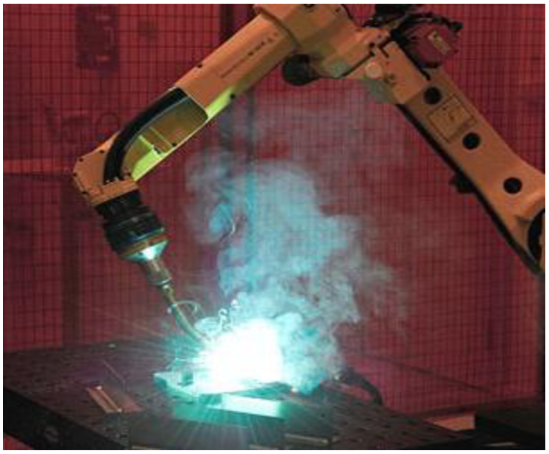
Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam obrázků
Seznam tabulek a příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Svařování je jednou ze stěžejních strojírenských technologií. Vedle obrábění, tváření a slévárenství zaujímá nenahraditelnou pozici v oblasti úpravy a zpracování zejména kovových materiálů. Svařování v sobě spojuje celou řadu vědních disciplín, jako je metalurgie, fyzika, matematika, nauka o materiálech, chemie nebo mechanika. Zvládnutí těchto oborů umožňuje úplné využití této technologie, jejímž hlavním cílem je vytvoření nerozebíratelného spoje. Svařováním vznikají nejrůznější konstrukce, polotovary nebo součásti, které by se jinými strojírenskými technologiemi vyráběly jen velmi složitě.

Historie svařování sahá až do starověku, kdy se pomocí tlakového svařování vyráběly různé šperky nebo mince, ovšem z dnešního pohledu byl nejdůležitější až objev obalené elektrody se stabilním hořením oblouku na počátku 20. století. Během tohoto století se pole působnosti svařování neuvěřitelně rozšířilo a zdokonalily se i jeho průmyslové aplikace.

Svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou v ochraně plynu (obr. 1-4) je v dnešní době velmi používaná a celosvětově rozšířená kategorie tavného svařování kovových materiálů. Používá se ve všech oblastech průmyslu, například při výrobě automobilů, lodí, tlakových nádob, konstrukcí budov a mostů, či při svařování potrubí v hyperbarických komorách pod vodou.



Obr. 1 a 2 Aplikace obloukového svařování tavící se elektrodou [3]

Obr. 3 a 4 Aplikace obloukového svařování tavící se elektrodou [4]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [3], [5], [6]

Stěžejními metodami tavného svařování v aktivním ochranném plynu jsou metody svařování MAG a FCAW, které se vlivem své vysoké efektivity a kvality neustále vyvíjejí. Tyto technologie obloukového svařování jsou nejčastěji používané pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Cílem této práce je v prvé řadě teoretický rozbor technologií obloukového svařování v aktivním plynu MAG a FCAW. Velký důraz je v této části kladen na typy přídavných materiálů, které tvoří základní rozdíl mezi technologii MAG (135) a FCAW (136 a 138).

Praktická část této práce je zaměřena na porovnání svařování metodami 135, 136 a 138 a byla vypracována ve spolupráci s firmou ESAB Vamberk, s.r.o. Tato společnost je předním výrobcem přídavných svařovacích materiálů a svařovacích a řezacích zařízení.

Největší rozdíl v produktivitě těchto metod je při svařování ve vynucených polohách, z toho důvodu je cílem experimentu porovnání koutových svarů v poloze PF. Dalším úkolem je porovnání nákladů na zhotovení jednotlivých svarů, náročnosti samotného procesu svařování a kvality svarových housenek. Kvalita svaru je hodnocena dle geometrie jeho profilu.

2 SVAŘOVÁNÍ METODOU MAG [1], [5], [6], [7]

Technologie obloukového svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu MAG (z německého Metallschweißen mit aktiven Gasen), v anglické literatuře označována jako GMAW, je jedna z nejpoužívanějších metod svařování (obr. 5). Primárně se takto svařují nelegované oceli, nízkolegované oceli a v menší míře slitiny neželezných kovů (slitiny mědi a hliníku). Uplatňuje se hlavně při výrobě větších konstrukcí, např. potrubí, trupů lodí, či jiných dopravních prostředků.

Počátky průmyslového využití MAG (dle ČSN EN ISO 4063 metoda 135) sahají do poloviny 20. století, kdy se začala ve větším měřítku využívat pro svařování ocelí. Tento způsob svařování vznikl v návaznosti na technologii MIG (obloukové svařování v ochranné atmosféře inertního plynu), kdy hlavním cílem bylo nahradit drahý inertní plyn cenově dostupnější variantou ochranné atmosféry, oxidem uhličitým.

Metoda MAG disponuje značnou variabilitou přídavných materiálů a ochranných plynů, což umožňuje ovlivnění procesu svařování i následnou kvalitu svaru. Dalšími důvody jejího rozmachu je snadná robotizace a mechanizace, rozsáhlý sortiment svařovacích zařízení a v neposlední řadě výhody charakterizující samotný způsob sváření.

V dnešní době je snaha o neustálé zlepšování parametrů této metody. Prostor pro zlepšení je například ve vývoji nových typů přídavných materiálů, zvýšení stability procesu pomocí směsí plynů na bázi argonu nebo ve zlepšení hygieny při svařování (vývoj ochranných plynů s nižším obsahem škodlivin).

Obr. 5 Svařování metodou MIG/MAG [7]

2.1 Princip svařování metodou MAG [1], [6], [8], [9], [10]

Metoda MAG patří do skupiny tavného svařování elektrickým obloukem. Při tomto ději dochází k natavení svarové plochy základního materiálu vlivem vysoké teploty způsobené hořením elektrického oblouku mezi tímto materiálem a drátem (napájení drátu elektrickým proudem je umožněno třecím kontaktem v ústí hořáku). Zároveň dochází k odtavování elektrody do místa svařování. Do ústí hořáku se drát dodává z cívky skrz sdruženou hadici pomocí podávacích kladek. Přenos svarového kovu do lázně je regulován pomocí nastavitelných parametrů technologie MAG. Svařovací proud nabývá nejčastěji hodnot od 50 do 300 A v závislosti na potřebném výkonu a průměru drátu.

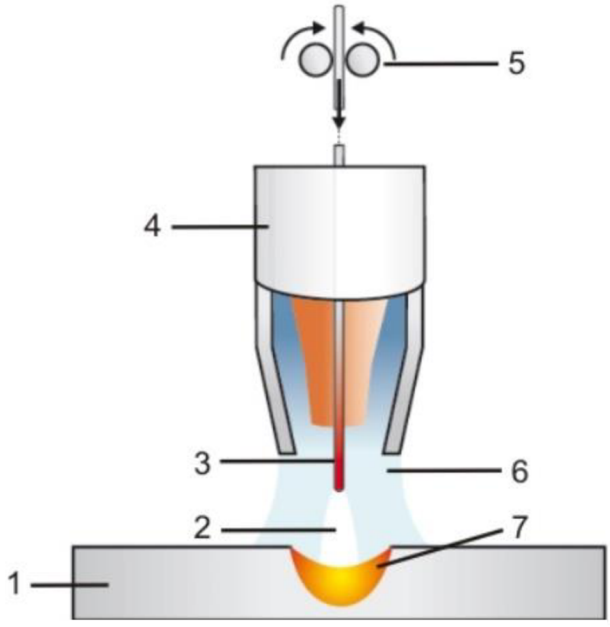
Celý proces probíhá v ochranné atmosféře aktivního plynu, který má podle složení neutrální, oxidační nebo nauhličující vliv na svarovou lázeň. Jako ochranné plyny se nejčastěji používají oxid uhličitý a plynné směsi CO_2, argonu, kyslíku, případně helia. Teplota tavné lázně závisí na velkém množství faktorů, ale orientačně se pohybuje mezi 1600 až 2100 °C a teplota kapek přídavného materiálu v rozmezí 1700 až 2500 °C. Po následném ztuhnutí nataveného materiálu získává svár námi požadované fyzikální vlastnosti. Mezi hlavní výhody technologie MAG patří:

- vysoká svařovací rychlost (dosahující svařovací rychlosti až 150 $cm.min^{-1}$),
- vysoká produktivita (v závislosti na proudové hustotě a rychlosti odtavování),
- svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm,
- oblouk i svarová lázeň je jasně viditelná,
- nižší nároky na čištění strusky,
- malé tepelné ovlivnění okolí svaru,
- snadná robotizace a mechanizace,
- hluboký závar.

K nevýhodám naopak patří riziko „odfouknutí“ ochranné atmosféry při venkovním použití, horší manipulovatelnost se zařízením v terénu, zejména kvůli těžkému zdroji a tlakové lahvi s plynem, nebo relativně velké množství odvedeného tepla do okolí.

Princip technologie MAG je zobrazen na obrázku 6, kde:

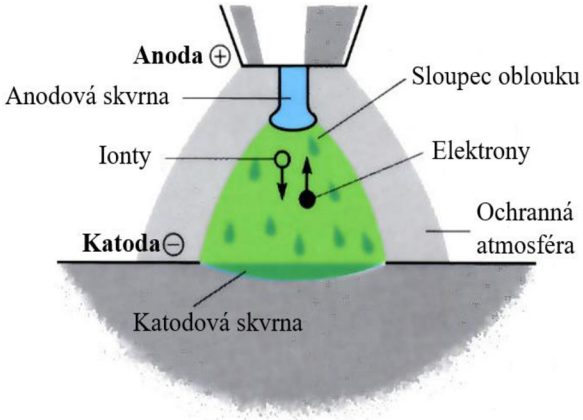
1 základní materiál
2 svařovací oblouk
3 přídavný drát
4 hubice hořáku
5 podávací kladky, směr posuvu drátu
6 ochranný plyn
7 svarová lázeň



Obr. 6 Princip technologie MAG [10]

2.2 Elektrický oblouk [1], [2], [6], [11], [12], [13]

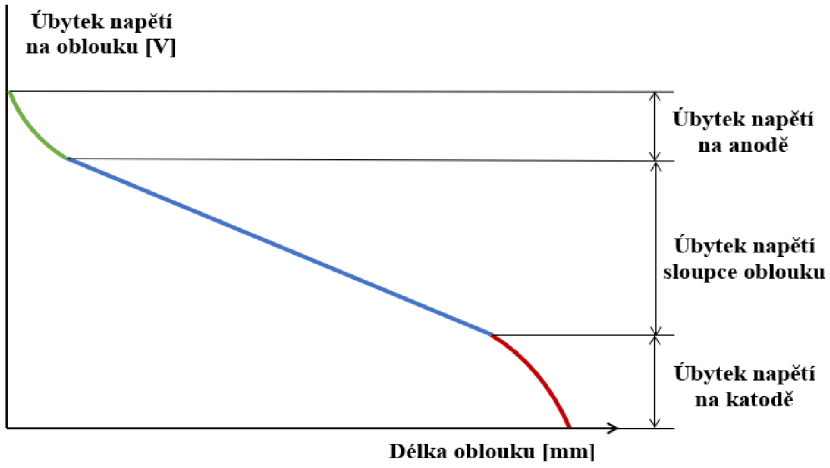
Elektrický oblouk, který se tvoří při svařování metodou MAG, je zvláštní forma elektrického výboje mezi elektrodou a základním materiálem v prostředí ochranného plynu a par vznikajících při tavení svařovacího drátu. K trvalému výboji dochází obvykle v případech, kdy vznikající teplo ohřívá plyn na teplotu, která je potřebná pro tepelnou ionizaci okolní atmosféry. K tomuto jevu dochází při značné intenzitě proudu a za relativně nízkého napětí. Svařovací oblouk lze zažehnout při napětí naprázdno dotykem svařovacího drátu s povrchem základního materiálu. Tomuto způsobu se říká zahájení zkratem. Další metodou používanou při svařování MAG je zapálení oblouku pomocí vysokého napětí s vysokou frekvencí. Každý oblouk se skládá ze tří základních částí, které se od sebe liší různými úbytky napětí (obr. 7):



Obr. 7 Elektrický oblouk [13]

- Katodová oblast – je tvořena žhavou katodovou skvrnou. Tato oblast primárně emituje elektrony, které směřují od katody přes sloupec oblouku k anodě. Na povrch katodové oblasti dopadají kladné ionty, neutralizují se a předávají katodě svoji ionizační energii, čímž dochází k ohřevu. Katodový úbytek napětí bývá mezi 10 až 16 V.
- Sloupec oblouku – největší část elektrického oblouku, která má tvar komolého kužele. Tvoří ho oblast ionizovaného plynu ve formě plazmy o vysoké teplotě. Při cestě přes obloukový sloupec narážejí primární elektrony na atomy ochranného plynu, které srážkami rozkládají na ionty a sekundární elektrony. Úbytek napětí je v tomto případě přibližně 2 V na 1 milimetr sloupce.
- Anodová oblast – její hlavní část je tvořena anodovou skvrnou, kterou jsou elektrony pohlcovány a neutralizovány. Při tomto ději se kinetická energie elektronů mění na energii tepelnou a dochází opět k ohřívání. Anodový úbytek napětí se pohybuje mezi 4 až 8 V (obr. 8).

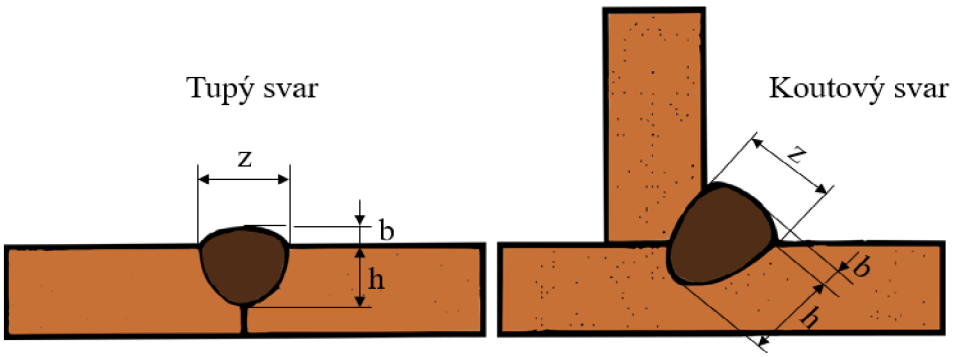
Elektrické teplo vzniklé v oblouku se skládá z tepla vznikajícího na anodě (45–55 %), z tepla vznikajícího na katodě (30–35 %) a z tepla vznikajícího v obloukovém sloupci při srážkách atomů (15–20 %).



Obr. 8 Rozdělení napětí v oblouku [1]

2.3 Parametry svařování [1], [6], [11], [12], [14], [15], [16]

Základním prvkem každého tupého a koutového svaru je svarová housenka. Mezi její hlavní rozměry patří šířka svaru (z), hloubka průvaru (h) a převýšení svaru (b). Tyto rozměry jsou graficky znázorněny na obrázku 9. Rozměry svaru, včetně délky, určuje konstruktér a dle normy jsou vyznačeny na strojírenském výkresu.



Obr. 9 Základní rozměry svaru [6]

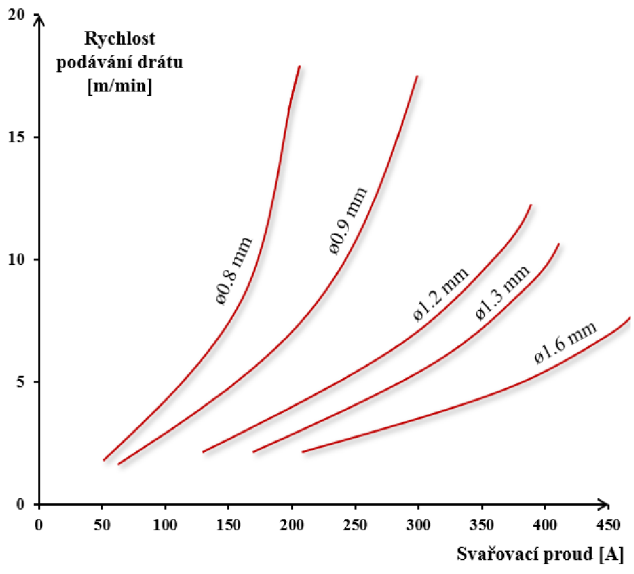
Činitele ovlivňující kvalitu svaru se nazývají základní parametry svařování. Nejdůležitější parametry jsou ty, které ovlivňují tepelný výkon svařování. Podle rozměrů svařované konstrukce, typu přídavných materiálů a požadované rychlosti svařování je nutné tyto parametry vhodně zvolit, aby byl proces co nejkvalitnější a nejefektivnější. Mezi základní parametry svařování patří:

- Svařovací napětí – je dáno rozdílem potenciálu mezi drátem a povrchem svarové lázně. Nejvíce ovlivňuje šířku a profil svaru, kdy se zvětšujícím se napětí tyto parametry rostou. Vysoká hodnota svařovacího napětí je charakterizována dlouhým elektrickým obloukem. S klesající hodnotou napětí se oblouk zkracuje, nedochází k dokonalému natavování a hrozí vznik studeného svaru (má zásadní vliv na typ přenosu kovu). Standardní svařovací napětí v oblouku vycházející z volt-ampérové charakteristiky se vypočítá z empirického vztahu:

$$U = 15 + 0{,}035.I, \qquad (2.1)$$

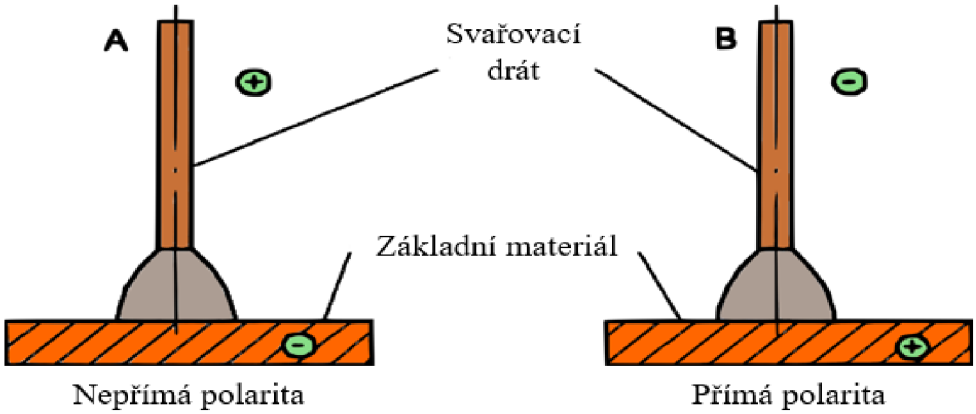
kde: U – svařovací proud [V]
I – svařovací proud [A]

- Svařovací proud a rychlost podávání drátu – mají zásadní vliv na přenos kovu a tvar průřezu svarové housenky. Při zvýšení svařovacího proudu roste proudová hustota, odtavovací výkon i velikost a tekutost svarové lázně. Zvětšují se všechny rozměry svaru, ovšem nejvíce hloubka průvaru. Hodnota svařovacího proudu se nastavuje nepřímo pomocí rychlosti podávání drátu. Tato závislost je experimentálně zjišťována pro různé průměry drátu (obr. 10). Čím vyšší je rychlost podávání drátu, tím se i hodnota proudu zvyšuje.



Obr. 10 Vliv podávání drátu na proud [11]

- Proudová hustota – charakterizuje závislost proudového zatížení drátu na velikosti plochy jeho průřezu. Proudová hustota má při svařování podobný vliv jako svařovací proud. Uvádí se v jednotkách $A.mm^{-2}$ a její hodnoty se pohybují od 80 do 350 $A.mm^{-2}$. Výkonnější metody svařování jako FCAW však disponují hodnotami i několikanásobně vyššími.
- Druh a polarita svařovacího proudu – při svařování MAG se nejčastěji využívá stejnosměrného proudu a zapojení s nepřímou polaritou (obr. 11). Kladný pól je tedy připojený na svařovací drát (hořák) a záporný pól svařovacího proudu je připojený na základní materiál. U tohoto typu zapojení lze pozorovat zvýšenou hloubku závaru, malé převýšení a širší housenku. Přímá polarita se vyznačuje záporným pólem na svařovacím drátu. Tento typ polarity má opačný vliv na tvar svarové housenky, čehož se využívá při navařování.



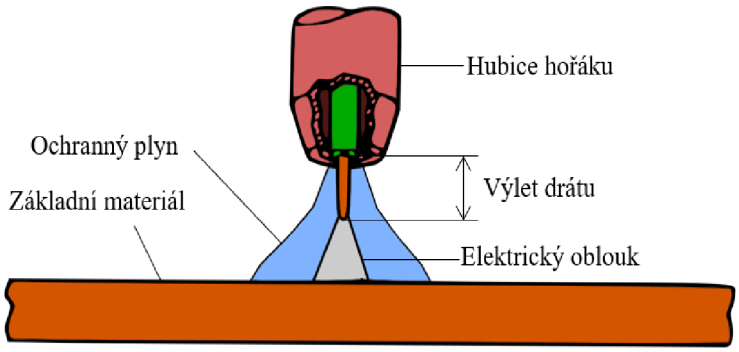
Obr. 11 Přímá a nepřímá polarita svařovacího proudu [16]

- Volná délka drátu (výlet drátu) – je vzdálenost drátu od jeho výstupu z kontaktní koncovky až po začátek oblouku (obr. 12). Hodnota výletu drátu je ovlivněna průměrem drátu i typem ochranného plynu použitého při svařování. Změny ve výletu drátu značně ovlivňují proces svařování, nejvíce svařovací proud. Větší výlet způsobuje pokles svařovacího proudu přibližně o 10 až 20 A na milimetr volné délky drátu. Obecně platí, že by se výlet měl rovnat desetinásobku průměru drátu. Přesněji lze volnou délku drátu spočítat pomocí vztahů, které se liší dle druhu ochranného plynu, dle vztahů:

$$L = 5 + 5.D \quad \text{pro oxid uhličitý} \tag{2.2}$$

$$L = 7 + 5.D \quad \text{pro směsné plyny} \tag{2.3}$$

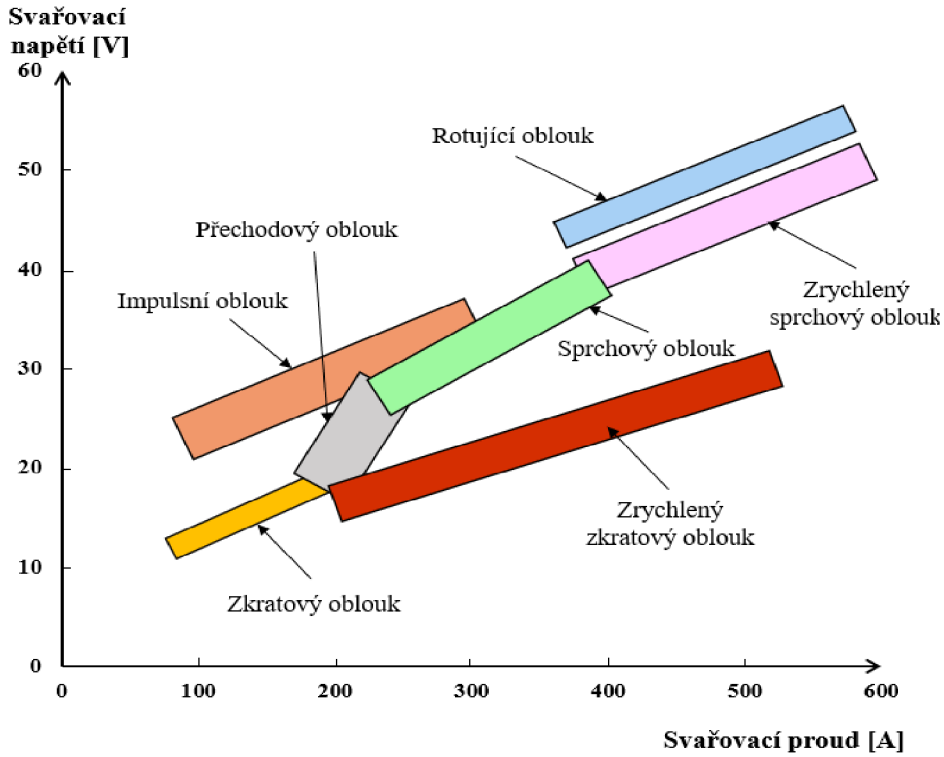
kde: L – délka výletu [mm], D – průměr drátu [mm]



Obr. 12 Zobrazení volné délky (výletu) drátu [12]

2.4 Přenos kovu v oblouku [1], [2], [11], [15], [16], [17], [18], [19]

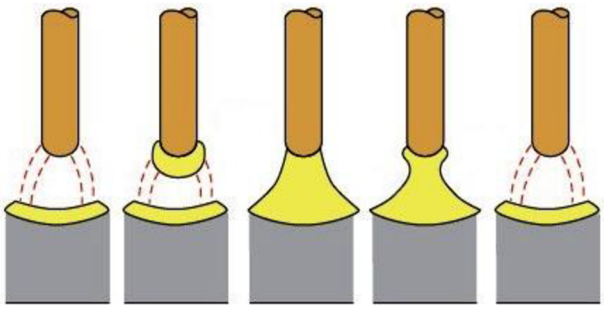
Přenos kovu je jednou z nejdůležitějších charakteristik tavného svařování elektrickým obloukem. Je závislý především na svařovacích parametrech (proudu, napětí, případně proudové hustotě), ovšem zásadní vliv mají i ochranné plyny, druh a průměr přídavného materiálu nebo samotná technika svařování. Podle nastavení parametrů oblouku jsou základní způsoby přenosu kovu (obr. 13).



Obr. 13 Oblasti přenosu kovu v oblouku [15]

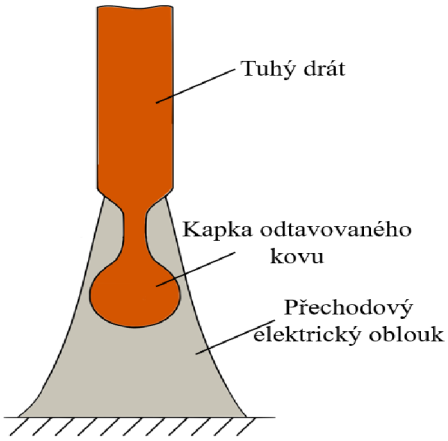
Tato problematika se zabývá způsoby natavování konce tavící se elektrody (drátu), chování kapky tekutého kovu v oblouku a její následné splynutí se svarovou lázní. Nejčastějšími způsoby přenosu kovu v oblouku jsou:

- Zkratový přenos kovu – je metoda uplatňující svařování krátkým obloukem. Hodnoty napětí jsou nízké, pohybují se od 14 do 22 V. Ke zkratu dochází v případě, kdy rychlost podávání elektrody převyšuje rychlost tavení. V tu chvíli dojde k přemostění mezery oblouku a kapka, která vznikne na konci elektrody, se odtaví během zkratu do svarové lázně (obr. 14). Při nízkých proudech a vyšších napětích (okolo 25 V) je frekvence kapek malá, zato rozstřik kovu velký. Snížením napětí lze dostáhnout většího počtu zkratů. Tím se urychlí proces přiblížení drátu a k přemostění dojde dříve. Tento jev má za následek vysokou frekvenci odtavování daleko menších kapek. Vlivem povrchového napětí taveniny se kapka kovu rovnoměrně rozptýlí ve svarové lázni. Výhodou svařování zkratovým přenosem kovu je minimální tepelné ovlivnění základního materiálu. Zkratový přenos kovu je vhodný pro svařování ve vynucených polohách, jelikož svarový kov rychle tuhne.



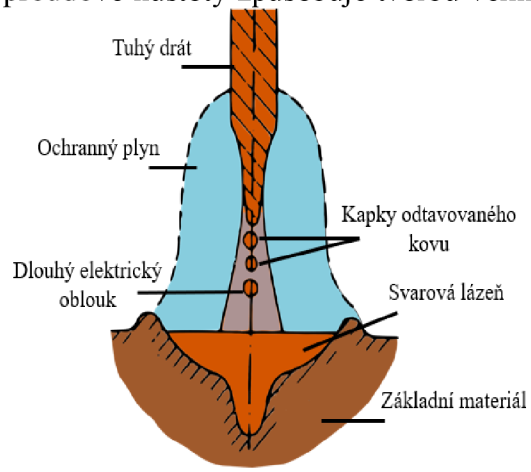
Obr. 14 Zkratový přenos kovu [17]

- Kapkový přenos kovu – vzniká při průměrných hodnotách oblouku, kdy se napětí pohybuje od 22 do 28 V a proud od 190 do 250 A. Tvoří přechod mezi zkratovým a sprchovým přenosem kovu. Vyšší napětí, při kterém vzniká delší, tzv. přechodový oblouk, neumožňuje vytvoření zkratu. Přenos je realizován formou kapek, které mají často větší průměr než drát samotný (obr. 15). Růst kapky je umožněn vlivem povrchového napětí roztaveného kovu a tlakem par. Působením elektromagnetických sil dojde k přerušení můstku a kapka dopadá do svarové lázně velkou rychlostí, ovšem s velmi malou frekvencí. Tento jev lze lépe pozorovat v ochranné atmosféře CO_2, která výrazně zvyšuje hodnoty povrchového napětí. V dnešní době se od této metody upouští z důvodu značného rozstřiku a tvorby hrubých housenek.



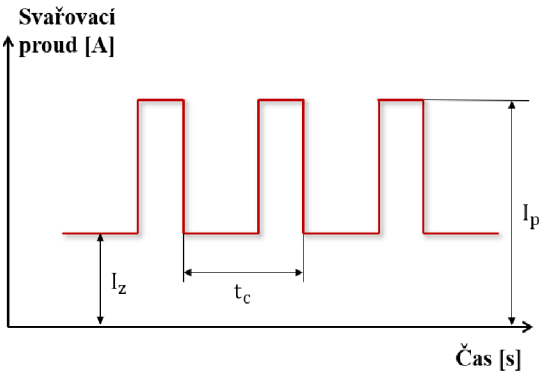
Obr. 15 Kapkový přenos [18]

- Sprchový přenos kovu – je typický pro vysoké hodnoty svařovacího proudu (od 250 do 500 A) a napětí (28 až 40 V). Velká hodnota proudové hustoty způsobuje tvorbu velmi malých kapiček (obr. 16), které jsou elektromagnetickými silami ustřiženy od tuhé části drátu a urychlovány směrem do tavné lázně. Oblouk při tomto typu přenosu nezhasíná, což vede k přenosu značného množství tepla a následnému hlubokému závaru. Výkon navaření značně převyšuje zkratový i kapkový přenos kovu. Díky minimálnímu rozstřiku má výsledný svar velmi hladký povrch. Nejčastěji je využíván pro svařování materiálů větších tlouštěk, ovšem pouze při použití směsných plynů na bázi argonu. Užití čistého oxidu uhličitého je pro danou metodu nevhodné.



Obr. 16 Sprchový přenos [19]

- Impulzní přenos kovu – tato metoda je umožněna díky technickému rozvoji svařovacího zařízení a počítačových systémů. Oblouk je elektronicky ovládán řídicí jednotkou, která způsobuje pravidelné kolísání proudu. Pulzující proud se periodicky mění mezi základními proudy I_z (proud způsobující nižší proudovou hustotu) a impulzními proudy I_p (proud způsobující vyšší proudovou hustotu). Změny mezi těmito proudy jsou dány frekvencí svařovacího cyklu pohybující se od 25 do 300 Hz, kterou lze určit z hodnoty doby cyklu t_c (obr. 17). V principu jde o kombinovaný sprchový a kapkový přenos. Při přesném nastavení parametrů svařování (proudu, napětí, frekvence a amplitudy) lze získat široké pole využití. Dalšími výhodami jsou například stabilita procesu, malý rozstřik nebo menší tepelné ovlivnění základního materiálu.



Obr. 17 Impulzní přenos [16]

- Rotující přenos kovu – tento proces probíhá při vysokých parametrech svařování, kdy napětí dosahuje hodnot až 65 V a proud přesahuje hodnoty 450 A. Výběh drátu je více než 20 mm, což způsobuje značný předehřev drátu vlivem odporového tepla. Působením enormních hodnot elektromagnetických sil je konec drátu, který je ve vysoce plastickém stavu, roztáčen. Kapky tavícího se kovu tak vytváří kuželovou plochu. Předností rotujícího přenosu kovu je velmi dobrý závar do boků svařovaného materiálu.

2.5 Metalurgické reakce [1], [2], [6], [14]

Metalurgické reakce při svařování MAG můžeme rozdělit na dvě skupiny, a to na reakce oxidační a dezoxidační. Elektrický oblouk hoří v prostředí ochranných aktivních plynů – buď čistého CO_2, nebo ve směsích plynů na bázi argonu. Rozsah reakcí je řízen množstvím disociovaného kyslíku, který je schopný slučování s prvky roztaveného kovu. Nejsilnějšími oxidačními účinky ochranného plynu disponuje čistý oxid uhličitý. Do teploty 700 °C se CO_2 chová jako inertní, ovšem po přesáhnutí této hodnoty se rozpadá na oxid uhelnatý a atomární kyslík. Ve směsných plynech vzniká atomární kyslík disociací molekul CO_2 nebo O_2.

Oxidační reakce tedy probíhají vlivem aktivních ochranných atmosfér a jsou silně exotermické, tudíž tepelně ovlivňují svarovou lázeň. Množství uvolněného tepla závisí především na množství atomárního kyslíku v reakci. Atomární kyslík nejprve reaguje s prvky tavícího se drátu, jelikož kapky odtavovaného kovu jsou vystaveny ochrannému plynu na celém svém povrchu. Rychlost oxidace prvků v přídavných materiálech je závislá na jejich chemické afinitě ke kyslíku. Vzniklé oxidy těžkých kovů (oxidy železa) mohou po dopadu do svarové lázně reagovat s uhlíkem za vzniku oxidu uhelnatého. CO má nežádoucí vliv na výsledný svar, jelikož po ztuhnutí svarového kovu tvoří bubliny a póry.

Snaha o zamezení tvorby CO vede k desoxidaci taveniny svarového kovu. Dalším důvodem dezoxidace je odstranění FeO z taveniny, jelikož snižuje povrchové napětí roztaveného kovu. Jako dezoxidační přísady se nejvíce používají křemík, mangan a hliník. Svařovací dráty proto vždy obsahují zvýšený obsah křemíku a manganu oproti materiálu základnímu. Výsledkem dezoxidačních dějů je vyredukované železo a oxidy SiO_2, MnO a Al_2O_3, které je třeba ze svarového kovu vyloučit a převést do strusky. Doporučený poměr mezi Mn : Si je obvykle 1,5–1,8 : 1. Optimální složení dezoxidačních prvků zajišťuje tekutost vzniklé strusky, proto struska snadno vyplave na povrch tavné lázně. Po vychladnutí svaru je struska z povrchu svaru lehce odstranitelná. Dezoxidací taveniny svarového kovu tedy výrazně zkvalitníme proces svařování. Porovnání nelegovaných a legovaných drátů manganem a křemíkem je v tabulce 1.

Tab. 1 Chemické reakce probíhající v tavné lázni [1].

Typ drátu	Dráty nelegované Si + Mn	Dráty legované Si + Mn
Reakce v oblouku	$CO_2 \rightarrow CO + O$	$CO_2 \rightarrow CO + O$
Reakce v roztavené lázni	$O_2 + 2Fe \rightarrow 2FeO$ + teplo $FeO + C \rightarrow Fe + CO$	$O_2 + 2Fe \rightarrow 2FeO$ + teplo $2FeO + Si \rightarrow 2Fe + SiO_2$ $FeO + Mn \rightarrow Fe + MnO$
Produkt	CO způsobující pórovitost a bublinatost ve svaru	SiO_2 a MnO jsou produkty dezoxidace tvoří strusku

2.6 Přídavné materiály [1], [2], [6], [14], [15], [20], [21], [22], [23]

Při svařování metodou MAG se využívají nejčastěji tzv. plné dráty. Při jejich výrobě se vychází z pečlivě odlitého ingotu. Nejprve dochází k odstranění staženin, trhlin, bublinatosti a vměstků. Poté se válcováním vytváří dráty průměru 5 až 9 mm. Následně se uplatňuje technika tažení za studena průvlakem, kdy dochází ke zmenšování průměru drátu. Po určité změně průřezu musí dojít k žíhání, aby proces mohl pokračovat a drát získával požadované vlastnosti. Ke zvýšení efektivity průvlaků slouží maziva a chladiva, která odvádí teplo vzniklé během procesu.

Obr. 18 Marathon Pac ESAB [23]

Dráty pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí se navíjí na drátěné cívky a dráty z neželezných kovů na cívky plastové. Hmotnost jednotlivých cívek se pohybuje od 5–30 kg. Speciální způsob navíjení je do lepenkových sudů (tzv. Marathon Pac, Marathon Pac Jumbo), které slouží k zásobování robotizovaných pracovišť (obr. 18 a 19). Tyto pakety v závislosti na typu obsahují 250 až 500 kg drátu, tudíž robot může pracovat dlouhou dobu bez přerušení.

Plné elektrody pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí jsou na povrchu pokryté tenkou vrstvou mědi, aby se zabránilo korozi při přepravě nebo při dlouhodobém skladování. Vrstva mědi také zlepšuje přívod proudu třecím kontaktem. Cívky jsou vakuově zatavovány do polyetylenových fólií a následně baleny do papírových krabic, což vede k větší ochraně proti znehodnocení drátu. Jak fólie, tak krabice musí být označena štítkem s údaji od výrobce. Pro přepravu se doporučuje teplota nad 10 °C a relativní vlhkost do 50 %. Na každý výrobek je nalepen štítek, který musí obsahovat tyto údaje uváděné výrobcem:

Obr. 19 Přídavné materiály ESAB [21]

- označení výrobce
- označení drátu dle výrobce i normy
- hmotnost
- průměr drátu (nejčastěji 0,6 – 2 mm)
- číslo tavby
- klasifikace a certifikace u jiných orgánů

Domácí výrobce, firma ESAB Vamberk, značí přídavné materiály pro svařování MIG/MAG podle daného předpisu:

OK AUTROD (ARISTOROD) XX.XX

První číslo: 1 přídavné materiály pro mechanizovaný způsob svařování
Druhé číslo: 2 vinutý drát pro svařování konstrukčních ocelí
3 vinutý drát pro svařování nízkolegovaných ocelí
4 vinutý drát pro svařování bez ochranné atmosféry
5 vinutý trubičkový drát
6 vinutý vysokolegovaný nerezavějící drát
8 vinutý drát pro svařování hliníku
9 vinutý drát pro svařování jiných neželezných kovů

Třetí a čtvrté místo jsou pořadová čísla a rozlišení ve skupinách.

Příklad: OK AUTROD 12.51 je poměděný drát pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností do 530 MPa a jemnozrnných ocelí s minimální mezí kluzu 420 MPa v ochranných atmosférách plynů Ar/20CO_2 nebo v čistém CO_2.

Další způsob označování přídavných materiálů podle normy ČSN EN ISO 14341 pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocení je následující:

G 46 3 M21 G3Si1

G svařování v ochranné atmosféře plynu
46 pevnost a tažnost
3 nárazová práce – desetina mínusové teploty, při které je dosaženo nárazové práce 47 J (pro danou hodnotu je dosaženo nárazové práce při -30 °C)
M21 označení ochranného plynu dle ČSN EN ISO 14 175
G3Si1 chemické složení

Symboly používané pro nárazovou práci KV a pro mechanické vlastnosti (pevnost a tažnost) jsou uvedeny v tabulce 2 a 3.

Tab. 2 Symboly pro rázové vlastnosti svarového kovu [6].

Symbol	Teplota pro minimální nárazovou práci 47 J [°C]
Z	bez požadavků
A	+20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60

Tab. 3 Pevnostní charakteristiky svarového kovu [6].

Symbol	Minimální mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Minimální tažnost [%]
35	355	440-570	22
38	380	470-600	20
42	420	500-640	20
46	460	530-680	20
50	500	560-720	18

Označení původních, ale stále se vyrábějících drátů se řídí tímto předpisem:

C XXX

Znak C označuje svařování tavící se elektrodou v ochranných plynech. První číslice značí jakost skupiny materiálu a další dvě pořadové číslo.

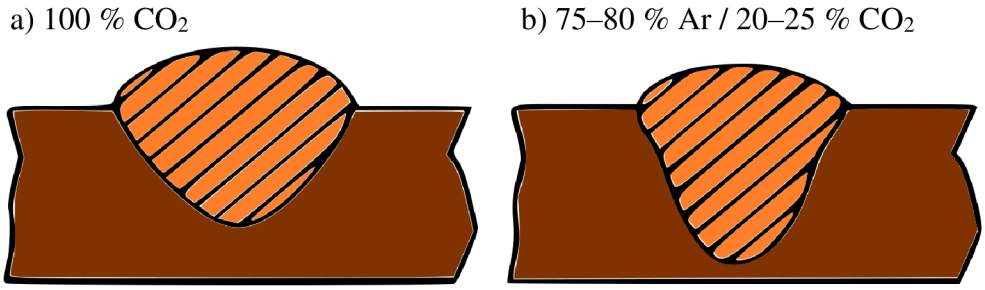
Výrobce v katalozích uvádí nejdůležitější informace o přídavných materiálech. Každý výrobek obsahuje stručnou charakteristiku, jaký typ materiálu s ním lze svařovat, jeho chemické složení, doporučený ochranný plyn, vlastnosti svarového kovu, vhodné polohy sváření, svařovací parametry, orientační výkonové hodnoty, typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu a další. Tyto údaje jsou zásadní pro výslednou bezpečnost svarového spoje.

Chemické složení svařovacího drátu se odvíjí především od potřeby dezoxidace svarového kovu, čehož dosáhneme vyšším obsahem manganu, křemíku a v některých případech i hliníku v drátu.

2.7 Ochranné plyny a jejich chemické účinky [1], [6], [14], [15], [16], [24], [25]

Při svařování MAG se používají aktivní ochranné plyny, které mají určitý žádoucí vliv na svarovou lázeň. Tyto plyny chrání konec tavícího se drátu, přenášené kapky kovu v oblouku, svarovou lázeň i tepelně ovlivněnou oblast před účinkem okolního prostředí. Zjednodušeně řečeno zamezují přístupu vzduchu do oblasti svařování. Dále usnadňují zažehnutí a hoření oblouku, zlepšují přenos kovu v oblouku, ovlivňují hladkost povrchu, tvar a rozměry průřezu svaru. Celkově přispívají ke zvýšení mechanických vlastností svařované součásti a ke zkvalitnění produktivity svařování.

V dnešní době se od užití čistého oxidu uhličitého jako ochranného plynu pomalu upouští. Spíše se využívá směsných plynů Ar + CO_2 (argon a oxid uhličitý), případně Ar + CO_2 + O_2 (argon, oxid uhličitý a kyslík). Porovnání vlivu čistého a směsného plynu na tvar svaru je znázorněno na obrázku 20.



Obr. 20 Vliv ochranného plynu na tvar svaru [25]

Nejpoužívanějšími ochrannými plyny při svařování metodou MAG jsou:

- Oxid uhličitý – plyn bez barvy a zápachu. Svařování v čistém CO_2 je výhodné zejména z hlediska ceny. Na druhou stranu jeho vysoká tepelná vodivost často komplikuje zkratové zapalování oblouku. Problémové je i odtavování ocelového drátu při svařování dlouhým obloukem. Svařování v CO_2 sprchovým přenosem je úplně vyloučeno (velký rozstřik), lze použít pouze přenos kapkový.

- Směs Argon + 15–25 % CO_2 – univerzální skupina plynů, označována též jako M21. Nejpoužívanější směsí z této skupiny, která se používá ke svařování nízkolegovaných a nelegovaných ocelí, je Ar + 18 % $C0_2$. Tyto směsi stabilizují elektrický oblouk a vytváří ideální hloubku průvaru. Vhodné použití je pro zkratový, impulzní i sprchový přenos kovu. Výsledný svar se vyznačuje hladkým povrchem s dobrým přechodem do základního materiálu.
- Směs Argon + 8 % CO_2 – středně oxidační směsný plyn s nižší měrnou hmotností, díky níž dochází k vytvoření drobných kapiček kovu. Umožňuje impulzní i sprchový přenos kovu. Svařování s touto ochrannou atmosférou dosahuje nejvyšších rychlostí. Dalšími výhodami jsou nízký rozstřik svarového kovu, minimální tvorba strusky a výsledný plochý svar. Plyn je vhodný pro automatizované svařování s dobrou jakostí housenky.
- Směs Argon + 5–13 % CO_2 + 5 % O_2 – tyto směsi ze skupiny M2 zprostředkovávají stabilní svařovací proces. Výsledkem jsou hladké a čisté svary. Přítomnost kyslíku v reakci způsobuje dobrou tekutost tavné lázně a její odplynění. Dalším charakteristickým znakem je plynulost přechodu svaru do základního materiálu. Používají se při mechanizovaném a robotizovaném svařování.

Ochranné plyny se dělí dle normy ČSN EN ISO 14 175 podle chemického působení při tepelných procesech (tab. 4). Rozděleny jsou do skupin podle míry vlivu na složení svarového kovu (M1 je mírně oxidační, zatímco M3 silně) a do podskupin podle indexu oxidačního účinku a vlivu na nauhličení. Skupiny M se skládají z oxidačních plynů na bázi argonu, zatímco skupina C je na bázi CO_2.

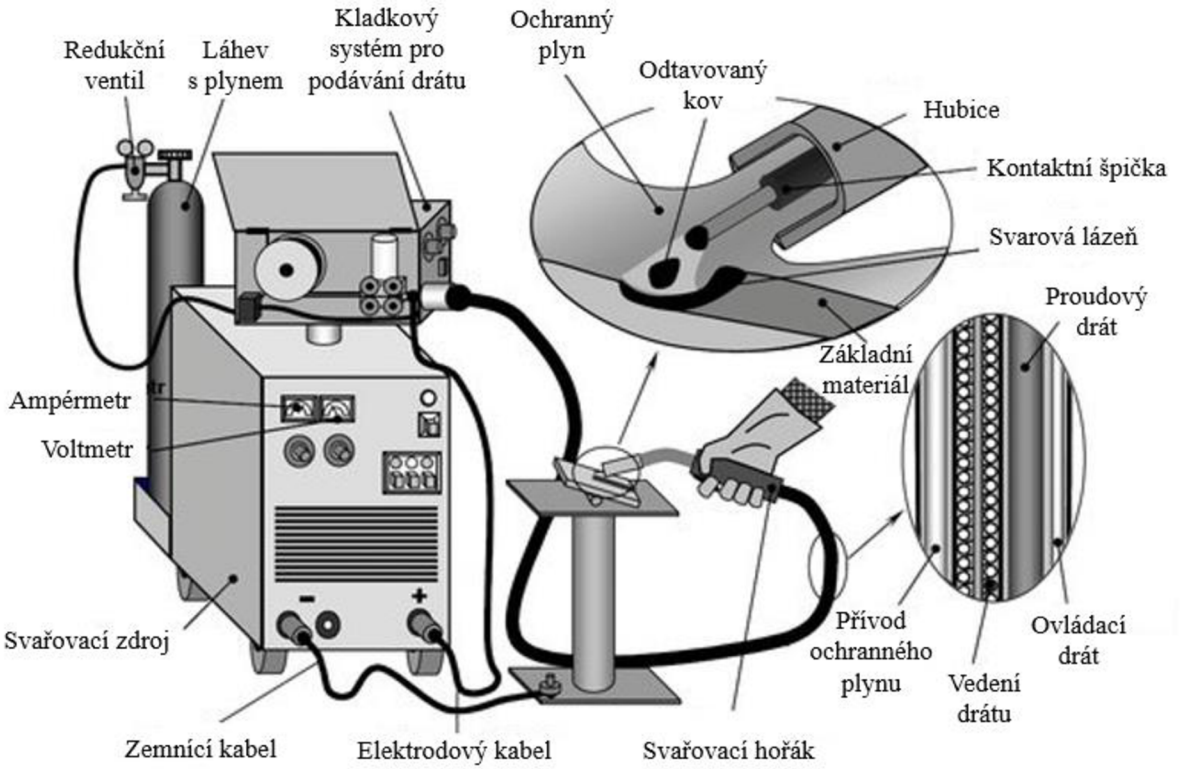
Tab. 4 Rozdělení oxidačních plynů dle chemického složení (dle ČSN EN ISO 14 175) [1].

Označení		**Prvky v objemových procentech**			
Skupina	Pod-skupina	Oxidační		Redukční	Inertní
		CO_2	O_2	Ar	H_2
M1	1	0,5–5 %		zbytek	0,5–5 %
	2	0,5–5 %		zbytek	
	3		0,5–3 %	zbytek	
	4	0,5–5 %	0,5–3 %	zbytek	
M2	0	0,5–15 %		zbytek	
	1	15–25 %		zbytek	
	2		3–10 %	zbytek	
	3	0,5–5 %	3–10 %	zbytek	
	4	5–15 %	0,5–3 %	zbytek	
	5	5–15 %	3–10 %	zbytek	
	6	15–25 %	0,5–3 %	zbytek	
	7	15–25 %	3–10 %	zbytek	
M3	1	25–50 %		zbytek	
	2		10–15 %	zbytek	
	3	25–50 %	2–10 %	zbytek	
	4	5–25 %	10–15 %	zbytek	
	5	25–50 %	10–15 %	zbytek	
C	1	100 %			
	2	zbytek	0,5–30 %		

2.8 Zařízení pro svařování metodou MAG [1], [2], [6], [9], [15], [16], [26], [27]

V praxi se můžeme setkat s ručním, strojovým, robotizovaným nebo plně automatizovaným svařováním metodou MAG. Jednotlivým typům svařování musí být uzpůsobeno i svařovací zařízení.

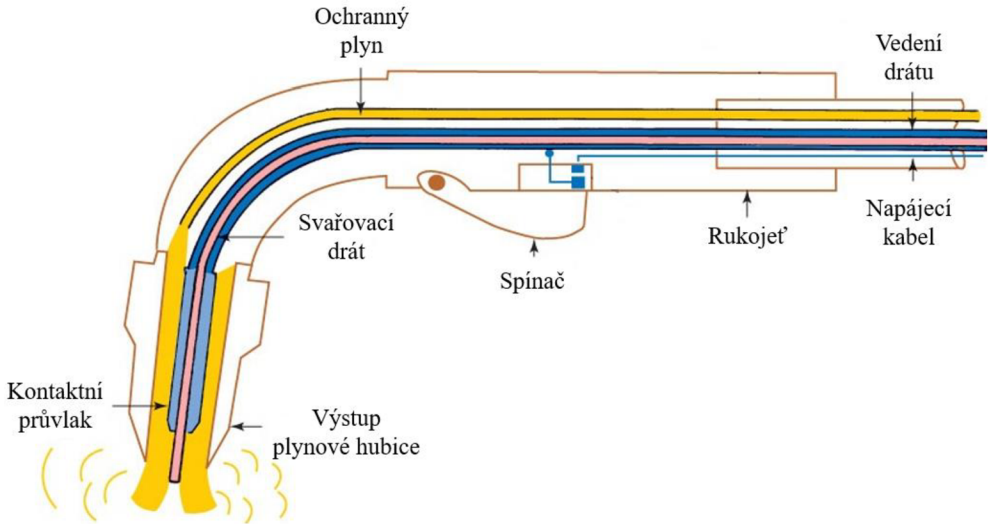
Základní sestava svařovacího zařízení MAG pro ruční svařování obsahuje svařovací zdroj, mechanismus pro podávání a vedení drátu, zásobník s drátem, svařovací hořák, řídicí jednotku, multifunkční kabel hořáku s rychlospojkou, uzemňovací kabel se svorkou a tlakovou lahev ochranného plynu s redukčním ventilem a s hadicemi pro rozvod plynu (obr. 21). Modernější zařízení pro náročnější a výkonnější svařování mohou být vybavena i dalšími doplňky, které slouží k zefektivnění svařovacího procesu. Jsou jimi například chladicí jednotka pro chlazení hořáku, dálkové ovládání svařovacích parametrů a jiné.



Obr. 21 Zařízení pro ruční svařování metodou MAG [9]

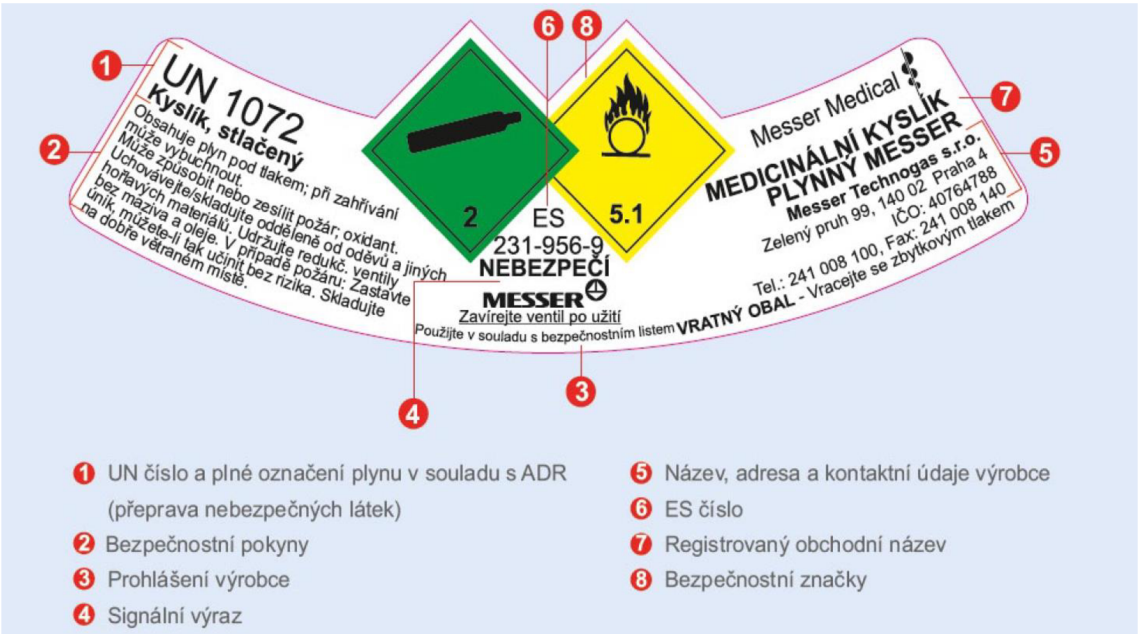
- Svařovací zdroj – je zařízení, které dodává elektrický proud vhodný pro danou metodu svařování. Při metodě MAG se používají zdroje se stejnosměrným výstupem, usměrněné pomocí usměrňovačů. Podle druhu statické (volt-ampérové) charakteristicky, která vyjadřuje závislost mezi napětím a svařovacím proudem v ustáleném stavu, se dělí na zdroje s konstantním proudem (strmá charakteristika), zdroje s konstantním napětím (plochá charakteristika), zdroje s konstantním výkonem (mírně klesající charakteristika). Pro metodu MAG je vhodné použití zdroje s plochou charakteristikou. Často se také využívá zařízení se schopností automatické regulace a udržování konstantní délky oblouku.
- Podavač drátu – slouží k nepřetržitému dodávání přídavného materiálu v podobě drátu do hořáku. Jeho funkcí je rovnoměrné podávání drátu, aniž by byl drát poškozen. Nejdůležitější částí je soustava rovnacích a hnacích podávacích kladek. Mezi nimi prochází svařovací drát až do hořáku. Obvykle je mechanismus pro podávání drátu umístěn uvnitř zdroje, nebo na zdroji svařovacího proudu.

- Svařovací hořáky – umožňují přívod svařovacího proudu, svařovacího drátu, ochranného plynu a případně i chladicí kapaliny do místa svařování. Přenos svařovacího proudu je realizován kontaktním (třecím) průvlakem, usměrnění plynu do místa svaru zabezpečuje plynová dýza. Podle proudového zatížení se dělí na hořáky chlazené plynem a na hořáky chlazené kapalinou. Podrobný popis svařovacího hořáku je zobrazen na obrázku 22.



Obr. 22 Svařovací hořák [26]

- Zásobník ochranného plynu – technické plyny pro svařování metodou MAG se nejčastěji uchovávají a přepravují v tlakových nádobách (lahvích). Objem uchovaného plynu se odvíjí od velikosti lahve a přetlaku uvnitř ní. Nádoby pro směsné plyny jsou nejčastěji dodávány při přetlaku 15 až 20 MPa, kdy se v plné lahvi o objemu 40 litrů nachází až 8 m^3 plynu. K odebírání plynu ze zásobníku slouží plynová hadice napojená na redukční ventil, který reguluje tlak plynu na nižší, výstupní hodnotu. Značení tlakových lahví (dle firmy MesserGroup) je na obrázku 23.



Obr. 23 Značení tlakových lahví [27]

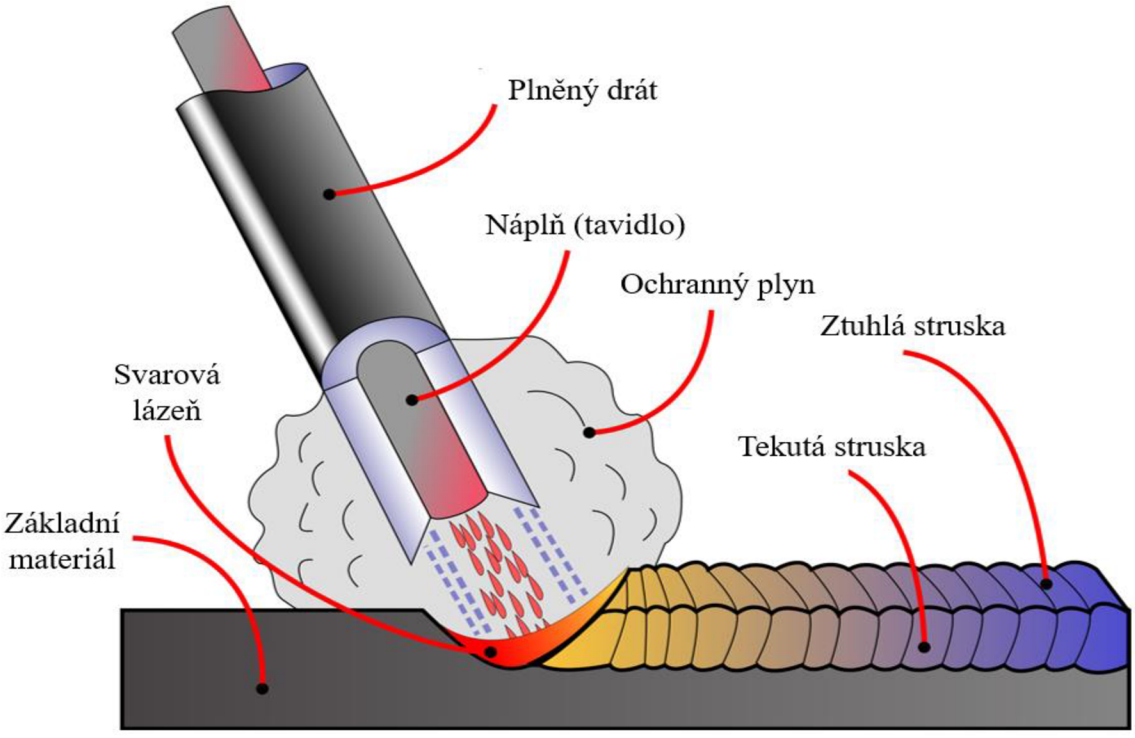
3 SVAŘOVÁNÍ METODOU FCAW [2], [28], [29], [30], [31], [32]

Svařování metodou FCAW (z anglického Flux cored arc welding) je technologie obloukového svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu. Metoda FCAW (dle ČSN EN ISO 4063 metoda 136 a 138) se vyvinula vlivem postupné automatizace a robotizace procesu svařování. Tlak na zefektivnění produktivity a snižování ceny byl důvodem k vývoji nových přídavných materiálů, které se při tomto způsobu svařování uplatňují.

Tato technologie, v praxi též označována jako svařování trubičkovým drátem, je principiálně stejná jako metoda svařování MAG. Lze užít stejných zařízení i ochranných plynů, rozdíl tvoří pouze typ přídavného drátu. Zatímco u MAG je použit plný drát, u FCAW se pracuje s drátem plněným neboli trubičkovým.

Při svařování MAG je proud veden celým průřezem plného drátu. U metody FCAW ovšem elektrický proud prochází pouze přes plášť plněné elektrody (obr. 24), což způsobuje značný nárůst proudové hustoty. Náplň elektrody proud nevede, tato část naopak působí jako značný odpor. Vyšší proudová hustota vede k rychlejšímu odtavování trubičkového drátu a tím k vyšší výkonnosti svařování. Vysoká hustota proudu má vliv i na tvorbu elektrického oblouku, kdy k přenosu kovu dochází bezrozstřikovým sprchovým přenosem. Tento přenos je charakteristický jemnými kapičkami odtavovaného kovu. Kapky kovu jsou oddělovány na vnějším plášti plněného drátu, tudíž vzniklý oblouk je širší než při použití plného drátu a umožňuje hlubší závar. Přenos kapek je urychlován elektromagnetickými silami, které jsou podstatně vyšší než při svařování MAG. Oblast dopadu kapek je také značně širší, což vede k rovnoměrnějšímu rozložení energie.

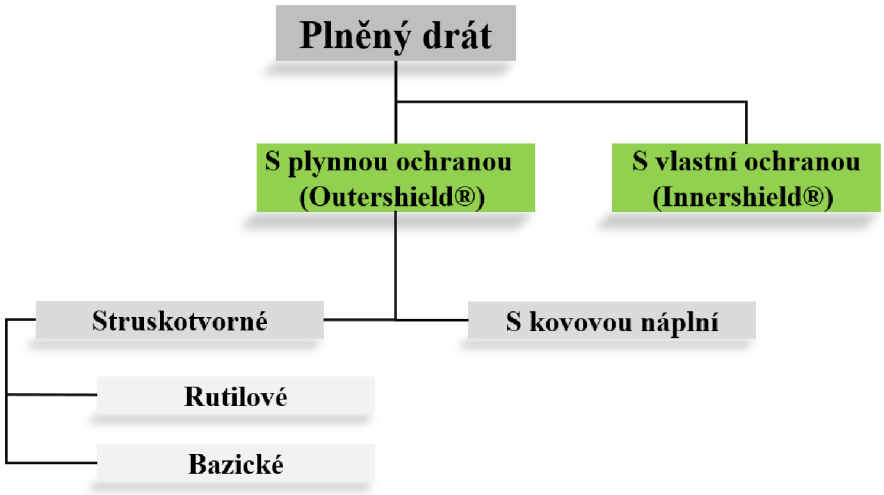
Mezi hlavní výhody svařování metodou FCAW (v porovnání s metodou MAG) patří vyšší výkon navaření, lepší mechanické vlastnosti a kvalita svarového kovu, nízká náchylnost k tvorbě pórů, větší možnost legování svarového kovu, menší rozstřik, menší tepelné ovlivnění základního materiálu a v neposlední řadě podstatné zvýšení produktivity svařování především při svařování ve vynucených polohách.



Obr. 24 Princip svařování metodou FCAW [32]

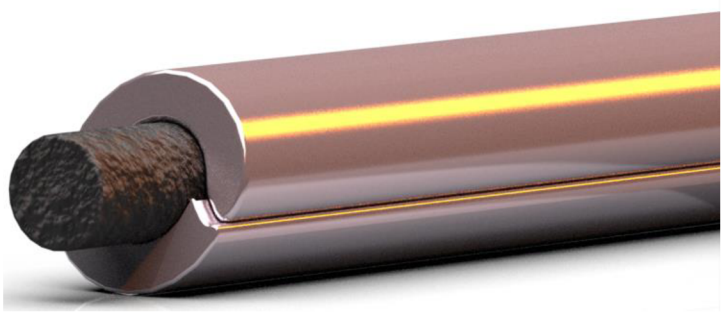
3.1 Plněné dráty [1], [2], [28], [29], [33], [34], [35], [36]

Při svařování metodou FCAW se jako přídavný materiál používají plněné (trubičkové) dráty. Disponují specifickými vlastnostmi, díky kterým se jejich využití rozšířilo po celém světě. Ve Spojených státech a v Japonsku tvoří svařování plněnou elektrodou téměř 30 % objemového podílu svařovaných konstrukcí, v Evropě je tento podíl odhadován na 20 %. Během let se vyvinulo velké množství druhů trubičkových drátů s různorodými vlivy na proces svařování. Základní rozdělení dle složení je zobrazeno na obrázku 25. Při svařování metodami 136 a 138 se používají zejména plněné dráty s plynnou ochranou, trubičky s vlastní ochranou se používají při metodě 114.



Obr. 25 Rozdělení plněných drátů [33]

Trubičkový drát se obecně skládá z kovového obalu a jádra (obr. 26). Jádro trubičky je v prvním případě tvořeno převážně bazickými, rutilovými nebo fluoridovými struskotvornými přísadami (metoda 136). Tyto náplně vytváří na povrchu svaru i kapiček odtavovaného kovu tenkou vrstvu strusky, která ovlivňuje chemické reakce probíhající při svařování, i výslednou kvalitu svaru. Dalším důvodem užití náplní je zvýšení ochrany před účinkem kyslíku, legování svarového kovu nebo stabilizace oblouku. Druhým typem náplně je náplň kovová (metoda 138). Předností všech druhů trubiček je snadné zapalování oblouku, vysoká výtěžnost a bezrozstřikový proces.

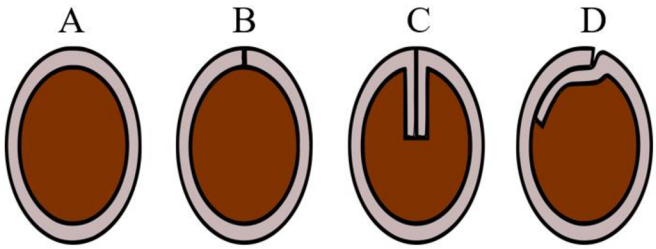


Obr. 26 Plněný (trubičkový) drát [35]

- Bazická náplň – poskytuje svarový kov s vysokou houževnatostí a odolností proti trhlinám i za velmi nízkých teplot. Svarový kov je pokryt vrstvou strusky obsahující vápenec, fluoridy nebo oxidy hliníku a alkalických zemin. Jsou vhodné pro svařování konstrukcí odolávajících velkým výkyvům teplot a pro vysokopevnostní nebo žáropevné oceli. Tyto dráty jsou vysoce produktivní, ovšem odstranění strusky je poměrně problematické.

- Rutilová náplň – při jejím použití se dosahuje nejlepšího konečného vzhledu. Výsledný svar má kvalitní průvar a hladký povrch s jemnou kresbou. Vzniká malé množství strusky oxidu titaničitého, která je snadno odstranitelná. Svařovací vlastnosti jsou nejvíce srovnatelné s vlastnostmi při svařování plným drátem. Nejčastější použití je v kombinaci s ochrannou atmosférou CO_2 (C1) nebo ve směsi plynů (M21).
- Kovová náplň – tyto trubičky jsou plněny železným práškem s malým přídavkem dezoxidačních a stabilizačních látek. Při svařování téměř nedochází ke vzniku strusky, kromě nepatrných ostrůvků oxidů. Nedosahují takové výtěžnosti jako plné dráty, ale jejich výkon odtavení je vlivem vysoké proudové hustoty obecně vyšší.

Vedle dělení dle složení náplně se dají plněné dráty rozdělit i z hlediska výroby na dráty svařované bezešvé a se švovým spojem (falcované). Různé typy trubiček jsou zobrazeny na obrázku 27. Nevýhodou trubiček falcovaných je mechanické uzavírání trubiček při výrobě, kdy při podávání drátu může vlivem tlaku dojít k otevření trubičky.



Obr. 27 Bezešvé (A) a falcované dráty (B–D) [34]

Značení plněných drátů je velmi podobné jako u drátů plných. Trubičky pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu se značí dle normy ČSN EN ISO 17 632 takto:

T 38 2 2Ni B C 4 H10

T	plněná elektroda (trubička)
38	označení pevnostních vlastností
2	označení nárazové práce svarového kovu
2Ni	označení chemického složení svarového kovu
B	druh náplně trubičkového drátu a jeho charakteristiky (tab. 5)
C	označení ochranného plynu
4	polohy svařování, pro které jsou elektrody zkoušeny
H10	označení obsahu vodíku ve svarovém kovu

Tab. 5 Druh náplně trubičkového drátu a její charakteristika [36].

Označení	Charakteristika	Ochranný plyn
R	Rutilová s pomalu tuhnoucí struskou	Ano
P	Rutilová s rychle tuhnoucí struskou	Ano
B	Bazická	Ano
M	Náplň kovového prášku	Ano
V	Rutilová nebo bazicko-fluoridová	Vlastní ochrana
W	Bazicko-fluoridová s pomalu tuhnoucí struskou	Vlastní ochrana
Y	Bazicko-fluoridová s rychle tuhnoucí struskou	Vlastní ochrana
Z	Jiné typy	–

3.2 Podmínky a parametry svařování metodou FCAW [1], [6], [29]

Pro svařování FCAW lze použít stejných zařízení jako u metody MAG. Vhodné je použití zdroje s proudovým rozsahem do 500 A, kdy se napětí na oblouku obvykle pohybuje od 25 do 35 V. Zdroje musí být ovšem naprogramovány pro svařování trubičkou, jelikož rychlost podávání trubičky je výrazně vyšší z důvodu vysoké proudové hustoty a rychlejšího odtavování drátu. Zvláštní pozornost musí být věnována podávání drátu, jelikož trubičkový drát je křehký a vlivem tlaku v podavači by mohl být polámán. Vhodné je použití hořáků s vodním chlazením ke snížení tepelného namáhání hubice. Kvůli velké hloubce průvaru se dále doporučuje užití keramické podložky, která slouží k lepšímu formování kořene svaru.

Při svařování většiny plněných drátů se používá stejnosměrný proud s nepřímým zapojením, tj. když je kladný pól připojený k trubičce. Některé typy elektrod však mohou být vyráběny i pro přímé zapojení, tudíž je důležité tuto informaci zkontrolovat v materiálovém listu daného výrobku.

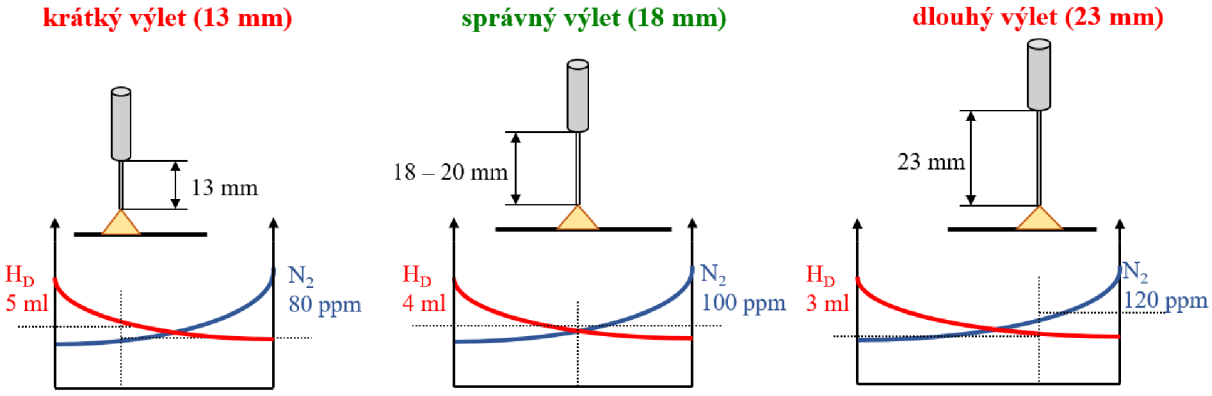
Výlet drátu se oproti svařování MAG liší. Tento parametr má značný vliv na výsledné vlastnosti svaru. U trubičkových drátů se doporučená hodnota výletu spočítá ze vztahu:

$$L = 12 + 5.D \tag{3.1}$$

kde: L – délka výletu [mm]

D – průměr drátu [mm]

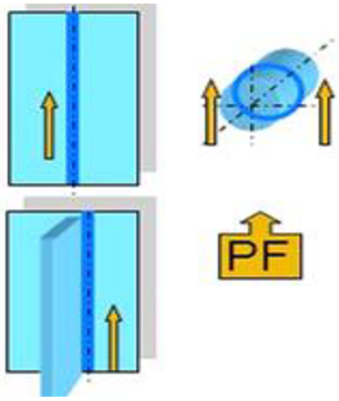
Pokud je výlet drátu malý, hrozí nebezpečí zvýšeného obsahu vodíku ve svaru. Naopak při velké volné délce drátu roste obsah dusíku ve svarovém kovu. Ideální hodnoty výletu jsou 18 až 20 mm (obr. 28).



Obr. 28 Vliv výletu drátu na obsah dusíku a vodíku ve svarové lázni [29]

4 NÁVRH A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI [1], [37]

Pro porovnání produktivity metod svařování MAG a FCAW byl zvolen koutový spoj typu PF (svařování zdola nahoru, obr. 29), kde je rozdíl mezi metodami nejpatrnější. Po doporučení pracovníků firmy ESAB Vamberk, s.r.o. byly vybrány 3 typy drátů – plný (metoda 135), rutilový (metoda 136) a kovový (metoda 138) – se stejným průměrem 1,2 mm. Pro zajištění minimální statistické přesnosti experimentu byly vyhotoveny 3 svary od každého typu drátu.



Obr. 29 Poloha PF [37]

Cílem praktické části bylo porovnat produktivitu svařování jednotlivými dráty (metodami), náročnost a orientační finanční nákladnost těchto procesů. V neposlední řadě bylo důležité zkontrolovat kvalitu makrostruktury svaru, která by měla být ve všech případech totožná.

4.1 Volba základního a přídavných materiálů [1], [22], [38]

Pro experimentální část byl zvolen daný základní materiál, který byl svařen různými typy přídavných materiálů:

- Konstrukční ocel ČSN 11 523 – nelegovaná a jemnozrnná ocel, která je vhodná ke svařování. Využívá se například pro výrobu mostních a jiných svařovaných konstrukcí, strojů a automobilů. Přibližné chemické složení je uvedeno v tabulce 6. Rozměry svařovaného materiálu byly 160 mm na délku s tloušťkou 20 mm a s šířkou v rozmezí od 85 do 120 mm (jednalo se o zbytky materiálu, které byly upraveny pouze na konstantní délku).

  Tab. 6 Chemické složení oceli ČSN 11 523 [39].

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0,200	1,600	0,550	0,050	0,045

- Plný drát OK Aristorod 12.50 ø 1,2 mm – lesklý (nepoměděný) svařovací drát určený pro svařování běžných nelegovaných ocelí metodou 135 s pevností v tahu do 530 MPa v ochranné atmosféře plynu M21 nebo C1. Složení, mechanické vlastnosti a orientační svařovací parametry jsou uvedeny v příloze 1.
- Plněný drát OK Tubrod 15.13 ø 1,2 mm – drát plněný rutilovou náplní pro svařování ocelí střední a vyšší pevnosti metodou 136 ve všech polohách do pevnosti 620 MPa a všude tam, kde je požadována vysoká produktivita práce. Je charakterizován snadnou ovladatelností, minimálním rozstřikem a nepatrným množstvím vytvořené strusky. Složení, mechanické vlastnosti a svařovací parametry jsou uvedeny v příloze 2.
- Plněný drát Coreweld 46 LS ø 1,2 mm – typ drátu, který je plněný kovovým práškem. Zkratka LS (low Sillicium) charakterizuje malý obsah křemíku, tato trubička tedy zaručuje povrch bez silikonových ostrůvků. Je vhodná pro ruční i robotizované svařování především tenkých plechů metodou 138. Složení, mechanické vlastnosti a orientační svařovací parametry jsou uvedeny v příloze 3.
- Ochranný plyn M21 – tento typ plynu je tvořen směsí 18 % CO_2 a 82 % Ar. Jedná se o univerzální plyn, který je vhodný pro všechny výše uvedené svařovací dráty. Má dobré svařovací vlastnosti a stabilizuje oblouk. Je vhodný pro zkratový i sprchový přenos. Dalšími důvody volby tohoto plynu jsou malý rozstřik kovu a vhodnost pro všechny tloušťky plechů.

4.2 Použitá zařízení [39], [40], [41]

Svařovna firmy ESAB Vamberk s.r.o. disponuje těmito zařízeními, která byla použita při zhotovení praktické části:

- Řezací stroj ESAB SGX 2500 – jedná se o plazmový CNC řezací stroj od firmy ESAB se třemi nástroji s variabilními příčnými posuvy až 2060 mm (obr. 30). Disponuje systémem pro automatické ovládání a regulaci plynu. Maximální řezací rychlost je 24000 $mm.min^{-1}$.

Obr. 30 Řezací stroj ESAB SGX 2500

- Svařovací zdroj AristoMig 4000i Pulse – lehký inventorový svařovací zdroj s univerzálním využitím (obr. 31). Je vhodný pro svařování metodami MIG/MAG (FCAW), MMA i TIG. Jeho nízká hmotnost, která ho činí snadněji mobilním, je výhodou zejména při svařování v náročných podmínkách, kdy je vyžadována vysoká kvalita a produktivita. Tento zdroj je vhodný pro široký výběr materiálů, rozměrů drátů a ochranných plynů. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab.7 Parametry svařovacího zdroje AristoMig 4000i Pulse [41].

Svařovací zdroj	AristoMig 4000i Pulse
Síťové napětí	380–440 V, +/- 10 %, 3~50/60 Hz
Rozsah pro MIG/MAG	16–400 A, 15–34 V
Napětí naprázdno	55 V
Hmotnost	44,5 kg
Rozměry délka x šířka x výška	610 x 250 x 445 mm

- Podavač drátu Aristo Feed 3004 s panelem Aristo $U8_2$ – Aristo Feed je moderní podavač drátu splňující nejpřísnější bezpečností standardy (obr. 31). Hmotnost tohoto podavače je 15 kg a rozměry 690 x 275 x 420 mm. Primárně slouží pro odvíjení drátu o průměru od 0,6–1,6 mm z cívek o hmotnosti 18 kg, kdy rychlost podávání je v rozsahu 0,8–25 $m.min^{-1}$. Řídicí panel $U8_2$ je velmi snadno ovladatelný s přehledným menu a jednoduchým nastavením všech požadovaných funkcí a parametrů (obr. 32). Kontroluje svařovací oblouk a optimalizuje svařovací parametry. Je také schopen měřit různé hodnoty, například hmotnost metru odtavovaného drátu či tepelný příkon.

Obr. 31 a 32 Zdroj pro svařování, podavač drátu a ovládací panel Aristo U8$_2$

4.3 Vlastní provedení experimentu [1], [2], [6], [28]. [42]

První část experimentu byla provedena v prostorách svařovny firmy ESAB Vamberk. Po domluvě se svářečem bylo nutné nejprve nadělit svařovaný materiál na konstantní délku 160 mm. K tomuto účelu byla použita plazmová řezačka ESAB SGX 2500. Pracovník vytvořil 18 desek základního materiálu s danou délkou, poté došlo k obroušení a očištění desek v místě budoucího svaru.

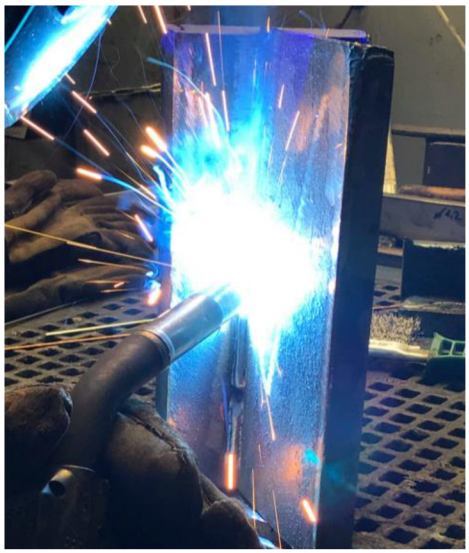
Po očištění následovalo tzv. heftování (stehování), což značně usnadnilo manipulaci se vzorkem i následnou tvorbu koutového svaru. Naheftované vzorky byly poté převáženy a hodnoty hmotností základního materiálu jednotlivých vzorků zaznamenány.

K samotnému svařování všech vzorků byl použit svařovací zdroj AristoMig 4000i Pulse, podavač drátu Aristo Feed 3004 s panelem Aristo U8$_2$. Shrnutí všech společných údajů jak pro metodu svařování MAG, tak FCAW (136 i 138) je v tabulce 8.

Tab. 8 Shrnutí společných údajů pro metodu MAG i FCAW.

Způsob svařování	Ruční
Směr svařování	Zdola nahoru (koutový svar typu PF)
Polarita	Nepřímá (+ na drátu)
Svařovací zdroj	AristoMig 4000i Pulse
Podavač drátu s řídicí jednotkou	Aristo Feed 3004 + Aristo U8$_2$
Ochranný plyn	M21 (18 % CO_2 a 82 % Ar)
Spotřeba plynu	15 l/min
Průměr drátu	1,2 mm
Sklon hořáku od svislice	10°
Základní materiál dle ČSN 42 0002	11 523
Délka svarové housenky	160 mm

Nejprve byly zhotoveny tři vzorky plným drátem (MAG – 135), poté tři vzorky drátem plněným rutilovou náplní (FCAW – 136) a na závěr tři vzorky trubičkou s kovovou náplní (FCAW – 138). Pro lepší orientaci byly vzorky označeny sériovým číslem. Svařovací proud, napětí i rychlost podávání drátu se mezi jednotlivými druhy svařovacího drátu měnily a byly voleny dle zkušeností svářeče, který vždy po výměně drátu nejprve vyzkoušel tyto parametry na zkušebním svaru (obr. 33).



Obr. 33 Zkouška parametrů

Při svařování bylo hlavním úkolem změřit dobu tavení elektrody (dobu navařování) t_t. Tento údaj byl velmi důležitý pro výpočty, na jejichž základě byly tyto metody porovnávány z hlediska produktivity (rychlost svařování a výkon navaření) a nákladnosti. Po dokončení této části experimentu se nechaly vzorky na vzduchu dochladit, aby mohly být zváženy pro zjištění hmotnosti návaru G_n. Jelikož byla ve firmě k dispozici pouze váha s přesností na 5 gramů, bylo nutné zjistit hmotnost všech přídavných drátů v délce jednoho metru m_D pro následné přesnější určení hmotnosti návaru G_n výpočtem. Dále bylo třeba pro tyto výpočty znát doplňující údaje jako stupeň plnění drátu n a výtěžnost drátu ε (tab. 9). Navážená hmotnost návaru G_{n0} byla brána pouze jako orientační a sloužila k ověření vypočtených hodnot (příloha 4).

Tab. 9 Parametry jednotlivých přídavných drátů [28].

Typ drátu	Hmotnost metru drátu m_D [g.m^{-1}]	Stupeň plnění drátu n [%]	Výtěžnost drátu ε [%]
OK Aristorod 12.50	8,84	0	97
OK Tubrod 15.13	7,00	18	85
Coreweld 46 LS	7,99	18	95

Druhá část experimentu proběhla v dílně ústavu strojírenských technologií. Nejprve byl vybrán jeden vzorek od každého typu drátu. Tyto vzorky byly oříznuty na plazmovém řezacím stroji. Řez byl proveden v dostatečné vzdálenost od místa svaru, aby nedošlo k jeho tepelnému ovlivnění. Každý kus byl poté rozřezán kolmo na směr svařování na kapalinou chlazené pile. Pro lepší práci se vzorky bylo nutné obrousit pilníkem ostré hrany, které vznikly při řezání.

Oblast průřezu vzorku (hlavně svaru) byla poté za mokra broušena brusnými kotouči o zrnitostech 80, 180, 280 a 600 grid. Zviditelnění makrostruktury bylo dosaženo leptáním. Vybroušený materiál musel být naleptán okamžitě, jinak by došlo k jeho korozi. Poté byly naleptané výbrusy nafoceny na speciálním optickém zařízení pro následné porovnání kvality jednotlivých vzorků.

a) Vzorky č. 1–3

Tyto tři svary byly zhotoveny plným drátem OK Aristorod 12.50 metodou svařování MAG. Nejprve byla svářečem vyhotovena kořenová vrstva, na kterou byla následně navařena druhá, tzv. krycí vrstva. Při svařování koutových svarů v poloze PF metodou MAG musí být parametry svařování nastaveny tak, aby k přenosu kovu docházelo zkratem. Jiný přenos není možný, jelikož by kov začal stékat. Parametry použité při tvorbě těchto housenek a hodnoty naměřené pro výpočty jsou uvedeny v tabulce 10. Svary jsou zobrazeny na obrázcích 34 až 36.

Tab. 10 Parametry svařování metodou MAG a údaje naměřené během procesu.

Technologie MAG (135)	**Svařovací proud I [A]**	**Svařovací napětí U [V]**	**Rychlost podávání v_p [m.min^{-1}]**	**Délka svaru l_n [mm]**	**Doba tavení elektrody t_t [s]**
Housenka **č. 1**	175	17,5	4,4	160	153
Housenka **č. 2**	175	17,5	4,4	160	144
Housenka **č. 3**	175	17,5	4,4	160	136
Průměrné hodnoty	**175**	**17,5**	**4,4**	**160**	**144,3**

Obr. 34 Housenka č. 1

Obr. 35 Housenka č. 2

Obr. 36 Housenka č. 3

b) Vzorky č. 4–6

Pro svaření housenek č. 4–6 byl vybrán plněný rutilový drát OK Tubrod 15.13. Z toho vyplývá, že šlo o metodu svařování plněným struskotvorným drátem FCAW (136). Oproti svarům č. 1–3 byly zvoleny značně vyšší parametry svařování způsobující sprchový přenos kovu s minimálním rozstřikem. K této skutečnosti mohlo dojít, jelikož rutilový drát disponuje daleko lepšími vlastnostmi při svařování koutových svarů v poloze PF.

Vznikající struska je rychletuhnoucí, tudíž přispívá k formování svaru, podporuje rychlost svařování a je velmi snadno odstranitelná. Svar byl vytvořen pouze jedním, přímým projetím hořáku. Parametry použité při tvorbě těchto housenek a hodnoty naměřené pro výpočty jsou uvedeny v tabulce 11. Svary jsou zobrazeny na obrázcích 37 až 39.

Tab. 11 Parametry svařování metodou FCAW (136) a údaje naměřené během procesu.

Technologie FCAW (136)	**Svařovací proud I [A]**	**Svařovací napětí U [V]**	**Rychlost podávání v_p [m.min^{-1}]**	**Délka svaru l_n [mm]**	**Doba tavení elektrody t_t [s]**
Housenka **č. 4**	240	26	9,0	160	69
Housenka **č. 5**	240	26	9,0	160	75
Housenka **č. 6**	240	26	9,0	160	68
Průměrné hodnoty	**240**	**26**	**9,0**	**160**	**70,7**

Obr. 37 Housenka č. 4

Obr. 38 Housenka č. 5

Obr. 39 Housenka č. 6

c) Vzorky č. 7–9

Poslední 3 vzorky byly svařeny drátem Coreweld 46LS, což je drát, který je plněný kovovým práškem. Tato metoda se označuje jako FCAW (138). Pro svařování byly nastaveny parametry, které byly velmi podobné jako v případě plného drátu. Jelikož tento typ drátu netvoří strusku podporující tvorbu svaru (jako v případě rutilového drátu), lze svařovat koutový svar v poloze PF pouze zkratovým přenosem (jako v případě plného drátu – metody MAG). Opět byl nejprve vytvořen kořen, na který byla následně navařena krycí vrstva. Parametry použité při tvorbě těchto housenek a hodnoty naměřené pro výpočty jsou uvedeny v tabulce 12. Svary jsou zobrazeny na obrázcích 40 až 42.

Tab. 12 Parametry svařování metodou FCAW (138) a údaje naměřené během procesu.

Technologie FCAW (138)	**Svařovací proud I [A]**	**Svařovací napětí U [V]**	**Rychlost podávání v_p [m.min^{-1}]**	**Délka svaru l_n [mm]**	**Doba tavení elektrody t_t [s]**
Housenka **č. 7**	160	17	4,4	160	144
Housenka **č. 8**	160	17	4,4	160	143
Housenka **č. 9**	160	17	4,4	160	137
Průměrné hodnoty	**160**	**17**	**4,4**	**160**	**141,3**

Obr. 40 Housenka č. 7

Obr. 41 Housenka č. 8

Obr. 42 Housenka č. 9

5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Tato část byla vypracována za použití veškerých naměřených a vypočtených údajů. Hlavní důraz byl kladen na produktivitu a ekonomičnost daných metod svařování. Z hlediska aplikace výsledků nemohla být přehlédnuta ani stránka kvality vzorků, a proto došlo i k porovnání makrostruktury průřezů svarových housenek vyhotovených jednotlivými metodami.

5.1 Porovnání z hlediska produktivity [1], [2], [16], [42]

Pro výpočet potřebných údajů k porovnání produktivity metod byly použity následující vztahy. Pro příklad jsou uvedeny výpočty pro vzorek č. 1 (výpočty pro všechny vzorky jsou uvedeny v příloze 4).

Prvním důležitým údajem je rychlost svařování v_s. Udává, kolik milimetrů nového svaru vznikne při svařování za jednotku času. Jedná se o základní veličinu při porovnávání produktivity svařování. Pro výpočet byl užit vztah:

$$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60, \tag{4.1}$$

Kde: v_s – rychlost svařování [mm.min^{-1}]
l_n – délka svarové housenky [mm]
t_t – doba tavení elektrody (doba navařování) [s]

Příklad: $v_s = \frac{160}{153} \cdot 60 = 62{,}7 \text{ mm.min}^{-1}$

Jak již bylo uvedeno dříve, hmotnost navařeného materiálu G_n je zcela zásadní pro výpočet výkonových a technologických veličin. Charakterizuje hmotnost odtaveného drátu tvořícího svár (po odstranění strusky). Lze ji velmi přesně teoreticky vypočítat ze vztahu:

$$G_n = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D \cdot \frac{\varepsilon}{100}, \tag{4.2}$$

kde: G_n – hmotnost navařeného materiálu [g]
t_t – doba tavení elektrody (doba navařování) [s]
v_p – rychlost podávání drátu [m.min^{-1}]
m_D – hmotnost metru drátu [g.m^{-1}]
ε – výtěžnost drátu [%]

Příklad: $G_n = \frac{153}{60} \cdot 4{,}4 \cdot 8{,}84 \cdot \frac{97}{100} = 96{,}2 \text{ g}$

Výkon navaření P_n je veličina popisující množství navařeného materiálu za jednotku času (většinou se používá za hodinu). Čím je výkon navaření větší, tím je metoda produktivnější. Tuto hodnotu lze spočítat ze vzorce:

$$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6, \tag{4.3}$$

kde: P_n – výkon navaření [kg.hod^{-1}]
G_n – hmotnost navařeného materiálu [g]
t_t – doba tavení elektrody (doba navařování) [s]

Příklad: $P_n = \frac{96{,}2}{153} \cdot 3{,}6 = 2{,}26 \text{ kg.hod}^{-1}$

Proudová hustota J má značný vliv na výkon navaření a slouží pro základní porovnání výtěžnosti různých metod svařování. Čím je proudová hustota vyšší, tím vyšší bude i výkon navaření. Ovlivňuje také výsledný tvar svaru. Pro výpočet byl užit vztah:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})}, \tag{4.4}$$

kde: J – proudová hustota [A.mm^{-2}]
I – svařovací proud [A]
S – plocha průřezu drátu vedoucí proud [mm^2]
D – průměr drátu [mm]
n – stupeň plnění drátu [%]

Příklad: $J = \frac{175}{\pi \cdot \frac{1{,}2^2}{4} \cdot (1 - \frac{0}{100})} = \frac{175}{1{,}13} = 154{,}9 \text{ A.mm}^{-2}$

Ze všech vypočtených hodnot byla pro lepší přehlednost vytvořena tabulka 13. Pro procentuální porovnání produktivity byla zvolena jako referenční metoda MAG. Vlivem velké proudové hustoty při svařování metodou FCAW (136), která byla v tomto experimentu o 66,5 % větší než u metody MAG (135), bylo možné svařovat v poloze PF touto metodou daleko efektivněji a výkonněji.

Při porovnání všech tří metod je na první pohled zřejmá dominance metody 136. V případě této metody vzrostla rychlost svařování v_s oproti metodě 135 dvojnásobně. Podobný výsledek byl vyvozen i při porovnání výkonu navaření P_n, kde bylo množství navařeného kovu metodou 136 o 42 % větší než u metody 135. Nejhorší produktivitu vykazovala metoda 138, která se rychlostí svařování téměř nelišila od metody 135 a její výkon navaření byl vlivem horší výtěžnosti drátu plněného kovem ještě o 10,5 % nižší.

Z tohoto zhodnocení vyplývá, že pro svařování v poloze PF je z hlediska produktivity nejvhodnější metoda FCAW (136) – svařování plněným drátem s rutilovou náplní. Metoda FCAW (138) – svařování plněným drátem s kovovou náplní – není pro tuto polohu svařování vhodná.

Tab. 13 Přehled vypočtených hodnot pro porovnání produktivity.

Metoda	**Číslo housenky**	**Doba tavení elektrody t_t [s]**	**Rychlost svařování v_s [mm.min^{-1}]**	**Proudová hustota J [A.mm^{-2}]**	**Výkon navaření P_n [kg.hod^{-1}]**
MAG (135)	Housenka **č. 1**	153	62,7	155	2,26
	Housenka **č. 2**	144	66,7	155	2,26
	Housenka **č. 3**	136	70,6	155	2,26
	Průměrné hodnoty	**144,3**	**66,7**	**155**	**2,26**
	Procentuální porovnání	100 %	100 %	100 %	100 %
FCAW (136)	Housenka **č. 4**	69	139,1	258	3,21
	Housenka **č. 5**	75	128,0	258	3,21
	Housenka **č. 6**	68	141,2	258	3,21
	Průměrné hodnoty	**70,7**	**136,1**	**258**	**3,21**
	Procentuální porovnání	**49 %**	**204 %**	**166,5 %**	**142 %**
FCAW (138)	Housenka **č. 7**	144	66,7	172	2,00
	Housenka **č. 8**	143	67,1	172	2,00
	Housenka **č. 9**	137	70,1	172	2,00
	Průměrné hodnoty	**141,3**	**68,0**	**172**	**2,00**
	Procentuální porovnání	98 %	102 %	111 %	88,5 %

5.2 Porovnání z hlediska nákladnosti [43], [44], [45]

Obecně existuje velká řada způsobů pro ekonomické zhodnocení svařování. V tomto případě byly pro porovnání nejhodnějším ukazatelem náklady na zhotovení jednoho metru svaru. Největší vliv na výslednou cenu svaru mají mzdové a režijní náklady vztažené na svářeče, náklady na přídavné svařovací materiály (ochranný plyn a svařovací drát) a na závěr náklady na spotřebovanou elektrickou energii.

Pro výpočty byly použity katalogové ceny přídavných materiálů udávané výrobcem (tab. 14). Hodinová sazba svářeče byla uvažována 350 CZK.hod^{-1} a cena energie byla zvolena 4,3 CZK.kWh^{-1}, dle aktuálního průměru v roce 2019.

Tab. 14 Náklady na přídavný svařovací materiál [44].

Přídavný materiál	Cena bez DPH
OK Aristorod 12.50 ø 1,2 mm, 18 kg	36 CZK.kg^{-1}
OK Tubrod 15.13 ø 1,2 mm, 16 kg	85 CZK.kg^{-1}
Coreweld 46 LS ø 1,2 mm, 16 kg	92 CZK.kg^{-1}
Ochranný plyn M21 – 20 l/200 bar/4,9 m^3	0,27 CZK.l^{-1}

Pro všechny tři metody byly určeny celkové orientační náklady pro vyhotovení svaru v délce jednoho metru N_c. Pro jednodušší určení nákladnosti jednotlivých metod byly pro výpočty brány již zprůměrované hodnoty vycházející z výpočtů produktivity. Pro kalkulaci byly užity následující vzorce. Uvedené příklady jsou pro nákladnost metody MAG (hodnoty pro metody 136 a 138 jsou zapsány v příloze 5):

$$N_S = \frac{1000 \cdot S_S}{60 \cdot v_S}, \tag{4.5}$$

kde: N_S – náklady na svářeče vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]
S_S – hodinová sazba svářeče [CZK.hod^{-1}]
v_S – rychlost svařování [mm.min^{-1}]

Příklad: $N_S = \frac{1000 \cdot 350}{60 \cdot 66,7} = 87,5$ CZK.m^{-1}

$$N_D = \frac{G_N}{1000 \cdot k \cdot \varepsilon} \cdot S_D, \tag{4.6}$$

kde: N_D – náklady na přídavný drát vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]
S_D – náklady na kilogram přídavného drátu [CZK.kg^{-1}]
G_N – hmotnost návaru [g]
ε – výtěžnost drátu [-]
k – korekční délkový koeficient (k = 0,16) [m]

Příklad: $N_D = \frac{90,7}{1000 \cdot 0,16 \cdot 0,97} \cdot 36 = 21,0$ CZK.m^{-1}

$$N_P = \frac{1000 \cdot Q_P}{v_S} \cdot S_P, \tag{4.7}$$

kde: N_P – náklady na ochranný plyn vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]
Q_P – spotřeba plynu (pro všechny metody 15 l.min^{-1}) [l.min^{-1}]
v_S – rychlost svařování [mm.min^{-1}]
S_p – náklady na litr ochranného plynu [CZK.l^{-1}]

Příklad: $N_P = \frac{1000.15}{66,7} \cdot 0,27 = 60,7$ CZK.m^{-1}

$$N_E = \frac{U.I}{60 \cdot v_S} \cdot S_E, \tag{4.8}$$

kde: N_E – náklady na elektrickou energii vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]
I – svařovací proud [A]
U – svařovací napětí [V]
v_S – rychlost svařování [mm.min^{-1}]
S_E – cena elektrické energie [CZK.kWh^{-1}]

Příklad: $N_E = \frac{175.17,5}{60 \cdot 66,7} \cdot 4,3 = 3,3$ CZK.m^{-1}

$$N_C = N_S + N_D + N_P + N_E, \tag{4.9}$$

kde: N_C – celkové náklady na svařování danou metodou [CZK.m^{-1}]
N_S – náklady na svářeče vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]
N_D – náklady na přídavný drát vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]
N_P – náklady na ochranný plyn vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]
N_E – náklady na elektrickou energii vztažené na 1 metr svaru [CZK.m^{-1}]

Příklad: $N_C = 87,5 + 21 + 60,7 + 3,3 = 172,5$ CZK.m^{-1}

Ze všech vypočtených údajů týkajících se nákladů byla vytvořena tabulka 15. Pro porovnání byla jako referenční opět zvolena metoda 135.

Z hlediska celkových nákladů N_c vyšla nejlépe metoda 136, přestože je rutilový drát pro svařování touto metodou několikanásobně dražší než plný drát pro svařování metodou 135. Po porovnání celkové ceny na zhotovení jednoho metru svaru je metoda FCAW (136) o více než 33 % levnější než v případě metody MAG. Tento fakt souvisí zejména s produktivitou metody 136, díky níž lze svár vyhotovit za daleko kratší čas, což vede ke značným úsporám na platu svářeče a na spotřebě ochranného plynu.

V případě porovnání metody 138 s metodou 135 je opět zřejmá nevhodnost použití této metody při svařování v poloze PF. Samotný trubičkový drát plněný kovovým práškem je rovněž několikanásobně dražší než drát plný, ovšem jelikož je rychlost svařování metody 135 a 138 téměř stejná, nedochází k úsporám na platu svářeče ani na spotřebě ochranného plynu. Ve výsledku jsou celkové náklady na zhotovení jednoho metru svaru metodou FCAW (138) ještě o 13,5 % větší než v případě metody MAG.

Tab. 15 Porovnání nákladnosti jednotlivých metod svařování.

Cena vztažena na zhotovení 1 metru svaru [CZK.m^{-1}]	**MAG (135)**	**FCAW (136)**	**FCAW (138)**
Plat svářeče	87,5	42,9	85,8
Přídavný drát	21,0	39,4	47,6
Ochranný plyn	60,7	29,8	59,6
Spotřeba energie	3,3	3,3	2,9
Celkové náklady [CZK.m^{-1}]	**172,5**	**115,4**	**195,9**
Procentuální porovnání	**100 %**	**66,9 %**	**113,5 %**

5.3 Porovnání z hlediska kvality [42]

Pro porovnání kvality svarové housenky byl vybrán vždy jeden vzorek charakterizující danou metodu svařování. Vybrány byly vzorky č. 3 (MAG 135), č. 5 (FCAW 136) a č. 7 (FCAW 138). U těchto housenek došlo nejprve k vizuálnímu porovnání tvaru profilu svaru. Dále byly změřeny a porovnány hloubky průvaru h_0 v místě kořene svaru a maximální šířky tepelně ovlivněné oblasti (příloha 6).

Následně byl vypočítán tepelný příkon Q_s, což je důležitý parametr pro určování kvality svaru, zejména jeho profilu. Udává, kolik se při procesu vneslo tepla do jednoho milimetru délky svaru. Tato hodnota nesmí být příliš nízká, jelikož by mohlo dojít k nedostatečnému provaření materiálu, v krajním případě až ke vzniku studeného spoje.

Na druhou stranu energie vnesená do oblasti svaru ovlivňuje i jeho okolí (základní materiál), tudíž s rostoucí hodnotou tepelného příkonu roste také velikost tepelně ovlivněné oblasti. Pro výpočet byl užit vztah (uvedený výpočet je pro svar č. 3 zhotovený metodou MAG, výpočty pro ostatní vzorky jsou v příloze 4):

$$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}, \qquad (4.10)$$

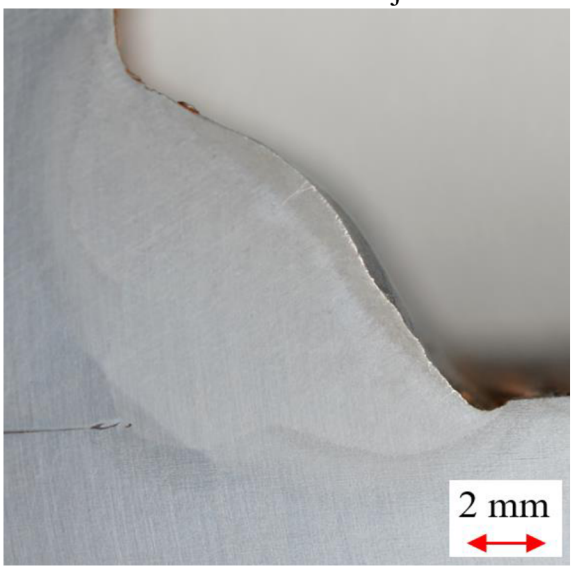
kde: Q_S – tepelný příkon [kJ.mm^{-1}]
I – svařovací proud [A]
U – svařovací napětí [V]
v_s – rychlost svařování [mm.min^{-1}]
η – tepelná účinnost procesu [-]; (pro MAG a FCAW $\eta = 0{,}8$)

Příklad: $Q_s = \frac{17{,}5 \cdot 175 \cdot 0{,}8 \cdot 60}{1000 \cdot 70{,}6} = 2{,}08$ kJ.mm^{-1}

Na obrázku 43 je zobrazen profil housenky č. 7, která byla vytvořena metodou 138 zkratovým přenosem kovu a dvěma průjezdy hořáku. Základní materiál je dostatečně provařen, nedošlo ke vzniku studeného spoje, ovšem v porovnání s metodami 135 a 136 disponuje daleko menší hodnotou průvaru v oblasti kořene svaru h_0, která je 0,5 mm (příloha 6).

Provaření do základního materiálu není rovnoměrné a na pravém okraji svarové housenky se vytvořil mírný zápal, který by však neměl mít na kvalitu svaru zásadní vliv.

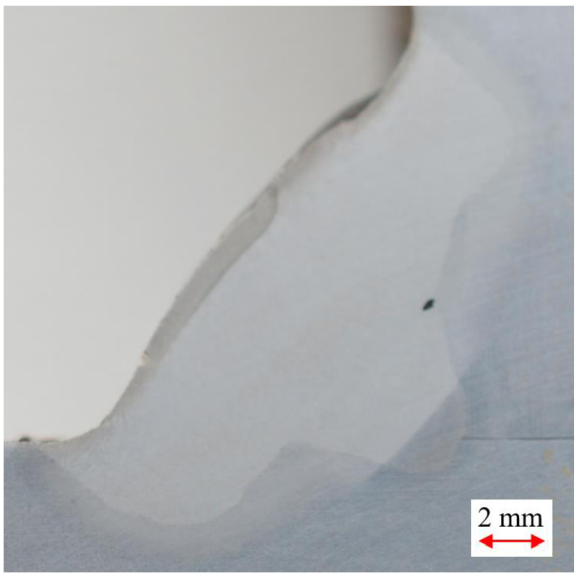
Hodnota tepelného příkonu Q_s je v tomto případě 1,95 kJ.mm^{-1}, což se nejvíce projevilo na maximální šířce tepelně ovlivněné oblasti, která je 1,9 mm. Maximální šířka TOO je v porovnání s ostatními metodami nejmenší, což je ovšem jediná výhoda užití metody 138 pro svařování v poloze PF.



Obr. 43 Profil housenky č. 7

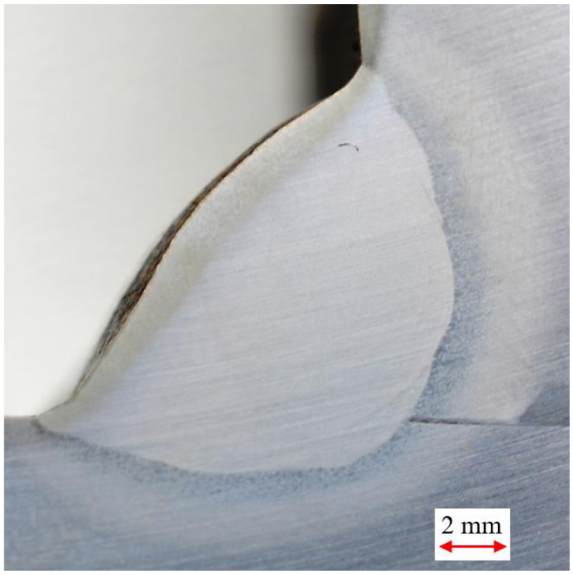
Na obrázku 44 je zobrazen profil svaru housenky č. 3. Tato housenka byla vytvořena metodou MAG zkratovým přenosem a dvěma průjezdy hořáku. Lze vidět dostatečné provaření do základního materiálu, nedošlo ke vzniku studeného spoje, ale provaření je opět velmi nerovnoměrné. Hloubka průvaru v oblasti kořene h_0 je v tomto případě 0,8 mm. V pravé části svaru, asi 3 mm nad kořenem je pór, který ovšem není příliš velký a vyskytuje se samostatně, tudíž nemá zásadní vliv na kvalitu tohoto svaru.

Hodnota tepelného příkonu je 2,08 kJ.mm^{-1} a maximální šířka tepelně ovlivněné oblasti je 2,1 mm. Tyto hodnoty se téměř neliší v porovnání s metodou 138. Ve výsledku je kvalita svarů zhotovených metodami 135 a 138 velmi podobná.



Obr. 44 Profil housenky č. 3

Jako poslední byl vyhodnocen profil housenky č. 5, která byla vytvořena metodou 136 sprchovým přenosem a jedním přímým průjezdem hořáku. Jak je vidět na obrázku 45, tento průvar je z hlediska kvality jednoznačně nejlepší. Lze pozorovat hladký přechod svarového kovu do základního materiálu bez hrozby vzniku studeného svarového spoje. Provaření do základního materiálu je symetrické a rovnoměrné po celé délce styku housenky a základního materiálu. Hloubka průvaru v oblasti kořene svaru h_0 je v porovnání s metodou 135 a 138 zdaleka největší (1,3 mm).



Obr. 45 Profil housenky č. 5

Jedinou nevýhodou je v tomto případě větší hodnota tepelného příkonu Q_s (2,34 kJ.mm^{-1}). Tepelný příkon a pravděpodobně i vyšší proudová hustota při svařování metodou 136 mají za následek zvětšení TOO. Maximální šířka tepelně ovlivněné oblasti je pro tuto housenku 2,6 mm, i přesto je tento svar z hlediska porovnání makrostruktury jednoznačně nejkvalitnější.

Souhrn všech vypočtených a naměřených údajů pro porovnání z hlediska kvality je v tabulce 16.

Tab. 16 Údaje charakterizující kvalitu svarového spoje.

Metoda	Tepelný příkon Qs [kJ.mm^{-1}]	Maximální šířka TOO [mm]	Hloubka průvaru v oblasti kořene h_0[mm]
MAG (135)	2,08	2,1	0,8
FCAW (136)	2,34	2,6	**1,3**
FCAW (138)	1,95	**1,9**	0,5

Z hlediska porovnání kvality svaru vychází nejlépe opět metoda svařování 136. Profil svaru housenky č. 5 má téměř dokonalý tvar, který vznikl pouhým jedním průjezdem hořáku. Struska, která se tvoří při svařování rutilovým drátem, je velmi snadno odstranitelná a podporuje tvorbu svaru. Z těchto důvodů je svařování metodou 136 lepší i z hlediska náročnosti svařování, zejména při svařování ve vynucených polohách nebo v místech, která jsou těžce dostupná.

6 ZÁVĚRY

V dnešní době je kladen čím dál větší důraz na zkvalitňování a zefektivňování procesu svařování. V této bakalářské práci byla rozebrána problematika metod svařování MAG (135) a FCAW (136 a 138). Úkolem bylo nejprve přiblížit principy těchto technologií tavného svařování v aktivním plynu s důrazem na přídavné materiály a následně provést experiment, na jehož základě došlo k porovnání produktivity, nákladnosti, kvality a náročnosti svařování metod 135 (svařování plným drátem), 136 (svařování plněným drátem s rutilovou náplní) a 138 (svařování drátem s kovovou náplní).

Ve spolupráci s firmou ESAB Vamberk, s.r.o. bylo navařeno celkem 9 vzorků (3 od každého typu drátu) koutového svaru v poloze PF (zdola nahoru). Jako základní materiál byla zvolena konstrukční ocel ČSN 11 523. U těchto vzorků bylo důležité zjistit dobu navařování t_t a hmotnost návaru G_N. Tyto hodnoty sloužily k výpočtům pro porovnání metod 135, 136 a 138 z hlediska produktivity a nákladnosti.

Z vypočtených údajů vyplynula jasná dominance metody 136. Proces svařování plněným drátem s rutilovou náplní byl ve výsledku z hlediska produktivity o 104 % rychlejší a hodnota výkonu navaření P_n byla o 42 % vyšší než v případě referenční metody MAG. Přestože je rutilový drát několikanásobně dražší oproti obyčejnému plnému drátu pro svařování metodou MAG, výsledné náklady na zhotovení jednoho metru svaru jsou o více než 33 % nižší. Tento fakt vychází právě z produktivity metody 136, kdy je svářeč schopen zhotovit svar v daleko kratším čase, čímž dochází k velké úspoře na jeho platu a na spotřebě ochranného plynu. Nejméně vhodné pro tuto polohu svařování bylo použití metody 138, kdy se rychlost svařování téměř nelišila oproti metodě MAG, výkon navaření P_n byl o 10,5 % nižší a celkové náklady byly ještě o 13,5 % větší než v případě metody 135.

Pro srovnání kvality svarového spoje byl vybrán vždy jeden vzorek charakterizující danou metodu svařování a došlo k vizuálnímu porovnání makrostruktury jejich profilů. I v tomto aspektu dopadla nejlépe metoda 136. Při svařování touto metodou se tvoří snadno odstranitelná struska, která pomáhá formovat svar a umožňuje svařování při daleko vyšších parametrech. Z toho důvodu měl profil svaru téměř dokonalý tvar, bez výraznějších vad a s velmi kvalitním a rovnoměrným průvarem v celé délce styku návaru a základního materiálu. Jelikož pro vytvoření kvalitní housenky metodou 136 stačil pouze jeden přímý průjezd hořáku, je tato technologie vhodná i z hlediska náročnosti svařování, a to zejména ve vynucených polohách a těžko dostupných místech.

Z uvedených výsledků vyplývá, že pro svařování konstrukční oceli ČSN 11 523 v poloze PF je nejvhodnější použití technologie FCAW (136) – svařování plněným rutilovým drátem. Tato metoda přináší velké zvýšení efektivity svařování v poloze PF současně se snížením nákladů a se zvýšením kvality svarového spoje.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [46]

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s.: il. ISBN 80-85771-81-0.

2. ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov*. 1. Bratislava: ETERNA PRESS, s.r.o, 2003, 203 s. ISBN 80-968359-5-5.

3. Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu. In: *www.esab.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.esab.cz/cz/cz/automation/gmaw/index.cfm

4. GMAW welding. In: *www.esab.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.esab.cz/cz/cz/news/image-archive/index.cfm

5. Historie a současnost metod svařování MIG/MAG. *Svět svaru: Časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů* [online]. © 2015, (1), 5 s. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2015/05/2015-1_HistorieMIGMAG.pdf

6. ORSZÁGH, Peter a Viktor ORSZÁGH. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000. ISBN 80-887-8036-5.

7. MAG welding of pipe end plate in preparation for resonance testing. In: *www.flickr.com* [online]. © 2006 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.flickr.com/photos/twiltd/8473450398

8. MESSLER, Robert W. *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*. New York: John Wiley, 1999. ISBN 04-712-5376-6.

9. MIG/MAG svařování. In: *automig.cz* [online]. ©2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/

10. Základy svařování MIG/MAG. In: *www.ewm-group.com* [online]. © 2019 [cit. 2019 04-02]. Dostupné z: https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/mig-mag-schweissen-grundlagen.html

11. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-802-2731-676.

12. HRSTKA, David. *Monitorování svařovacích parametrů u metody svařování MAG jako prostředek zajištění kvality svaru*. Liberec, 2010. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.

13. Gas shielded arc welding processes (TIG/MIG/MAG). In: *www.open.edu* [online]. © 2018 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/gas-shielded-arc-welding-processes-tig/mig/mag

14. HONEGGER, Harry. Principles of Industrial Welding: A Text for Students and Others Interested in Welding. Cleveland, Ohio: James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1978. ISBN 0937390178, 9780937390177.

15. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II: část svařování* [online]. Technická 2896/2, Brno, 2006 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf

16. BEZÁK. *Zváracie procesy a zariadenia: učebný text pre vyšší zváračský personál*. Bratislava, 2011. ISBN 978-80-89421-01-5.

17. Fundamentals of MAG Welding. In: *www.kobelco-welding.jp* [online]. © 1995-2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.kobelco-welding.jp/education-center/Fundamentals/Fundamentals02.html

18. WU, C.S., De-gang ZOU a Jin-qiang GAO. *Determining the critical transition current for metal transfer in gas metal arc welding (GMAW)*. 2008/12/01, **2**. DOI: 10.1007/s11706-008-0059-8.

19. MIG Welding. In: *www.weldability.com* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.weldability-sif.com/media/docs/Intro_MIG_Welding.pdf

20. KLEANDER, Antonín. *Přídavné materiály pro svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 233 s.

21. Dokumenty a specifikace – OK Autrod 12.56. In: *www.esab.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-autrod-12-56.cfm

22. Dráty pro svařování v ochranných atmosférách. In: *www.svarovani.cz* [online]. © 2016 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.svarovani.cz/userfiles/files/07-03.pdf

23. Marathon Pac. In: *www.esab.com* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.esab.com/aristorod/en/Marathon-Pac.cfm

24. MAG – svařování nelegovaných ocelí: Základy technologie a volba ochranné atmosféry. In: *www.messer.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.messer.cz/documents/20591/717449/MAG_svarovani_nelegovane_ocele.pdf/d3ad6ba1-9a25-4f4e-a2f2-4e7ff7c8c572

25. How to Improve Your Welds: Helpful hints for GMAW. In: *www.thefabricator.com* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.thefabricator.com/article/arcwelding/how-to-improve-your-welds--helpful-hints-for-gmaw

26. The GMAW/FCAW Welding Gun. In: *www.halversoncts.com* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.halversoncts.com/712-the-gmawfcaw-welding-gun.html

27. Značení tlakových lahví. In: *www.messergroup.com* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.messergroup.com/web/messer-technogas-spol.-s.r.o./znaceni-tlakovych-lahvi

28. Přídavné svařovací materiály. In: *bcz.vamberk.eu/* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://bcz.vamberk.eu/cd-dst-2013/PDF/1_pridavne_svarovaci/E/E1_zakladni_informace.pdf

29. HERMAN, Petr. Svařování plněnými elektrodami, Wirpo s.r.o. [přednáška], [cit. 2019-04-02].

30. OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6, vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

31. VEVERKA, Jan. Technologie výroby trubičkových drátů firmy OERLIKON a jejich použití. In: OMNITECH: Svařování bez kompromisů [online]. 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: https://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/vyrobatrubickovych_dratu%20.html

32. FCAW: Understand what Flux Cored Arc welding is. In: *www.irmasolda.pt* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.irmasolda.pt/en/technical-welding-articles/fcaw-flux-cored-arc-to-understand-welding-and/

33. HERMAN, Petr a Jaroslav KUBÍČEK. Svařování plněnými elektrodami [přednáška], [cit. 2019-04-02].

34. Productive technologies of flux-cored wires by welding. In: *www.wiretechworld.com* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.wiretechworld.com/productive-technologies-of-flux-cored-wires-by-welding/

35. What is Flux Cored Arc Welding (FCAW). In: *weldnotes.com* [online]. 2018, © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://weldnotes.com/?p=123

36. *Katalog přídavných materiálů pro svařování: Páté přepracované a doplněné vydání*. ESAB, Vamberk, 2012.

37. Polohy svařování. In: *Slideplayer.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://slideplayer.cz/slide/2801850/

38. Konstrukční ocel ČSN 11523. In: *www.tprom.cz* [online]. © 2009-2015 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.tprom.cz/wiki/ocel/11523

39. Řezací stroj ESAB SGX 2500. In: *www.esab.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.esab.cz/cz/cz/products/cutting-automation/cutting-machines/sgx.cfm

40. Návod pro AristoMIG 4004i Pulse. In: *www.svarecky-elektrody.cz* [online]. ©2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://img.svarecky-elektrody.cz/files/Navod_Aristo_Mig_4004i_PULSE.pdf?download=0

41. AristoFeed 3004. In: *www.esab.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.esab.cz/cz/cz/products/arc-welding-equipment/wire-feeders/aristo-feed-3004-4804-u82.cfm

42. FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFER, Věra OLŠANOVÁ, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír, SCHWARZ a Július VESELKO. Materiály a jejich svařitelnost. 2 vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

43. Aktuální průměrná cena elektřiny. In: *www.energie123.cz* [online]. © 2011-2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/

44. Tlakové lahve s argonem a směsnými plyny. In: *Www.svarecky-chrudim.cz/* [online]. © 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.svarecky-chrudim.cz/dokumenty/tlakove_lahve.pdf

45. NOVÁK, Stanislav a Jiří MRÁČEK. *Parametry, které ovlivňují náklady na svařování* [online]. 2011, 6 s. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/Zelezarenska_KLadno.pdf

46. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://citace.lib.vutbr.cz/info

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
b	převýšení svaru	[mm]
D	průměr drátu	[mm]
FCAW	Flux-cored Arc Welding	[-]
GMAW	Gas Metal Arc Welding	[-]
G_n	hmotnost návaru	[g]
G_{n0}	orientační hmotnost návaru	[g]
h	hloubka průvaru	[mm]
h_0	hloubka průvaru v oblasti kořene	[mm]
I	svařovací proud	[A]
I_p	impulzní proud	[A]
I_z	základní proud	[A]
J	proudová hustota	[$A.mm^{-2}$]
KV	nárazová práce	[J]
k	korekční délkový koeficient	[m]
L	volná délka drátu (výlet drátu)	[mm]
l_n	délka svaru	[mm]
MAG	Metal Active Gas	[-]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
MMA	Manual Metal Arc Welding	[-]
m_D	hmotnost metru drátu	[$g.m^{-1}$]
N_C	celkové náklady na svařování danou metodou	[$CZK.m^{-1}$]
N_D	náklady na přídavný drát vztažené na 1 metr svaru	[$CZK.m^{-1}$]
N_E	náklady na elektrickou energii vztažené na 1 metr svaru	[$CZK.m^{-1}$]
N_P	náklady na ochranný plyn vztažené na 1 metr svaru	[$CZK.m^{-1}$]
N_S	náklady na svářeče vztažené na 1 metr svaru	[$CZK.m^{-1}$]
n	stupeň plnění drátu	[%]
PF	poloha svařování svislá nahoru	[-]
P_n	výkon navaření	[$kg.hod^{-1}$]
Q_P	spotřeba plynu	[$l.min^{-1}$]
Q_S	tepelný příkon	[$kJ.mm^{-1}$]
S	plocha průřezu drátu vedoucí proud	[mm^2]
S_D	náklady na kilogram přídavného drátu	[$CZK.kg^{-1}$]
S_p	náklady na litr ochranného plynu	[$CZK.l^{-1}$]
S_S	hodinová sazba svářeče	[$CZK.hod^{-1}$]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
t_c	doba cyklu	[s]
t_t	doba navařování (doba tavení elektrody)	[s]
U	svařovací napětí	[V]
v_s	rychlost svařování	[$mm.min^{-1}$]
v_p	rychlost podávání drátu	[$m.min^{-1}$]
z	šířka svaru	[mm]
ε	výtěžnost drátu	[%]
η	tepelná účinnost procesu	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Aplikace obloukového svařování tavící se elektrodou [3] 9
Obr. 2 Aplikace obloukového svařování tavící se elektrodou [3] 9
Obr. 3 Aplikace obloukového svařování tavící se elektrodou [4] 9
Obr. 4 Aplikace obloukového svařování tavící se elektrodou [4] 9
Obr. 5 Svařování metodou MIG/MAG [7] 11
Obr. 6 Princip technologie MAG [10] 12
Obr. 7 Elektrický oblouk [13] 13
Obr. 8 Rozdělení napětí v oblouku [1] 13
Obr. 9 Základní rozměry svaru [6] 14
Obr. 10 Vliv podávání drátu na proud [11] 14
Obr. 11 Přímá a nepřímá polarita svařovacího proudu [16] 15
Obr. 12 Zobrazení volné délky (výletu) drátu [12] 15
Obr. 13 Oblasti přenosu kovu v oblouku [15] 16
Obr. 14 Zkratový přenos kovu [17] 16
Obr. 15 Kapkový přenos [18] 17
Obr. 16 Sprchový přenos [19] 17
Obr. 17 Impulzní přenos [16] 17
Obr. 18 Marathon Pac ESAB [23] 19
Obr. 19 Přídavné materiály ESAB [21] 19
Obr. 20 Vliv ochranného plynu na tvar svaru [25] 21
Obr. 21 Zařízení pro ruční svařování metodou MAG [9] 23
Obr. 22 Svařovací hořák [26] 24
Obr. 23 Značení tlakových lahví [27] 24
Obr. 24 Princip svařování metodou FCAW [32] 25
Obr. 25 Rozdělení plněných drátů [33] 26
Obr. 26 Plněný (trubičkový) drát [35] 26
Obr. 27 Bezešvé (A) a falcované dráty (B–D) [34] 27
Obr. 28 Vliv výletu drátu na obsah dusíku a vodíku ve svarové lázni [29] 28
Obr. 29 Poloha PF [37] 29
Obr. 30 Řezací stroj ESAB SGX 2500 30
Obr. 31 Zdroj pro svařování a podavač drátu 31
Obr. 32 Ovládací panel Aristo U82 31
Obr. 33 Zkouška parametrů 32
Obr. 34 Housenka č. 1 33
Obr. 35 Housenka č. 2 33
Obr. 36 Housenka č. 3 33
Obr. 37 Housenka č. 4 34
Obr. 38 Housenka č. 5 34
Obr. 39 Housenka č. 6 34
Obr. 40 Housenka č. 7 35
Obr. 41 Housenka č. 8 35
Obr. 42 Housenka č. 9 35
Obr. 43 Profil housenky č. 7 42
Obr. 44 Profil housenky č. 3 42
Obr. 45 Profil housenky č. 5 43

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické reakce probíhající v tavné lázni [1] 18
Tab. 2 Symboly pro rázové vlastnosti svarového kovu [6] 20
Tab. 3 Pevnostní charakteristiky svarového kovu [6] 20
Tab. 4 Rozdělení oxidačních plynů dle chemického složení (dle ČSN EN ISO 14175) [1] ... 22
Tab. 5 Druh náplně trubičkového drátu a její charakteristika [36] 27
Tab. 6 Chemické složení oceli ČSN 11 523 [39] 29
Tab. 7 Parametry svařovacího zdroje AristoMig 4000i Pulse [41] 30
Tab. 8 Shrnutí společných údajů pro metodu MAG i FCAW 31
Tab. 9 Parametry jednotlivých přídavných drátů [28] 32
Tab. 10 Parametry svařování metodou MAG a údaje naměřené během procesu 33
Tab. 11 Parametry svařování metodou FCAW (136) a údaje naměřené během procesu 34
Tab. 12 Parametry svařování metodou FCAW (138) a údaje naměřené během procesu 35
Tab. 13 Přehled vypočtených hodnot pro porovnání produktivity 38
Tab. 14 Náklady na přídavný svařovací materiál [44] 39
Tab. 15 Porovnání nákladnosti jednotlivých metod svařování 41
Tab. 16 Údaje charakterizující kvalitu svarového spoje 43

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 OK Aristorod 12.50 [36]
Příloha 2 OK Tubrod 15.13 [36]
Příloha 3 Coreweld 46 LS [36]
Příloha 4 Protokoly ke vzorkům s výpočty produktivity
Příloha 5 Výpočty nákladnosti jednotlivých metod
Příloha 6 Měření hloubky průvaru v oblasti kořene a maximální šířky TOO

OK AristoRod 12.50

SFA/AWS A 5.18: ER 70S-6
EN ISO 14341A: G3Si1

Použití:
Lesklý (nepoměděný) svařovací drát určený pro svařování většiny běžných nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností v tahu do 530 MPa, např. pro výrobu ocelových konstrukcí, tlakových nádob, transportních zařízení apod. Je vhodný i pro svařování jemnozrnných ocelí s mezí kluzu do 420 MPa. Výborné podávací vlastnosti umožňují použití vysokoproduktivní metody SAT™.

Vhodnost pro svařování, např.:
P 235/S 235 až P 420/S 420 a jiné

Klasifikace, certifikace:

CE	EN 13479
ABS	3YSA
BV	SA3YM
DB	42.039.29
DNV	III YMS
GL	3YS
LR	3S, 3YS
TÜV	10052

další: CWB, RS

Ochranný plyn (EN ISO 14175):
M21, C1

Klasifikace svarového kovu:

EN ISO 14341-A:	G 38 2 C G3Si1
EN ISO 14341-A:	G 42 4 M G3Si1

Svařovací proud: =(+)

Typické chemické složení drátu (%):

C	Si	Mn
0,10	0,90	1,50

Polohy svařování:

Jiné údaje:
W.Nr. 1.5125

Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	R_m MPa	R_{eL} ($R_{p0,2}$) MPa	A_5 %	KV (J)/°C +20	-20	-30	-29	-40
EN	TZ 0	M21	560	470	26	130	90	70		60
EN	TZ 1	M21	495	370	28	120	90			
EN	TZ 0	C1	540	440	25	110	70			
AWS	TZ 0	C1	>480	(>400)	>22				>27	

TZ 0 - stav po svařování, TZ 1 - stav po žíhání 620°C/15 h.

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Ø d (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost svar. kovu g/100g drátu	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
0,8	60 - 200	18 - 24	95	14	3,2 - 10,0	0,8 - 2,5
1,0	80 - 300	18 - 32	96	16	2,7 - 15,0	1,0 - 5,5
1,2	120 - 380	18 - 35	97	18	2,5 - 15,0	1,3 - 8,0
1,6	225 - 550	28 - 38	98	20	2,3 - 15,0	2,1 - 11,4

OK TUBROD 15.13

SFA/AWS A 5.20: E 71T-1C-H4
E71T-1M-H8
EN ISO 17632-A: T 42 2 P C 1 H5
T 46 2 P M 1 H10

Použití:
Plněná elektroda s rutilovou náplní pro svařování ocelí střední a vyšší pevnosti ve všech polohách do pevnosti 620 MPa všude tam, kde je požadována vysoká produktivita práce ve všech polohách. Pro snadnou ovladatelnost a pro nepatrné množství strusky s minimálním rozstřikem je velmi vhodná pro výrobu nejrůznějších ocelových konstrukcí, nádrží i pro svařování potrubí. Tento typ patří mezi nejpoužívanější druhy svařovacích materiálů v řadě evropských i světových loděnic.

Klasifikace, certifikace:

ABS	3SA, 3YSA
BV	SA 3 M, SA3YMHH
CE	EN 13479
DB	42.039.21
DNV	IIIYMS (H10)
GL	3 Y H10S
LR	3 S, 3YS H15
RS	3YHHS
TÜV	05019
PRS	3YS H10
Jiné:	RINA

Typ náplně:
rutilová

Ochranný plyn:
EN ISO 14175: M21, C1

Výtěžnost:
~ 85%

Svařovací proud: =(+)

Typické chemické složení - čistý svarový kov (%):

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Nb
0,06	0,50	1,25	<0,20	<0,20	<0,40	<0,08	<0,05

Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	R_m MPa	R_{p02} MPa	A_5 %	KV (J)/°C -20
ISO	TZ 0	C1	550	> 420	> 22	> 54
ISO	TZ 0	M21	595	> 460	> 22	> 54

TZ 0 - stav po svařování

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Průměr (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost svar. kovu (%)	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
1,2	150 - 250	23 - 35	85	20	5,8 - 20,7	2,1 - 7,5

Coreweld 46LS

Klasifikace:
SFA/AWS A 5.20: E 70 C-6 MH 4
EN ISO 17632-A: T 46 4 MM 2 H 5

Použití:
Plněná elektroda s kovovým práškem poskytující povrch bez silikonových ostrůvků. Je vhodná pro svařování tenkých plechů pro ruční i robotizované svařování.

Klasifikace, certifikace:
-

Typ:
s kovovým práškem

Ochranný plyn:
M20, M21 (EN ISO 14175)

Obsah difuzního vodíku:
< 4 ml/100g

Svařovací proud: =(+)

Typické chemické složení - čistý svarový kov (%):

C	Si	Mn
0,08	0,60	1,30

Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A_5 %	KV (J)/°C -40
Typ	490	590	26	72

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Průměr (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost svar. kovu (%)	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
1,2	100 - 320	16 - 32	95	20	1,8 - 12,0	1,3 - 7,5

E27

PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 1	**Způsob přenosu kovu: zkratový**	**Technologie svařování: MAG (135)**

Přídavný materiál-drát: OK Aristorod 12.50	**Ochranný plyn: M21**

Průměr drátu:	D =	1,2	mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar	
Hmotnost metru drátu:	m_D =	8,84	g/m	Spotřeba: 15	l/min
Stupeň plnění:	n =	0	%		
Výtěžnost drátu:	ε =	97	%		

Základní materiál: ČSN 11 523 **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I =	175	A	Délka svarové housenky: l_n =	160	mm
Svorkové napětí: U =	17,5	V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 =	4970	g
Rychlost podávání drátu: v_p =	4,4	$m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c =	5065	g
Doba tavení elektrody: t_t =	153	s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} =	95	g
Délka odtavené elektrody: l_t =	11,2	m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p =	38,25	l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	99,2	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	96,2	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	1,13	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	154,9	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	2,26	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,35	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	62,7	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); $\eta = 0{,}8$	Q_s =	2,34	kJ/mm

Obrázek svaru:

PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 2	**Způsob přenosu kovu: zkratový**	**Technologie svařování: MAG (135)**

Přídavný materiál-drát: OK Aristorod 12.50 | **Ochranný plyn: M21**

Průměr drátu:	D =	1,2 mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar		
Hmotnost metru drátu:	m_D =	8,84 g/m	Spotřeba:	15	l/min
Stupeň plnění:	n =	0 %			
Výtěžnost drátu:	ε =	97 %			

Základní materiál: ČSN 11 523 | **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I =	175	A	Délka svarové housenky: l_n =	160	mm
Svorkové napětí: U =	17,5	V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 =	4960	g
Rychlost podávání drátu: v_p =	4,4	$m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c =	5050	g
Doba tavení elektrody: t_t =	144	s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} =	90	g
Délka odtavené elektrody: l_t =	10,6	m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p =	36	l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	93,4	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	90,5	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	1,13	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	154,9	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3,6$ (kg/hod)	P_n =	2,26	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,35	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	66,7	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); η = 0,8	Q_s =	2,20	kJ/mm

Obrázek svaru:

PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 3	**Způsob přenosu kovu: zkratový**	**Technologie svařování: MAG (135)**

Přídavný materiál-drát: OK Aristorod 12.50 | **Ochranný plyn: M21**

Průměr drátu:	D =	1,2 mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar		
Hmotnost metru drátu:	m_D =	8,84 g/m	Spotřeba:	15	l/min
Stupeň plnění:	n =	0 %			
Výtěžnost drátu:	ε =	97 %			

Základní materiál: ČSN 11 523 | **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I =	175	A	Délka svarové housenky: l_n =	160	mm
Svorkové napětí: U =	17,5	V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 =	4415	g
Rychlost podávání drátu: v_p =	4,4	$m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c =	4500	g
Doba tavení elektrody: t_t =	136	s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} =	85	g
Délka odtavené elektrody: l_t =	10,0	m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p =	34	l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	88,2	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	85,5	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	1,13	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	154,9	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	2,26	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,35	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	70,6	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); η = 0,8	Q_s =	2,08	kJ/mm

Obrázek svaru:

PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 4	**Způsob přenosu kovu: sprchový**	**Technologie svařování: FCAW (136)**

Přídavný materiál-drát: OK Tubrod 15.13	**Ochranný plyn: M21**
Průměr drátu: D = 1,2 mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar
Hmotnost metru drátu: m_D = 7,00 g/m	Spotřeba: 15 l/min
Stupeň plnění: n = 18 %	
Výtěžnost drátu: ε = 85 %	

Základní materiál: ČSN 11 523 **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I = 240 A	Délka svarové housenky: l_n = 160 mm
Svorkové napětí: U = 26 V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 = 4765 g
Rychlost podávání drátu: v_p = 9 $m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c = 4830 g
Doba tavení elektrody: t_t = 69 s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} = 65 g
Délka odtavené elektrody: l_t = 10,4 m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p = 17,3 l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	72,5	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	61,6	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	0,93	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	258	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	3,21	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,94	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	139,1	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); η = 0,8	Q_s =	2,15	kJ/mm

Obrázek svaru:

PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 5	**Způsob přenosu kovu: sprchový**	**Technologie svařování: FCAW (136)**

Přídavný materiál-drát: OK Tubrod 15.13	**Ochranný plyn: M21**

Průměr drátu:	D =	1,2	mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar	
Hmotnost metru drátu:	m_D =	7,00	g/m	Spotřeba:	15 l/min
Stupeň plnění:	n =	18	%		
Výtěžnost drátu:	ε =	85	%		

Základní materiál: ČSN 11 523 **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I =	240	A	Délka svarové housenky: l_n =	160	mm
Svorkové napětí: U =	26	V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 =	5100	g
Rychlost podávání drátu: v_p =	9	$m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c =	5170	g
Doba tavení elektrody: t_t =	75	s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} =	70	g
Délka odtavené elektrody: l_t =	11,3	m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p =	18,8	l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	78,75	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	66,9	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	0,93	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	258	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	3,21	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,94	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	128	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); η = 0,8	Q_s =	2,34	kJ/mm

Obrázek svaru:

PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 6	**Způsob přenosu kovu: sprchový**	**Technologie svařování: FCAW (136)**

Přídavný materiál-drát: **Ochranný plyn: M21**

Průměr drátu:	D = 1,2	mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar
Hmotnost metru drátu:	m_D = 7,00	g/m	Spotřeba: 15 l/min
Stupeň plnění:	n = 18	%	
Výtěžnost drátu:	ε = 85	%	

Základní materiál: ČSN 11 523 **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I =	240	A	Délka svarové housenky: l_n =	160	mm
Svorkové napětí: U =	26	V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 =	4530	g
Rychlost podávání drátu: v_p =	9	$m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c =	4600	g
Doba tavení elektrody: t_t =	68	s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} =	70	g
Délka odtavené elektrody: l_t =	10,2	m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p =	17	l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	71,4	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	60,7	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	0,93	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	258	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	3,21	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,94	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	141,2	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); η = 0,8	Q_s =	2,12	kJ/mm

Obrázek svaru:

PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 7	Způsob přenosu kovu: zkrat	Technologie svařování: FCAW (138)

Přídavný materiál-drát: Coreweld 46 LS | **Ochranný plyn: M21**

Průměr drátu:	D =	1,2 mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar		
Hmotnost metru drátu:	m_D =	7,99 g/m	Spotřeba:	15	l/min
Stupeň plnění:	n =	18 %			
Výtěžnost drátu:	ε =	95 %			

Základní materiál: ČSN 11 523 | **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

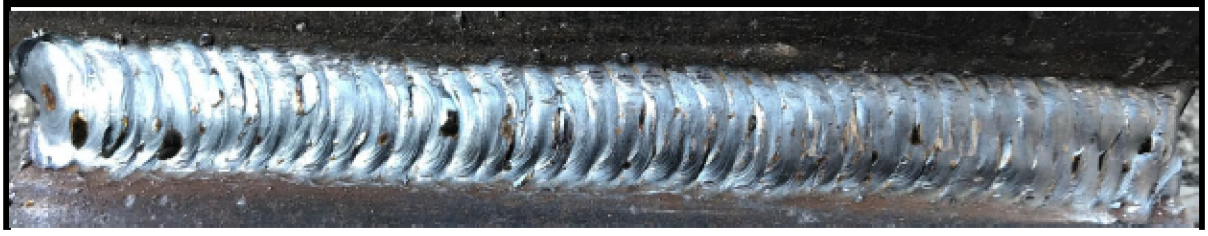
Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I =	160	A	Délka svarové housenky: l_n =	160	mm
Svorkové napětí: U =	17	V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 =	5105	g
Rychlost podávání drátu: v_p =	4,4	$m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c =	5185	g
Doba tavení elektrody: t_t =	144	s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} =	80	g
Délka odtavené elektrody: l_t =	10,6	m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p =	36	l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	84,4	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	80,2	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	0,93	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	172	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	2,01	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,36	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	66,7	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); $\eta = 0{,}8$	Q_s =	1,96	kJ/mm

Obrázek svaru:



PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 8	**Způsob přenosu kovu: zkratový**	**Technologie svařování: FCAW (138)**

Přídavný materiál-drát: Coreweld 46 LS	**Ochranný plyn: M21**
Průměr drátu: D = 1,2 mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar
Hmotnost metru drátu: m_D = 7,99 g/m	Spotřeba: 15 l/min
Stupeň plnění: n = 18 %	
Výtěžnost drátu: ε = 95 %	

Základní materiál: ČSN 11 523 **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

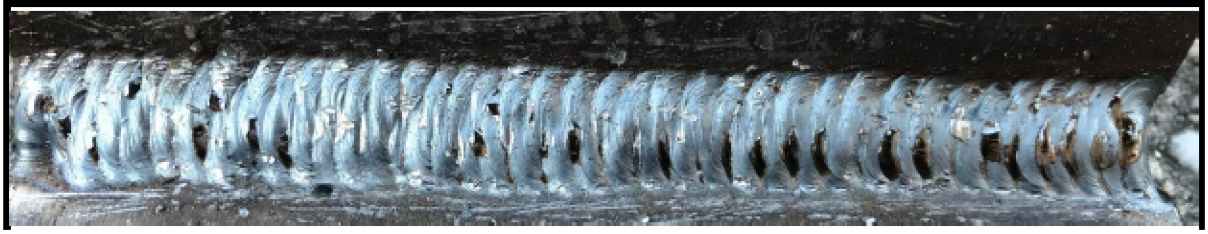
Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I = 160 A	Délka svarové housenky: l_n = 160 mm
Svorkové napětí: U = 17 V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 = 4360 g
Rychlost podávání drátu: v_p = 4,4 $m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c = 4440 g
Doba tavení elektrody: t_t = 143 s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} = 80 g
Délka odtavené elektrody: l_t = 10,5 m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p = 35,8 l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	83,8	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	79,6	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	0,93	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	172	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	2,00	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,36	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	67,1	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); η = 0,8	Q_s =	1,95	kJ/mm

Obrázek svaru:



PROTOKOL K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Číslo vzorku: 9	**Způsob přenosu kovu: zkratový**	**Technologie svařování: FCAW (138)**

Přídavný materiál-drát: Coreweld 46 LS	**Ochranný plyn: M21**

Průměr drátu:	D = 1,2	mm	Složení: 18 % CO_2, 82 % Ar
Hmotnost metru drátu:	m_D = 7,99	g/m	Spotřeba: 15 l/min
Stupeň plnění:	n = 18	%	
Výtěžnost drátu:	ε = 95	%	

Základní materiál: ČSN 11 523 **Rozměry vzorku: 160 x (85-120) x 20**

Měřené hodnoty:

Svařovací proud: I =	160	A	Délka svarové housenky: l_n =	160	mm
Svorkové napětí: U =	17	V	Orientační hmotnost vzorku: G_0 =	5165	g
Rychlost podávání drátu: v_p =	4,4	$m.min^{-1}$	Orientační hmotnost vzorku s návarem: G_c =	5240	g
Doba tavení elektrody: t_t =	137	s	Orientační hmotnost návaru: G_{n0} =	75	g
Délka odtavené elektrody: l_t =	10	m	Celková spotřeba ochr. plynu: V_p =	34,3	l

Výkonové a technologické hodnoty:

Spotřeba elektrody	$G_e = \frac{t_t}{60} \cdot v_p \cdot m_D$ (g)	G_e =	80,3	g
Hmotnost návaru	$G_n = G_e \cdot \frac{\varepsilon}{100}$ (g)	G_n =	76,3	g
Plocha průřezu vedoucí proud	$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1 - \frac{n}{100})$ (mm^2)	S =	0,93	mm^2
Proudová hustota	$J = \frac{I}{S}$ ($A.mm^{-2}$)	J =	172	$A.mm^{-2}$
Výkon navaření	$P_n = \frac{G_n}{t_t} \cdot 3{,}6$ (kg/hod)	P_n =	2,00	kg/hod
Měrná spotřeba energie	$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n}$ (kWh/kg)	N_n =	1,36	kWh/kg
Postupná rychlost svařování	$v_s = \frac{l_n}{t_t} \cdot 60$ (mm/min)	v_s =	70,1	mm/min
Specifický tepelný příkon	$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{1000 \cdot v_s}$ (kJ/mm); η = 0,8	Q_s =	1,86	kJ/mm

Obrázek svaru:

Příloha 5 Výpočty nákladnosti jednotlivých metod 1/2

Náklady na svařování metodou MAG (135)

$$N_S = \frac{1000 \cdot S_S}{60 \cdot v_S} = \frac{1000.350}{60.66,7} = 87,5 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$G_N = \frac{G_{N1} + G_{N2} + G_{N3}}{3} = \frac{96,2 + 90,5 + 85,5}{3} = 90,7 \text{ g}$$

$$N_D = \frac{G_N}{1000 \cdot k \cdot \varepsilon} \cdot S_D = \frac{90,7}{1000 \cdot 0,16 \cdot 0,97} \cdot 36 = 21,0 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$N_P = \frac{1000 \cdot Q_P}{v_S} \cdot S_P = \frac{1000.15}{66,7} \cdot 0,27 = 60,7 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$N_E = \frac{U.I}{60 \cdot v_S} \cdot S_E = \frac{175.17,5}{60.66,7} \cdot 4,3 = 3,3 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$N_C = N_S + N_D + N_P + N_E = 87,5 + 21,0 + 60,7 + 3,3 = \mathbf{172,5 \text{ CZK.m}^{-1}}$$

Náklady na svařování metodou FCAW (136)

$$N_S = \frac{1000 \cdot S_S}{60 \cdot v_S} = \frac{1000.350}{60.136,1} = 42,9 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$G_N = \frac{G_{N4} + G_{N5} + G_{N6}}{3} = \frac{61,6 + 66,9 + 60,7}{3} = 63,1 \text{ g}$$

$$N_D = \frac{G_N}{1000 \cdot k \cdot \varepsilon} \cdot S_D = \frac{63,1}{1000.0,16.0,85} \cdot 85 = 39,4 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$N_P = \frac{1000 \cdot Q_P}{v_S} \cdot S_P = \frac{1000.15}{136,1} \cdot 0,27 = 29,8 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$N_E = \frac{U.I}{60 \cdot v_S} \cdot S_E = \frac{240.26}{60.136,1} \cdot 4,3 = 3,3 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$N_C = N_S + N_D + N_P + N_E = 42,9 + 39,4 + 29,8 + 3,3 = \mathbf{115,4 \text{ CZK.m}^{-1}}$$

Náklady na svařování metodou FCAW (138)

$$N_S = \frac{1000 \cdot S_S}{60 \cdot v_S} = \frac{1000.350}{60.68,0} = 85,8 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$G_N = \frac{G_{N7} + G_{N8} + G_{N9}}{3} = \frac{80,2 + 79,6 + 76,3}{3} = 78,7 \text{ g}$$

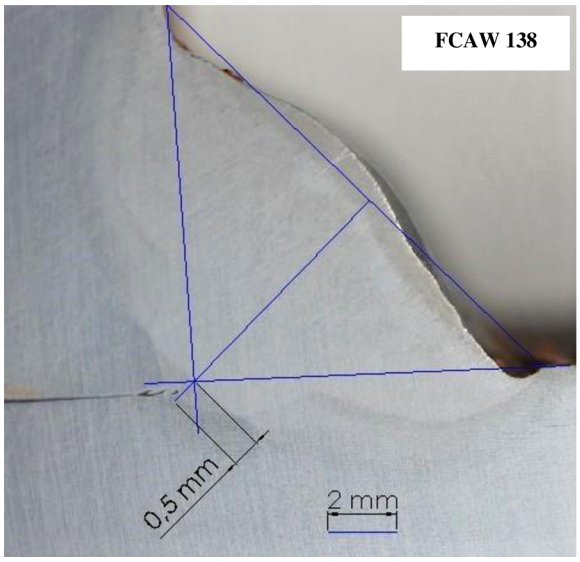
$$N_D = \frac{G_N}{1000 \cdot 0,16 \cdot \varepsilon} \cdot S_D = \frac{78,7}{1000 \cdot 0,16 \cdot 0,95} \cdot 92 = 47,6 \text{ CZK.m}^{-1}$$

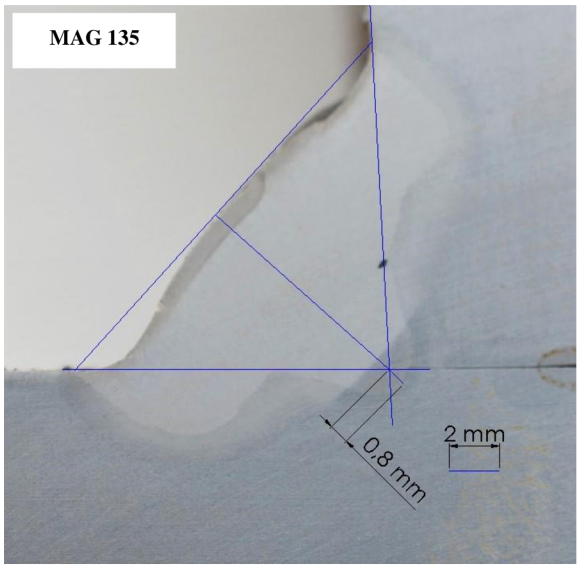
$$N_P = \frac{1000 \cdot Q_P}{v_S} \cdot S_P = \frac{1000.15}{68,0} \cdot 0,27 = 59,6 \text{ CZK.m}^{-1}$$

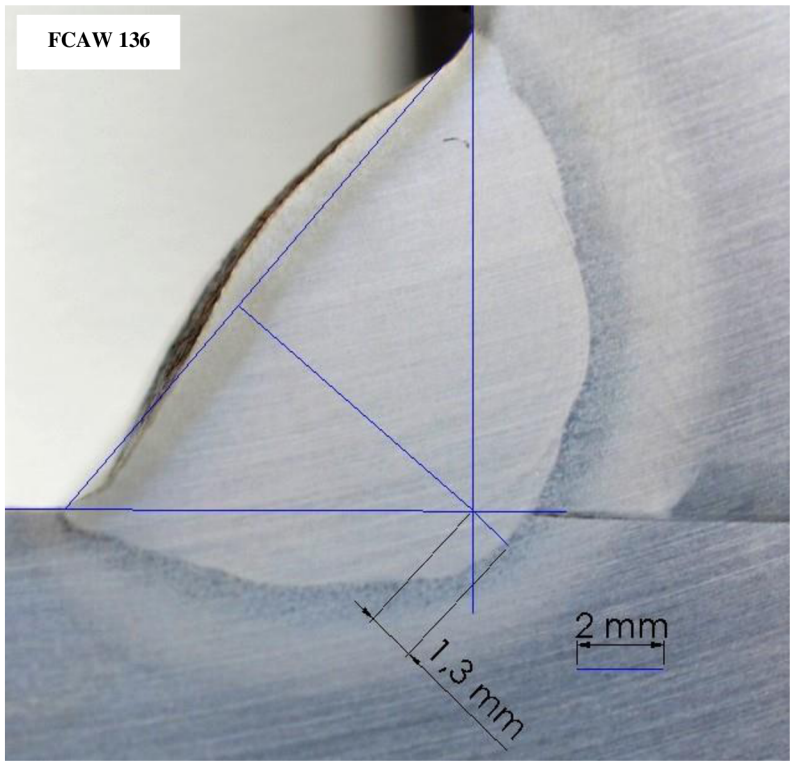
$$N_E = \frac{U.I}{60 \cdot v_S} \cdot S_E = \frac{160.17}{60.68,0} \cdot 4,3 = 2,9 \text{ CZK.m}^{-1}$$

$$N_C = N_S + N_D + N_P + N_E = 85,8 + 47,6 + 59,6 + 2,9 = \mathbf{195,9 \text{ CZK.m}^{-1}}$$

Měření hloubky průvaru v oblasti kořene







Měření největší šířky TOO