

POSOUZENÍ POUŽITELNOSTI PROCESU ZRYCHLENÉHO ZKRATU MAG PRO SVAŘOVÁNÍ PLECHU 4 – 6 MM

Diplomová práce

Studijní program: M 2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Autor práce: **Bc. Jindřich Nosek**
Vedoucí práce: Doc., Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2014/2015

ZADANÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jindřich Nosek**
Osobní číslo: **S11000902**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie**
Název tématu: **Posouzení použitelnosti procesu zrychleného zkratu MAG pro svařování plechu tloušťky 4 – 6 mm**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Prostudujte způsob svařování MAG zrychleným zkratem (Rapid Arc), vliv parametrů svařování MAG na geometrii koutového svaru a jeho kvalitu.
2. Seznamte se s monitorovacím zařízením WeldMonitor a s SW NIS-elements.
3. Prostudujte metody statistického návrhu experimentů a jejich dosavadní využití pro optimalizaci geometrické a parametrické oblasti koutových svarů podle původní metodiky efektivity jejich provedení.
4. Proved'te navržený plán experimentů pro optimalizaci parametrů a geometrie koutových svarů a podle zavedené metodiky je vyhodno'te.
5. Proved'te zhodnocení svarů podle normy ČSN EN ISO 5817 a vymezte parametrické pole podle normové kvality svarů. Vyhodno'te získané výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **Tabulky, grafy, makrostruktury**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] HUDEC, Z.: **Technologičnost návrhu svarů MAG pro ocelové konstrukce, habilitační práce, TU Liberec 2012.**
- [2] HRSTKA, D.: **Monitorování svařovacích parametrů u metody svařování MAG s vysokou hustotou výkonu, disertační práce, TU Liberec 2009.**
- [3] HUDEC, Z.: **Gas Metal Rapid Arc Welding Potential, 2012, Manufacturing Technology Vol. 12, No. 13.**
- [4] SUBAN, M., Tusek, J.: **Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, Journal of Materials Processing Technology, 2001, Elsevier**
- [5] MENDEZ,P.F., EAGAR, T.W.: **Penetration and Defects Formation in High-Current Arc Welding, 2003, Welding Journal.**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Konzultant diplomové práce: **prof. RNDr. Jan Pícek, CSc.**
Katedra aplikované matematiky

Datum zadání diplomové práce: **27. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **6. ledna 2015**

L.S.

Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 3. Prosince 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiju-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tom to případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 6. 1. 2015

Podpis:

ANOTACE:

Předmětem diplomové práce je posouzení použitelnosti procesu zrychleného zkratu MAG pro svařování plechu 4 – 6 mm drátem pr. 1 mm. Práce porovnává koutové svary, zhotovené podle statistického plánu experimentů (DOE), dle vlivu parametrů na kvalitu svaru. Zkoumanými parametry jsou vzdálenost konce drátu od povrchu, úhel náklonu hořáku, vliv rychlosti drátu a velikosti proudu, vliv plochy návaru a rychlosti svařování. Měřítkem kvality jsou především hodnoty uvedené v normě ČSN EN ISO 5817 a dále tvar a kvalita svaru, posouzená z jeho makrostruktury.

KLÍČOVÁ SLOVA: MAG, Rapid Arc, kvalita svaru, optimalizace.

ANNOTATION:

The subject of this thesis is the evaluation of applicability of rapid short-arc GMAW process, used on 4-6 mm thick sheet and using 1 mm wire. Parameters of fillet welds, performed according to DOE, are evaluated in accordance to their effect on a weld quality. The parameters are contact tip to work distance (CTWD), an angle of the torch, wire feed speed (WFS), current, cross-sectional area of weld deposition and travel speed (TS). Criteria of quality evaluation are based on CSN EN ISO 5817 so as the shape and quality, discovered from weld macrostructure.

KEY WORDS: GMAW, Rapid Arc, weld quality, optimization.

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Doc. Ing. Zdeňku Hudcovi, Ph.D., za odbornou pomoc při utváření této práce, za ochotu a věnovaný čas.

Obsah

Použité výrazy a zkratky	8
Úvod	9
1. Teoretická část.....	10
1.1 Procesy založené na výkonu tavení drátu	10
1.1.1. Princip procesu Rapid arc (zrychlený zkrat)	11
1.1.2. Proces založený na tavení materiálu, svařování MAG s vysokou hustotou výkonu (metodou HiPen)	14
1.1.3. Vliv plynu na vysokovýkonné způsoby svařování	15
1.1.4. Aplikace svařování zrychleným zkratem (Rapid arc)	16
1.2. Zajištění kvality svařování při použití vysokovýkonných metod svařování	18
1.2.1 Nepravidelná housenka – “boulování“	21
1.3 Návrh statistické metody a zpracování výsledků	26
1.3.1. Metoda středové kompozice	26
2. Laboratorní postup	28
3. Použité zařízení, příslušenství a spotřební materiál	31
3.1. Svařovací zdroj Migatron Omega 550 S-V Basic	31
3.2. Přídavný materiál.....	32
3.3. Použité ochranné plyny	33
3.4. Použitý materiál	33
4. Laboratorní měření boulování a zápalů svarů	34
4.1. Měření boulování.....	34
4.2. Měření zápalů	35
4.2.1. Zápalý	35
4.3. Způsob provedení	36
5. Experimentální část.....	38
5.1. Návrh experimentů podle statistické metody (DOE)	38
5.2. Grafické vyjádření návrhu parametrů	40
5.3. Zpracování výsledků	43
5.4.1. Posouzení vlivu výletu drátu a plochy návaru (rychlosti svařování) při konstantní rychlosti drátu $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, a sklonu hořáku 34°	44
5.4.2. Rychlost drátu $26 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	46
5.4.3. Posouzení vlivu výletu drátu, sklon hořáku 42° , rychlost drátu $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	48
5.4.4. Rychlost drátu $26 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	50
5.5.1. Vliv úhlu hořáku.....	52
5.5.2. Posouzení vlivu rychlosti drátu a výletu drátu – extrémní hodnoty, sklon hořáku 38°	60
5.5.3. Posouzení vlivu sklonu hořáku a plochy návaru – extrémní hodnoty.....	62
6. Závěr.....	64
7. Použité vzorce	70
8. Seznam použité literatury	71
9. Rozsah práce	73

Použité výrazy a zkratky:

$V_D \left[\frac{m}{min} \right]$ – rychlost drátu (WFS)

$V_S \left[\frac{m}{min} \right]$ – rychlost svařování (TS)

I [A] – el. proud

U [V] – el. napětí

x – hloubka závaru v mezeře [mm]

z – hloubka závaru v ose svaru [mm]

v – účinná výška koutového svaru [mm]

a - výpočtová tloušťka koutového svaru [mm]

p – převýšení [mm]

w – šířka housenky [mm]

MAG – (metal activ gas) – svařování drátem v aktivním ochranném plynu

Rapid Arc – zrychlený zkrat (RA)

Rapid Melt – rotující oblouk

HiPen – zkratovaná sprcha

F7 – ochranný plyn Ferromaxx 7

A – měřená plocha návaru koutového svaru [mm²]

DOE – design of experiments – statistický návrh experimentů

CTWD – vzdálenost kontaktní špičky od povrchu [mm]

Humping – boulování [mm]

N - nepřijatelný

P - přijatelný

H – vnesené teplo [kJ/cm]

ÚVOD

Zadání této diplomové práce navazuje na celou řadu diplomových prací, které byly zaměřeny na měření a optimalizaci efektivity provedení koutového svaru metodou MAG. Její charakter je jak ekonomický (produktivita) tak i kvalitativní (min. vnesené teplo). Základní metodika, kterou byla efektivita koutového svaru počítána byla odvozena již před cca 15-ti lety a za tu dobu byla její spolehlivost prověřena při optimalizaci řady systémů zdroj-drát-plyn pomocí statistického návrhu experimentů, kde byla použita jako výstupní veličina.

Tato práce se od předchozích výrazně liší. Na rozdíl od předchozích prací, kde byl předmětem optimalizace proces hlubokozávarové sprchy, tady se jedná o proces zrychleného zkratu, který se vyznačuje vysokými rychlostmi svařování a tím i nižší stabilitou tvorby svarové housenky. Proto byla tato práce více zaměřena na hodnocení a optimalizaci kvality svařování. Další změnou je počet vyhodnocovaných parametrů. Proces hlubokozávarové sprchy byl již natolik technologicky zvládnut, že k optimalizaci dalších systémů byly potřeba jen 2 základní parametry – rychlost drátu a rychlost svařování, což při rozpisu experimentů podle DOE představovalo pouze cca 12 experimentů a celkový počet experimentů, včetně opakovaných nepřevýšil 25. Proces zrychleného zkratu, který byl optimalizován poprvé, si vyžádal zahrnutí dalších dvou parametrů - vzdálenosti kontaktní špičky od povrchu (CTWD) a úhlu sklonu hořáku, což počet základních experimentů navýšil na 30 a celkový počet převýšil 60. Vzhledem k tomu, že počítačový program, který byl použit pro předchozí aplikace, předpokládal optimalizaci pouze 2 nebo 3 parametrů, bylo nutno zajistit jeho úpravu pro 4 parametry, což se v průběhu řešení této práce nepodařilo. Proto je výsledkem této práce pouze zhodnocení kvality a vymezení rozsahu parametrů pro zajištění přijatelné kvality svarů podle stávajících norem a vlastní optimalizace provedení svaru, která byla dopracována až po vstupní tabulky pro její provedení pomocí programu, zde chybí.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže **SGS 21005** ze strany Technické University v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

1. Teoretická část

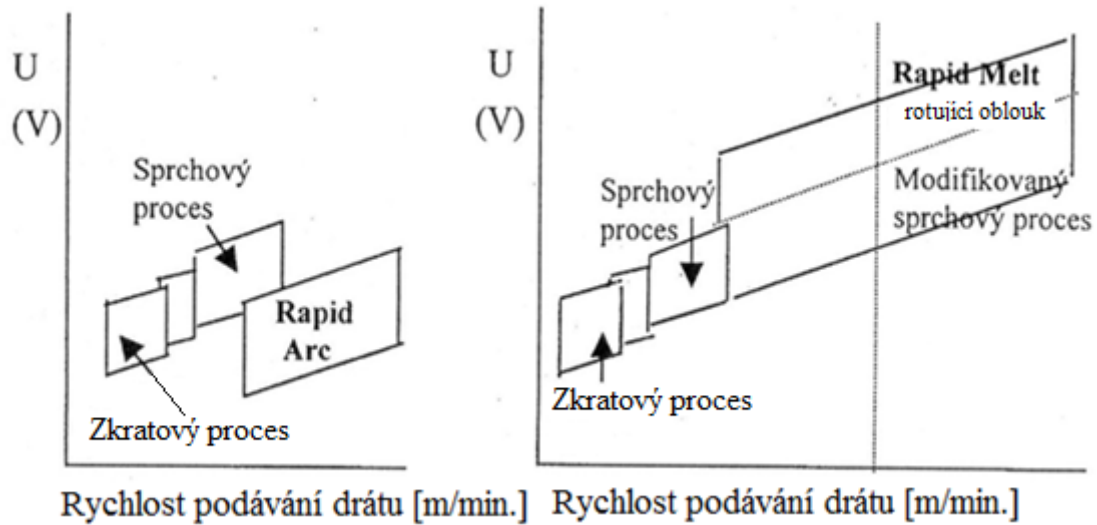
Vysokovýkonné procesy svařování MAG

1.1. Procesy založené na výkonu tavení drátu

Modifikace vysokovýkonného svařování v ochranném plynu jedním drátem představují dvě varianty “Rapid Processing“. Nazývají se RAPID ARC a RAPID MELT, které vyvinula již neexistující firma AGA AB před 20 - ti lety. Oba jsou založeny na společném principu. Používají vysokou rychlost podávání drátu, i přes 30 m/min. a používají větší, až dvojnásobný výlet elektrody, než stávající procesy (pro drát 1,2 mm cca 32 mm), čímž se zvýší jeho odpor a konec drátu se rychleji taví. K tomu přispívá i vyšší proudová hustota. Jako ochranný plyn se používá Ar + 8% CO₂.

Při procesu RAPID ARC vzniká zkratový proces při vyšším rozsahu proudů a nižších napětí. Zkratování probíhá velmi rychle a umožňuje zvýšit rychlost svařování až na dvojnásobek. Proces RAPID ARC si zachovává výhody zkratového procesu, který se používá hlavně při svařování tenkých plechů a v polohách. Minimální hloubka plechu je v tomto případě 4 mm.

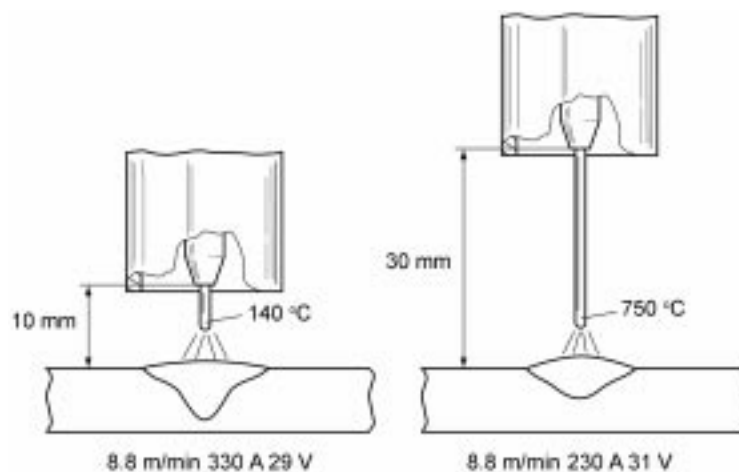
Proces RAPID MELT se naopak uplatňuje při svařování větších tloušťek materiálu vyššími proudy a napětími, přičemž rychlost podávání drátu může být až 50 m/min. Podle zvoleného napětí může vzniknout přenos kovu rotačním obloukem (oblast vyššího napětí) nebo moderovaným sprchovým procesem (oblast nižšího napětí). V obou případech je možné získat výkon tavení až 20 kg/h. Proces RAPID ARC má v porovnání s konvečním GMAW nižší měrný tepelný příkon. Proto je teplem ovlivněná oblast menší a jsou i menší deformace. Naopak proces RAPID MELT má větší tepelný příkon, pomalejší chladnutí, ale i nárůst velikosti vnitřního napětí a deformace [1].



Obr. 1 Procesy Rapid Arc a Rapid Melt [1]

1.1.1. Princip procesu Rapid Arc (zrychlený zkrat)

Proces je založen na zvýšení výletu drátu a nastavení ostrého úhlu hořáku. Plochá volt-ampérová charakteristika zdroje MAG způsobuje samoregulaci délky oblouku, takže větší výlet drátu umožňuje vyšší rychlost podávání drátu, protože drát se vlivem odporového tepla ohřívá na vysokou teplotu a rychleji se taví (obr. 1). [3]



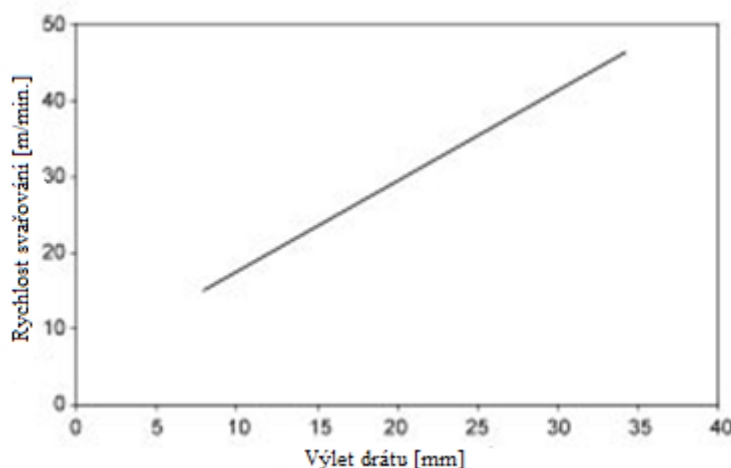
Obr. 2 Vliv teploty konce drátu na délce výletu [3]

Vzhledem k tomu, že celkové množství tepla se nemění, zvýšený podíl odporového tepla R (Ω) ve výletu drátu snižuje podíl tepla oblouku, potřebného na tavení základního materiálu. To vyjadřuje rovnice celkového tepelného výkonu P (kW) generovaného na výstupu z hořáku (1):

$$P = I \cdot (U_a + I \cdot R) = I \cdot U_a + I^2 \cdot \rho \cdot \frac{L}{D^2} \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

Kde L (mm) je délka výletu drátu, ρ je měrný odpor, D (mm) je průměr drátu, I (A) je proud, U_a je pokles napětí na anodě.

Na obr. 2 je demonstrován vliv výletu drátu na jeho tavný výkon, kde je patrné, že trojnásobné zvýšení výletu drátu způsobí více než dvojnásobný tavný výkon.

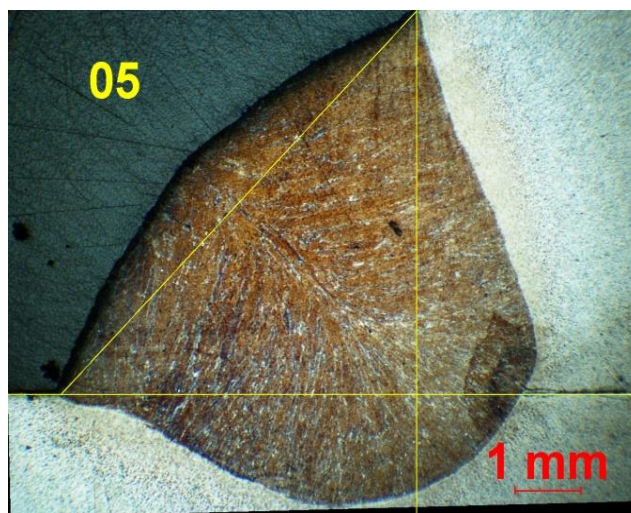


Obr. 3 Vliv rychlosti podávání drátu na délce jeho výletu [3]

Tlak oblouku (napětí) se nesmí dostat na příliš vysokou úroveň, jinak nastane nestabilita v přenosu kovu – tzv. “boulování“ svarové housenky. Díky zvýšené rychlosti posuvu drátu, se proud zvýší, ale musí být vyvážen odpovídajícím zvýšením výletu drátu.

Výlet drátu je nastaven na úroveň mezi 20 – 30 mm podle průměru drátu a podávací rychlosti. Průtok plynu je třeba nastavit na vyšší hodnotu, vzhledem k poloze a vzdálenosti hořáku od materiálu. Vzhledem k tomu, že tato metoda je založena na odporovém teple drátu, není možno ji aplikovat na hliník, jehož měrný odpor je velmi nízký.

Vysoký tavný výkon drátu umožňuje vyšší rychlost svařování a tedy i jeho vysokou produktivitu. Na druhé straně tavení základního materiálu a tedy i hloubka závaru je nižší. Vlivem natavení hořáku do ostrého úhlu se povrch housenky rozšíří a i při použití vysokých rychlostí svařování nedochází k převýšení svaru. Výsledkem jsou tedy výplňové koutové svary, rovného povrchu a mělkého, ale dostatečného závaru.

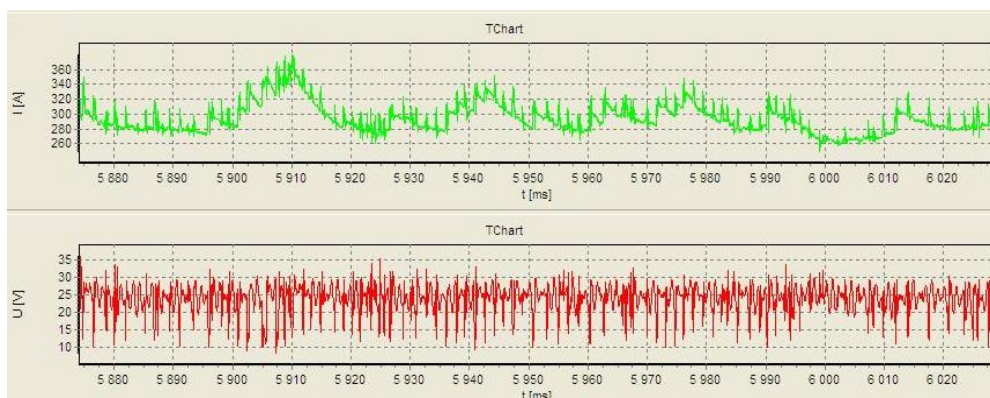


Obr. 4 Příklad svaru, zhotoveného metodou Rapid Arc. [5]

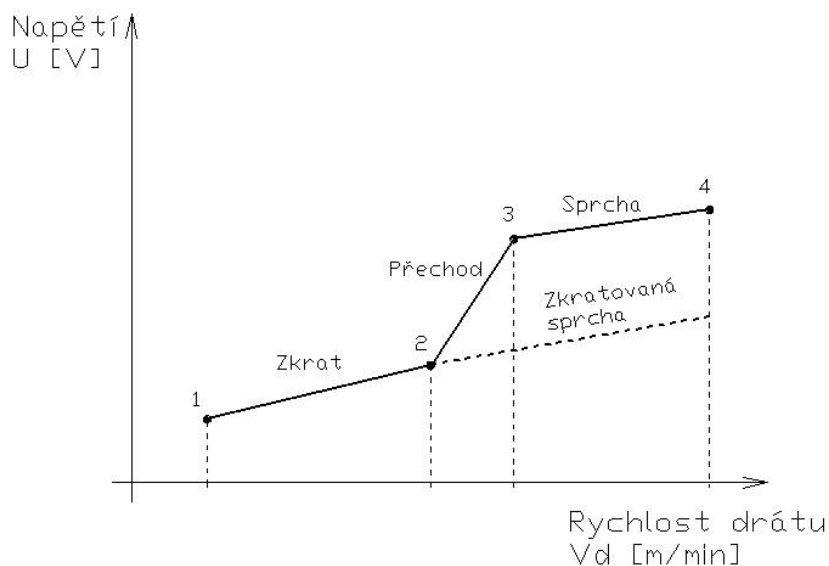
Na obr. 3 je zobrazen svar, zhotovený metodou Rapid Arc drátem 1,2 mm, plyn Ar-CO₂ 92/8, rychlost drátu 25 m/min, proud 449 A, rychlost svařování 163 cm/min. Velikost svaru a = 5mm.

1.1.2. Proces založený na tavení materiálu, svařování MAG s vysokou hustotou výkonu (metodou HiPen)

S využitím moderních invertorových zdrojů s řídicí frekvencí 50 kHz bylo možno snížit napětí a výlet drátu v oblasti sprchového přenosu kovu až dochází ke zkratování jednotlivých drobných kapek sprchy, což je patrné na záznamu z monitorování procesu, kde je možno napočítat přes 600 zkratů za sec. Tato zkratovaná sprcha způsobuje hluboký závar a umožňuje svařovat vyšší rychlostí než v oblasti klasické sprchy. Vlivem nižšího napětí vnáší do svaru i méně měrného tepla. [2]



Obr.5 Průběhy proudu a napětí – laboratoř TUL [5]



Obr. 6 Charakteristika svařování metodou zkratovaná sprcha [5]

1.1.3. Vliv plynu na vysokovýkonné způsoby svařování

Pro svařování MAG oceli se používají aktivní ochranné směsi plynů, složené ze dvou inertních a dvou aktivních plynů:

Argon podporuje stabilitu přenosu kovu, vytváří úzký, koncentrovaný oblouk a umožňuje vznik sprchového přenosu kovu. Na druhou stranu má nízkou tepelnou vodivost a tak přeneše do svaru méně tepla. Jeho výhodou je vyšší měrná hustota, než je hustota vzduchu, takže svar dobře chrání.

Helium má vysoký ionizační potenciál a tak špatně zapaluje oblouk, je 7 x lehčí než vzduch a tak je k ochraně svaru potřeba vyšší průtočné množství, což při jeho vyšší ceně ještě dále zvyšuje náklady. Vzhledem ke špatnému zapalování se doporučuje používat směs s Ar neméně 25%. Jeho hlavní výhodou je cca 9 x vyšší tepelná vodivost než má Ar, proto se používá zejména pro automatické svařování pro zvýšení produktivity.

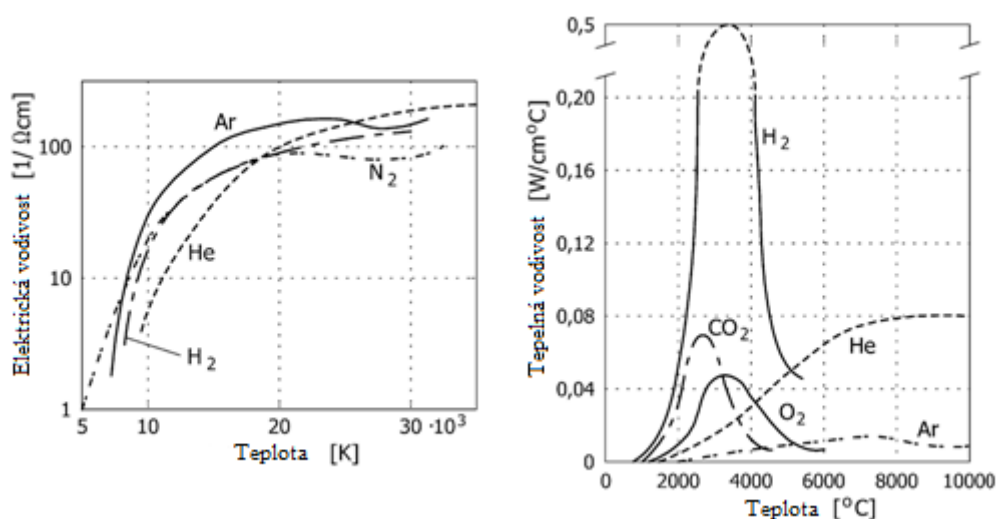
CO₂ se v plazmě oblouku rozkládá na CO a kyslík, CO vytváří redukční atmosféru pro dosažení hlubokého závaru a kyslík narušuje povrchové napětí kapky i svarové lázně.

Kyslík podporuje tavení a při použití u nerezových ocelí podporuje vznik oxidů na povrchu a tím stabilizuje katodovou skvrnu.

V současné době se pro svařování MAG používají převážně dvousložkové plyny Ar – CO₂, případně Ar – O₂ pro nerezové oceli.

Pro svařování zrychleným zkratem byl původně doporučen plyn Ar-CO₂ 92/8. V rámci testování 3 - složkových plynů byl v této práci použit plyn Ferromaxx 7, složený z 90,5% Ar, 7% CO₂ a 2,5% O₂.

Na Obr. 7 je posouzení jednotlivých složek plynů při elektrické a tepelné vodivosti v závislosti na teplotě.



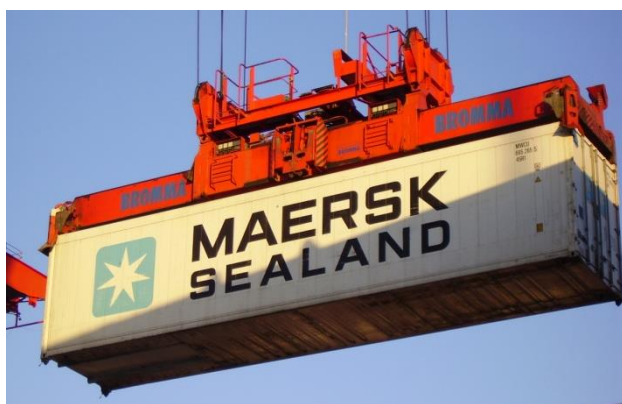
Obr. 7 Elektrická (vlevo) a tepelná (vpravo) vodivost ochranných plynů při tlaku 1 atm. [4]

1.1.4. Aplikace svařování zrychleným zkratem (Rapid arc)

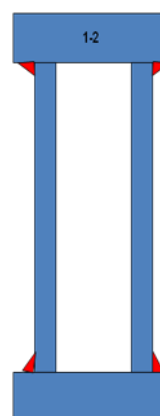
Příklad:

Automatické svařování podélných svarů nosného zařízení pro přenášení kontejnerů jeřábem z lodí na vagony a kamiony a naopak. (Bromma conquip. AB, Švédsko) – obr. 8

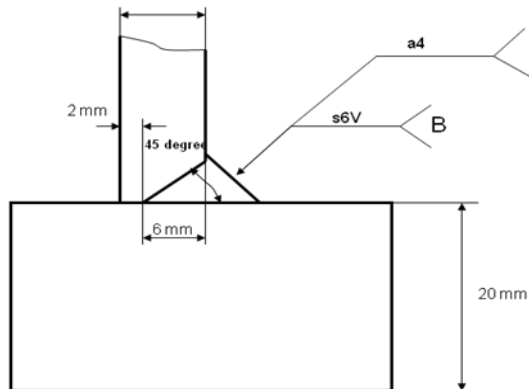
Svařování Rapid Arc bylo aplikováno na repasovanou výrobu cca. 600 ks zařízení dle obr. 7. Byly svařovány podélné svary, celkem 100 m svarů na jednom zařízení, to je dohromady 60 km svarů. Vzhledem k potřebné celkové délce svarů je nutné svařovat souběžně dvěma automaty v poloze PB (obr. 8). Předepsán typ a velikost svaru (obr. 10), metoda RapidArc.



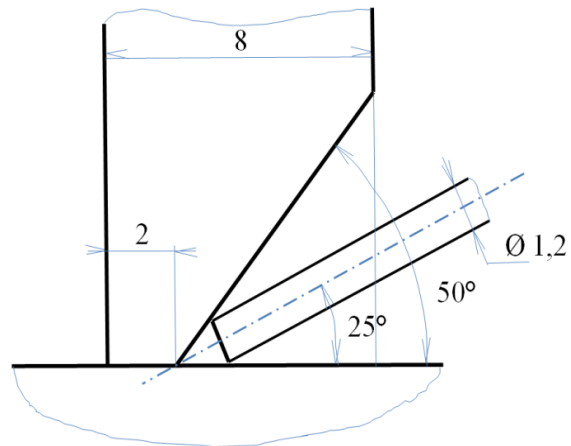
Obr. 8 Výrobek v celku [16]



Obr. 9 Návrh svaru [16]



Obr. 10 Původní řešení

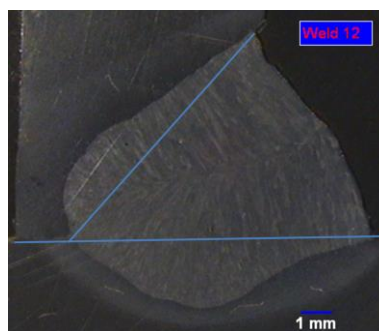


Obr. 11 Navrhované řešení

Vzhledem k výskytu trhlin na původním zařízení bylo úkolem navrhnout technologii svařování tak, aby byl zaručen kořenový a stranový závar při stejné nebo vyšší produktivitě svařování.

Co se týče produktivity svařování v poloze PB nemá svařování Rapid Arc žádnou alternativu. Proto jediné možné řešení bylo zvýšit intenzitu a efektivitu tavení stávajícího procesu, protože stávající parametry $v_D = 18 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $v_S = 0,55 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ jsou na spodní hranici tohoto procesu.

Úkos byl otevřen na 50° a byly navrženy parametry s vyšší hustotou výkonu - $v_D = 24 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $v_S = 0,76 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Výše výkonu byla omezena použitým podavačem drátu. I přes to bylo dosaženo velmi dobrého stranového závaru, při nulovém kořenovém závaru, s kterým bylo počítáno již při návrhu svaru (obr 12). [16]



Obr. 12 Svar po zvýšení intenzity

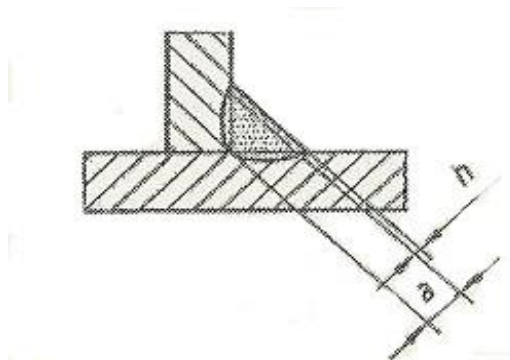
1.2. Zajištění kvality svařování při použití vysokovýkonných metod svařování

Kvalita svarů se posuzovala především vizuální kontrolou – stabilita housenky, výskyt zápalů a nepravidelný povrch (boulování), dále převýšení svaru a úhly přechodu svaru do základního materiálu z makrosnímku svaru, ve kterém se dále mohou objevit i vnitřní vady – trhliny za tepla a tunelová porositá.

B:	$r \leq 1 + 0.1 w$	$\beta \geq 110^\circ$	kvalita 1
C:	$r \leq 1 + 0.15 w$	$\beta \geq 110^\circ$	kvalita 2
D:	$r \leq 1 + 0.25 w$	$\beta \geq 90^\circ$	kvalita 3

Hodnocení vad a určování stupňů jakosti koutového svaru dle ČSN EN ISO 5817 [6]

Překročení

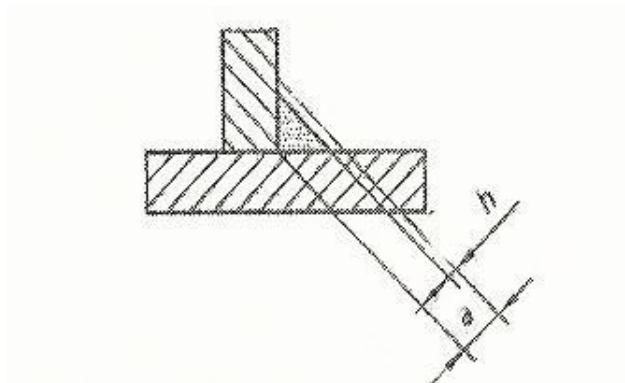


Obr. 13 Překročení

Tab. 1 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
$\geq 0,5$	neomezeno	$h \leq 1 + 0,2a$, max 4	$h \leq 1 + 0,15a$, max 3

Podkročení

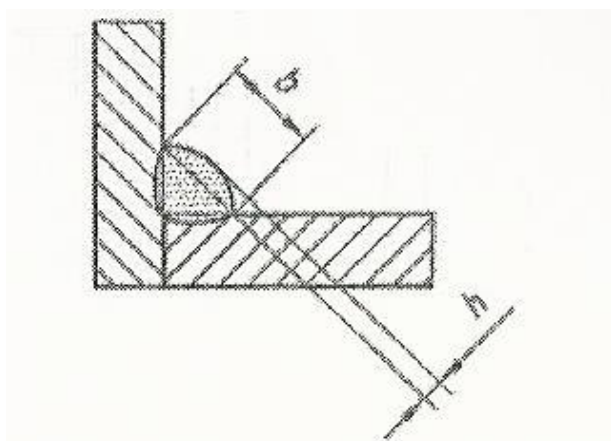


Obr. 14 Podkročení

Tab. 2 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
0,5 až 3	$h \leq 0,2 + 0,1a$	$H \leq 0,2$	nepřístupné
> 3	$h \leq 0,3 + 0,1a, \text{ max } 2$	$h \leq 0,3 + 0,1a, \text{ max } 1$	nepřístupné

Nadměrné převýšení koutového svaru

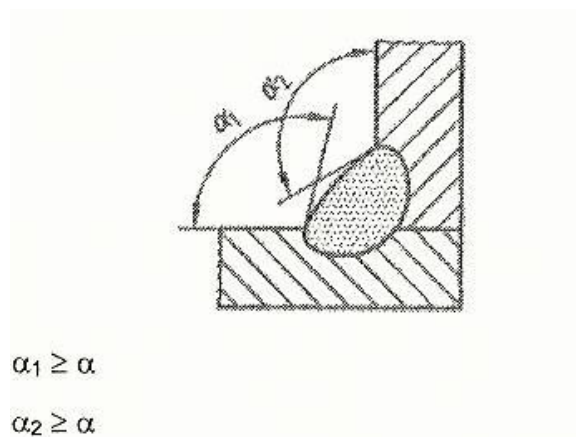


Obr. 15 Nadměrné převýšení koutového svaru

Tab. 3 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
≥ 0,5	$h \leq 1 + 0,25b$, max 5	$h \leq 1 + 0,15b$, max 4	$h \leq 1 + 0,1b$, max 3

Strmý přechod svaru



Obr. 16 Strmý přechod svaru

Tab. 4 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
≥ 0,5	$\alpha \geq 90^\circ$	$\alpha \geq 110^\circ$	$\alpha \geq 110^\circ$

1.2.1. Nepravidelná housenka – “boulování“

Největší problém při svařování vysokou rychlostí je nepravidelnost při vytváření housenky.

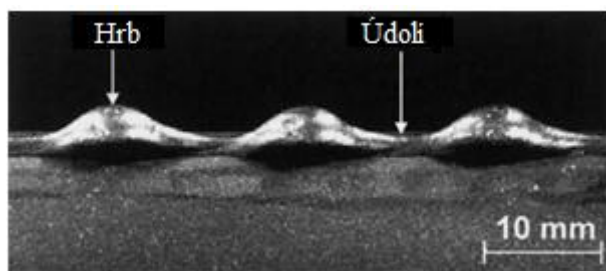
Oblouk vytlačuje taveninu do stran a ta se vrací do svarové lázně a tuhne. Vzdálenost oblouku od rychle tuhnoucí taveniny se může natolik zvětšit, že dochází k nepravidelnému tuhnutí, tzv. “boulování“.

Výskyt boulování omezuje rozsah použitelných rychlostí svařování a omezuje další zvyšování produktivity ve svařování. V současné době, fyzikální mechanismy odpovědné za boulování nejsou dobře známy. Proto je obtížné zjistit, jak potlačit boulování, aby se dosáhlo vyšší rychlosti svařování.

Článek [13] se zabývá identifikací a experimentálním ověřením fyzikálních mechanismů, které způsobují boulování při vysoké rychlosti svařování nelegovaných ocelí. Za tím může být silná dynamika zpětného proudění roztaveného kovu ve svarové lázni, při které obvykle došlo během vysokorychlostního svařování, což bylo identifikováno jako hlavní faktor odpovědný za vznik boulování. K ověření této hypotézy byly provedeny experimenty s různými procesními proměnnými, které mají vliv na zpětný tok roztaveného svarového kovu. Tyto procesní proměnné zahrnovaly rychlost svařování, svařovací polohy a ochranné složení plynu.

Bylo zjištěno, že použití svažující polohy svařování a reaktivních ochranných plynů lze potlačit boulování a umožnit vyšší rychlost svařování snížením hybnosti zpětného toku roztaveného kovu do tavné lázně. To by naznačovalo, že všechny procesní proměnné nebo svařovací techniky, které můžou snížit rychlost zpětného toku roztaveného kovu do tavné lázně, umožňují vyšší rychlosti svařování a produktivitu.

Jak ukazuje pohled shora na obr. 17, boulování může být popsáno jako pravidelné zvlnění svaru.



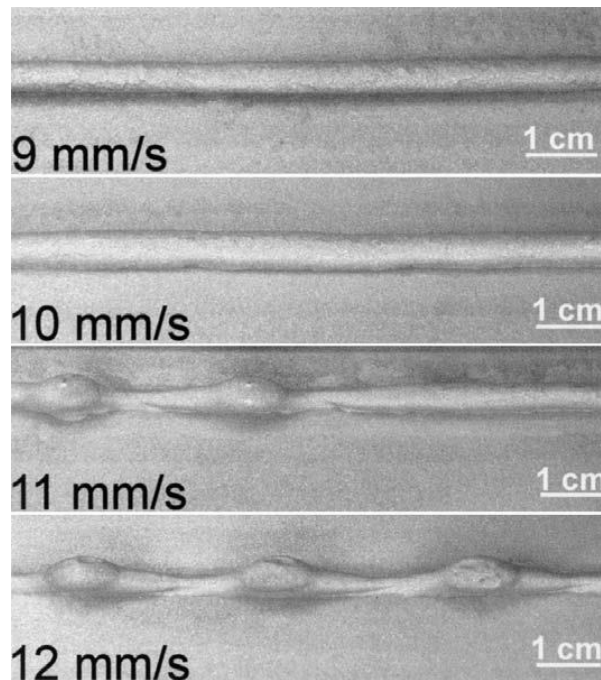
Obr. 17 Pravidelné zvlnění svaru – boulování [13]

Boulování narušuje mechanickou pevnost svarového spoje, čímž omezuje rychlost svařování a tím i náklady výroby. Proto, aby bylo dosaženo dalšího zvýšení produktivity, musí být výskyt boulování potlačen. Při vyšších rychlostech svařování bylo boulování pozorováno u svařování MIG, laserového svařování a svařování elektronovým paprskem. Boulování je ovlivněno rychlostí svařování, napětím, stavu povrchu materiálu, chemickým složením základního kovu a úhlem elektrody vzhledem k základnímu materiálu. Použití ochranných plynů jako Ar-CO₂ a Ar-O₂ mixy výrazně zvýšilo limitní rychlost svařování předtím, než došlo k boulování, což lze vysvětlit jako důsledek nižšího povrchového napětí a lepší smáčivosti, která je výsledkem použití aktivních plynů.

Obr. 18 ukazuje podélný řez svaru. Vysoký tlak oblouku a kinetika roztavených kovových kapek tlačí povrch tavné lázně přímo pod obloukem a vytváří prohlubeň v tavné lázni. Jak je znázorněno na obr. 18, proud taveniny dále proudí směrem k zadní části svarové lázně.



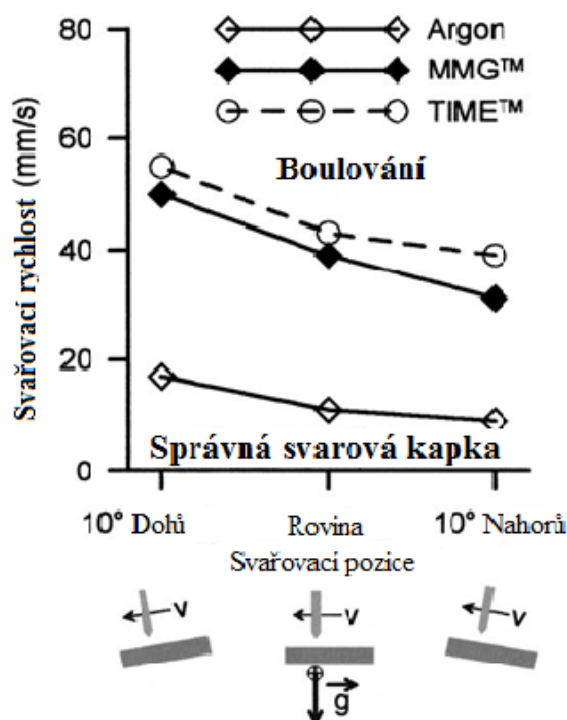
Obr. 18 Podélný řez svaru [13]



Obr. 19 Svary vyrobené při různých svařovacích rychlostech [13]

Potlačení vzniku boulování

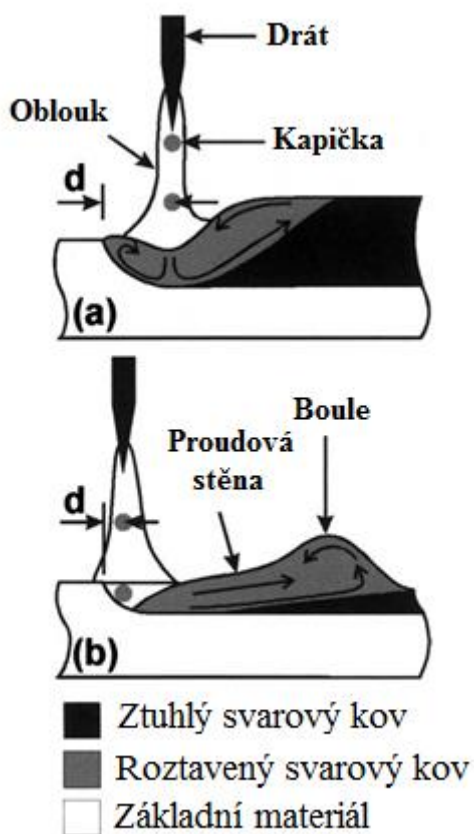
Pokud vznik boulování způsobuje silné zpětné proudění roztaveného svarového kovu, pak všechny procesní proměnné nebo svařovací technika, které snižují dynamiku tohoto proudu umožní vyšší rychlost svařování bez boulování. Pro ověření této hypotézy, byly prováděny experimenty za použití gravitační síly a ochranných plynů k ovlivnění dynamiky zpětného toku roztaveného kovu do tavné lázně a k ovlivnění povrchového napětí roztaveného svarového kovu. Obrázek 20 ukazuje mezní rychlosti svařování ve třech různých svařovacích polohách.



Obr. 20 Vliv polohy svařování na rychlosti svařování – Argon - 100% Ar, MMG (Mig Mix Gold) – 92% Ar a 8% CO₂, TIME – 65% Ar, 8% CO₂, 26,5% He a 0,5% O₂ [13]

Každá křivka na obr. 20 představuje limitující rychlost svařování. Pod křivkou, je oblast, ve které byly vyrobeny dobré svarové housenky. Naopak boulování bylo pozorováno, když svařovací rychlost překročila limitní rychlost svařování.

Při svařování 10° dolů, musí roztavený svarový kov proudit do kopce a proti gravitační síle, přičemž je posunut směrem k zadní části svarové lázně. Jakmile je hybnost zpětného toku roztaveného svarového kovu oslabena vlivem gravitace, ztěžuje se hromadění roztaveného kovu v zadní části svarové lázně, a kov se snadněji rozlévá do přední části svaru. Naopak při svařování nahoru hybnost zpětného toku roztaveného svarového kovu se vlivem gravitace zvyšuje a podporuje boulování při nižších rychlostech svařování. Tyto výsledky ukazují, že zpětné proudění roztaveného svarového kovu je hlavním faktorem zodpovědným za jev boulování a že orientace gravitační síly lze efektivně využít k potlačení tohoto efektu. V praxi toho lze dosáhnout upnutím svařence v mírně nakloněné poloze a svařováním dolů. [13]



Obr. 21 a – nízká rychlost svařování
b- vysoká rychlost svařování [13]

1.3. Návrh statistické metody a zpracování výsledků

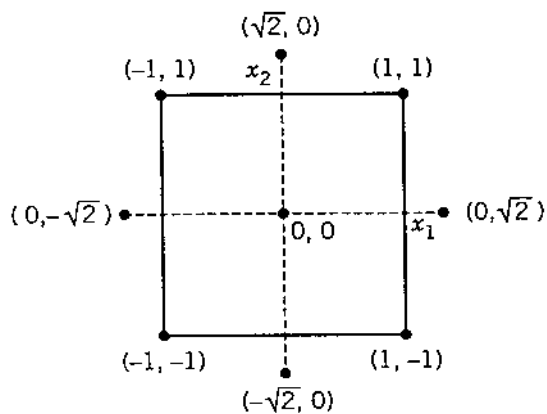
1.3.1. Metoda středové kompozice [11]

Tato metoda nabízí proti uvedenému ortogonálnímu uspořádání, vhodnější **sférické uspořádání** parametrického prostoru.

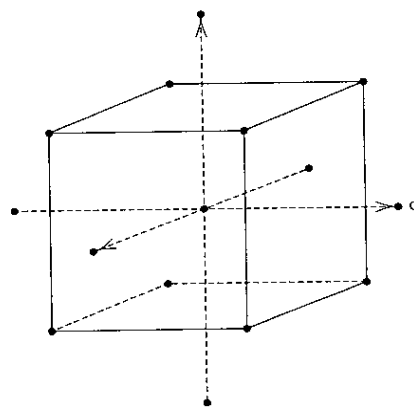
Návrhová matice experimentů podle středové kompozice sestává z:

1. Úplného 2^k faktoriálu na úrovni $-1,1$ (k = počet řídicích proměnných)
2. Osových bodů (mezní, 0) – celkem $2 \cdot k$ rovnic
3. Středových bodů (0,0) – doporučeno 3 až 7 rovnic

Body návrhu tak vymezí v parametrickém prostoru vícerozměrný sférický tvar (kruh pro 2 parametry, koule pro 3 parametry, atd. viz obr. 22 a 23), doplněné o několik středových bodů, poskytujících odhad rozptylu.



Obr. 22[11]



Obr. 23[11]

Používá regresní **lineární rovnici druhého řádu**, jejíž obecný tvar je:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Regresní rovnice druhého řádu umožňuje modelovat zakřivení funkce, proto musí být řídicí proměnné sledovány nejméně ve třech, ale nejlépe na pěti úrovních a tak z hlediska přiměřeného počtu potřebných experimentů by měl být počet řídicích parametrů co nejnižší. Statistickým vyhodnocením záznamu odezvového pole se provede výpočet regresních koeficientů metodou nejmenších čtverců, úprava matematických modelů a jejich parciální derivace pro určení optima. Grafický výstup kontur odezvového pole v závislosti na hlavních proměnných v původních jednotkách může sloužit jako operační okno pro nastavení procesu.

Předpokladem jejího použití je určitá znalost daného procesu, kdy dovedeme přibližně odhadnout působení jednotlivých faktorů na výstupní veličiny. Za tímto účelem nejprve provedeme tzv. screening, jehož výsledkem je vytipování **oblasti blízko-optimálních podmínek**, pro kterou pak s vymezeným souborem řídicích parametrů a jejich vymezeným rozsahem navrhne soubor experimentů podle středové kompozice.

Tato metoda je ve svářečské odborné literatuře používána velmi často.

Například Allen a spol. [12] použili experimentální optimalizační metodu, založenou na středové kompozici pro **robotizované MAG svařování tenkých nerezových plechů přepřátovanými spoji**. Postup je zaměřen na maximalizaci rychlosti svařování při minimalizaci výskytu vad. Celkem bylo sledováno 6 faktorů (délka oblouku, výška hořáku, rychlost svařování, poměr rychlostí drátu a svařování jako samostatný faktor a 2 šumové – mezera v kořeni a vyosení dráhy) v 5-ti hladinách, celkem 54 experimentů včetně desíti středových pro odhad chyby. Výběr nezávislých faktorů a vymezení jejich použitelného rozmezí pomocí přípravných testů se projevil ve vysokém podílu přijatelných svarů, stejně jako eliminace nepřijatelných kombinací parametrů při sférickém uspořádání testů. Byly získány experimentální regresní modely pomocí programu EXCEL a na jeho bázi byly též vytvořeny optimalizační grafy a vyvinut software pro predikci kvality pro jakoukoliv kombinaci pevných parametrů s nastavitelnými vstupy pro 4 parametry pro aplikaci na rozsah 16-ti tloušťek nerezových plechů pro výfukové systémy v automobilovém průmyslu.

2. Laboratorní postup

Příprava:

Nejdříve se v dílnách připravil potřebný počet plechů, které se obrousily, pásnice uprostřed a hrana stojny.

V dalším kroku se oba plechy, upnuté magnetickou upínkou nastehovaly svářečkou WIG na obou koncích, aby byl dodržen pravý úhel, protože při svařování dochází k deformacím.

Svařování:

Sestehovaný vzorek se vložil do polohovacího přípravku a nastavil se úhel svařování – 30° od pásnice. Osa přípravku se srovnala s osou dráhy lineárního automatu. Nastavil se úhel hořáku, případně jeho excentricita a vzdálenost kontaktní špičky od povrchu. Potom se nastavily parametry svařování – rychlost drátu, rychlost svařování, napětí na prázdko a průtokové množství ochranného plynu. Nakonec se uvedlo do pohotovosti monitorovací zařízení. Při vlastním svařování se pouští odděleně nejprve lineární automat, pak monitorování a nakonec oblouk. Při dokončení svaru se vypíná v obráceném pořadí. Po svaření se vzorek označil číslem, v souladu s číslem záznamu a provedlo se první zhodnocení svaru – vizuálně a zhodnocení záznamu monitoru. Podle naměřených hodnot průměrného proudu, napětí a rychlosti svařování a podle vzhledu svaru se vzorek zařadil mezi vyhodnocované nebo se po korekci parametrů provedl stejný svar znovu.



Obr. 24 Svařovací pracoviště – laboratoř TUL [7]

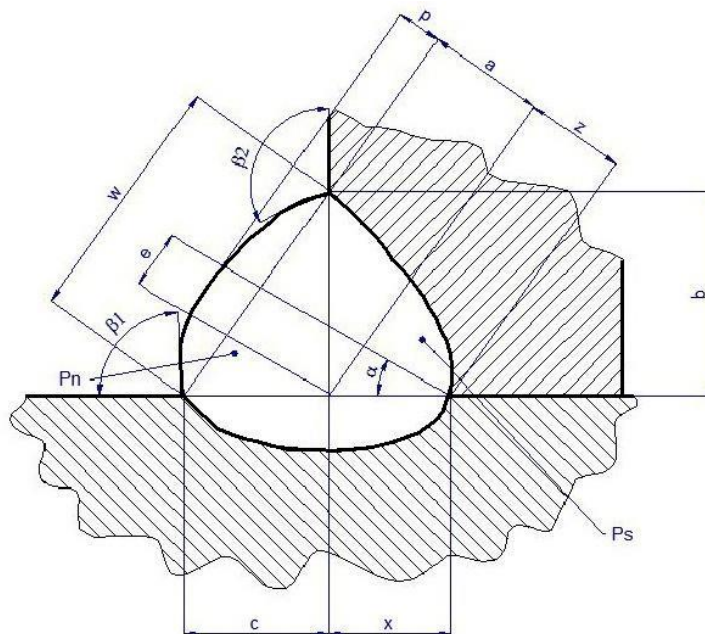
Příprava vzorku pro metalografii a její provedení:

Nejprve se odřezal přebytečný plech kolem svaru kyslík-acetylenovým plamenem. Zbylý svar se označil a ve střední části vyřízl cca 20 mm vzorek, který se po odstranění nečistot a špon zalil ve formě do dentacrylu. Vzorky se potom metalograficky zpracovaly předepsaným postupem broušení, leštění a leptání (obr. 25).



Obr. 25 Rotační bruska na vzorky Phoenix 4000 – laboratoř TUL

Makrostruktura svaru se dále pomocí optického mikroskopu s nastaveným minimálním zvětšením 1 : 10 pomocí kamery přenesla do programu NIS-Elements, ve kterém se provedla kompletní geometrická analýza svaru dle obr. 26, a hodnoty se zpracovaly do tabulek.



Obr. 26 Kompletní geometrická analýza koutového svaru – laboratoř TUL

3. Použité zařízení, příslušenství a spotřební materiál

3.1. Svařovací zdroj Migatronic Omega 550 S-V Basic

Svařovací zdroj Omega² 550 S-V Basic je určen pro svařování plechů, tenkostěnných materiálů, opravy karosérií a pro lehký průmysl. Zdroj ve verzi Basic umožňuje nastavit ručně dvěma ovládacími knoflíky druh ochranného plynu a tloušťku svařovaného materiálu a nastavená data se vám zobrazí na dvou přehledných displejích umístěných nad ovládacími knoflíky. Ostatní parametry zdroj automaticky nastaví. Omega² 550 jsou standardně vybaveny možností změny polarity, takže umožňují i použití trubičkových drátů innershield (tj. bez potřeby plynové ochrany). S čtečkou SD karty instalovanou v podavači strojů Omega² můžete snadno doplnit Váš stávající software o nové svařovací programy.

Svařovací zdroj Omega² 550 S-V Basic je vybaven vodou chlazeným hořákem MV 500 FKS Twist o délce 3m, nízkým vozíkem, 8,5m síť. kabelem, 3m zemnicím kabelem, snímatelným podavačem s mezi kabelem délky 1,5m, sadou kladek pro drát o průměru 1,2V a spořicí plynovou hadicí.[8]

Technická data	
Napájecí napětí	3 x 400 V
Pojistky	35 A
Zatěžovatel 100% při 40°	430 A
Zatěžovatel 60% při 40°	510 A
Zatěžovatel 100% při 20°	475 A
Zatěžovatel 60% při 20°C	550 A
Napětí naprázdno	80 V
Proudový rozsah	10 - 550 A
Třída ochrany	IP23
Rozměry d x š x v	65 x 25 x 63 cm
Hmotnost	110 kg



Obr. 27 Migatronik Omega 550 S-V Basic a technická data svařovacího zdroje [8]

3.2. Přídavný materiál

Drát pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí do pevnosti 590 MPa. Supra-MIG je drát vyvinutý v laboratořích Lincoln Electric, jehož zcela specifické vlastnosti ho řadí ke špičce v této kategorii. Vyniká zejména stabilitou oblouku, malým rozstříkem v širokém rozsahu parametrů svařování, při použití ve sprchovém procesu přechází do sprchy o cca 30 - 40 A dříve. Osvědčuje se pro aplikace s vysokými požadavky na jakost svarů na tlakových nádobách, ocelových konstrukcích apod. Jeho vlastnosti ho předurčují pro použití na automatizovaných a robotizovaných pracovištích.

Technické parametry: chemické složení drátu: C 0,1; Si 0,9; Mn1,5, mez kluzu 470 MPa, pevnost 570 MPa, tažnost 25% [9]

3.3. Použitý ochranný plyn

Plyn Ferromaxx 7

je tříložková směs plynu firmy AIR PRODUCTS. Plyny jsou v poměru 7% CO₂, 2,5% kyslíku a 90,5% argonu. Směs je speciálně určená pro svařování uhlíkových ocelí a galvanicky pokovených ocelových plechů.

Umožňuje zlepšení kvality svaru a snížení zmetkovitosti, poskytuje stabilní oblouk, zejména při nízkých napětích u tenkých a středně silných materiálů (do tloušťky 10 mm) a pro svařování v polohách.

Díky nízkému rozstříku se zkracuje doba čištění po svařování. Vynikající charakteristiky pulzního oblouku. [10]

3.4. Použitý materiál

Pro všechny prováděné experimenty byla použita ocel 11 373. Konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Součásti konstrukcí a strojů menších tloušťek, i tavně svařované, namáhané staticky i mírně dynamicky. Vtokové objekty vodních turbín, výtoky, hradidlové tabule, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí a odbočnice, jezové konstrukce. Dna plochá, klenutá a lemovaná, vysokotlaká. Vhodná ke svařování. [17]

4. Laboratorní měření boulování a zápalů svarů

4.1. Měření boulování

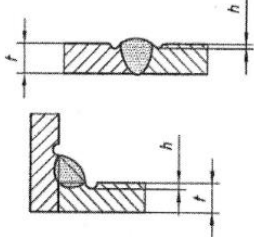
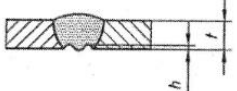
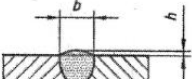
Boulování se vyskytuje u svarů, kde je použita metoda s vysokou rychlostí svařování. V našem případě se jedná o metodu Rapid Arc, kde byla rychlost svařování až 1,8 m/min. Při vysokých rychlostech svařování svarová lázeň tuhne rychleji a může se stát, že ztuhne dřív, než se rovnoměrně rozlije v úkosu.

Proto bylo potřeba vymezit přibližnou hranici, kdy bylo boulování ještě v mezích použitelnosti v praxi.



Obr. 28 – Měření velikosti boulování – laboratoř TUL

4.2. Měření zápalů

Číslo	Referenční číslo dle ISO 6520-1	Název vady	Poznámky	t mm	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti		
					D	C	B
1.7	5011 5012	Souvislý zápal Nesouvislé zápaly	Je požadován plynulý přechod Nepovažuje se za soustavnou vadu 	0,5 až 3	Krátké vady: $h \leq 0,2 t$	Krátké vady: $h \leq 0,1 t$	Nepřipustné
				> 3	$h \leq 0,2 t$, ale max. 1 mm	$h \leq 0,1 t$, ale max. 0,5 mm	$h \leq 0,05 t$, ale max. 0,5 mm
1.8	5013	Vrubby v kořeni	Je požadován plynulý přechod 	0,5 až 3	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 t$	Krátké vady: $h \leq 0,1 t$	Nepřipustné
				> 3	Krátké vady: $h \leq 0,2 t$, ale max. 2 mm	Krátké vady: $h \leq 0,1 t$, ale max. 1 mm	Krátké vady: $h \leq 0,05 t$, ale max. 0,5 mm
1.9	502	Nadměrné převýšení tupého svaru	Je požadován plynulý přechod 	$\geq 0,5$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,25 b$, ale max. 10 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 b$, ale max. 7 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$, ale max. 5 mm

Obr. 29 Norma ČSN EN ISO 5817

4.2.1. Zápaly

Zápaly jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Častěji se vyskytují u koutových svarů. Mezi hlavní příčiny patří příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk, nevhodný průměr elektrody případně její špatné vedení.

Přípustné meze velikosti vad pro tři stupně jakosti (B, C a D) odpovídající jakosti ve výrobě jsou předmětem normy ČSN EN ISO 5817. [15]



Obr. 30 Přípravek na měření zápalů svarů – laboratoř TUL

4.3. Způsob provedení:

Po experimentálním svařování byly zjištěny u části svarů dva související problémy s jakostí. První problém byl patrný již pouhým pohledem na svar a jednalo se tzv. boulování a s tím spojený výskyt zápalů po stranách housenky. U těchto svarů bylo třeba vymezit jejich stupeň jakosti a použitelnost v praxi.

Nejdříve byl posouzen svar pouhým fyzickým kontaktem a pohledem. Byla stanovena 2 kritéria – subjektivní, které spočívá ve vizuálním posouzení přijatelnosti - P-přijatelný a N-nepřijatelný. Dále bylo boulování měřeno úchylkoměrem (Obr. 28). Stupnice byla nastavena na nulu ve stabilní části svaru a měřil se číselný údaj v hodnotách maximální a minimální hloubky. Naměřené údaje byly vloženy do tabulek hodnot. Ukázalo se, že normou udávané údaje jsou mnohem benevolentnější, než subjektivní posouzení a většina svarů, subjektivně posouzena jako nepřijatelné by splnila kriteria pro jakost C a D.

Dále byly dle normy ČSN EN ISO 5817 měřeny zápaly svarů. Pro měření byl použit digitální úchylkoměr a přípravek pro uložení každého měřeného svaru (Obr. 30). Zápaly byly měřeny na obou stranách svaru, jak na pásnici, tak i na stojně. Stupnice byla nastavena na nulu ve stabilní části svaru a měřil se číselný údaj v hodnotách maximální a minimální hloubky. Hodnota použitelnosti byla stanovena dle normy ČSN EN ISO 5817 (Obr. 29). Naměřené údaje byly také vloženy do tabulek hodnot viz. experimentální část diplomové práce.

5. Experimentální část

5.1. Návrh experimentů podle statistické metody (DOE)

Na základě předběžných experimentů, provedených v rámci bakalářské práce a další výzkumné činnosti na katedře byla vymezena parametrická oblast předpokládaného optima efektivity provedení svaru podle již zavedené metodiky. V tomto případě byla používána metoda středové kompozice poprvé aplikována na 4 parametry a v tomto směru bylo nutno upravit i výpočtový program.

Metoda Rapid Arc je závislá na správném nastavení úhlu hořáku a výletu drátu, což byly další 2 parametry, které bylo nutno optimalizovat vedle základních parametrů – rychlosti drátu a plochy návaru (rychlosti svařování).

S ohledem na použití pro plechy tl. 4 až 6 mm byly voleny plochy návaru 10 až 18 mm, které odpovídají velikosti koutových svarů a4 až a6, včetně předpokládaného závaru.

..

Tab. 5 – Rozsah parametrů

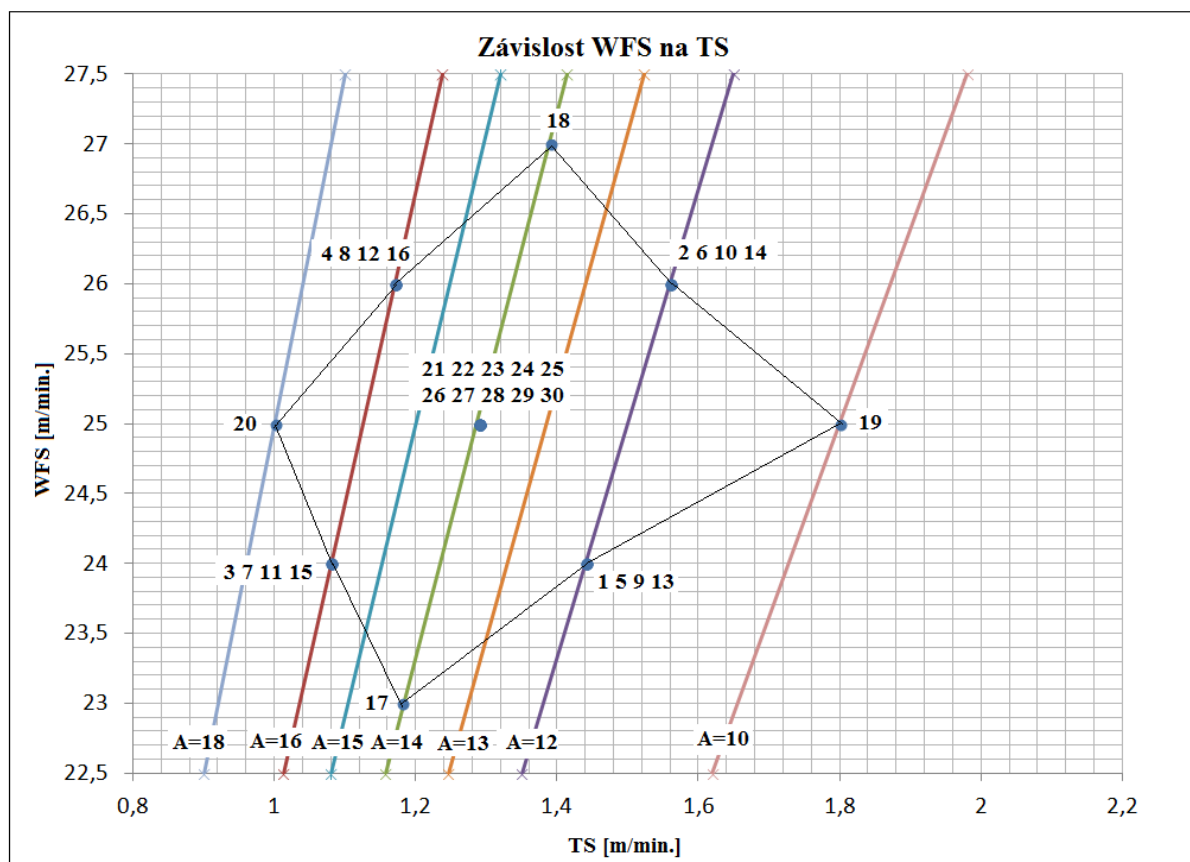
	-2	-1	0	1	2
WFS	23	24	25	26	27
A	10	12	14	16	18
CTWD	19	20	21	22	23
Úhel	30	34	38	42	46

Tab. 6 – Matice experimentů

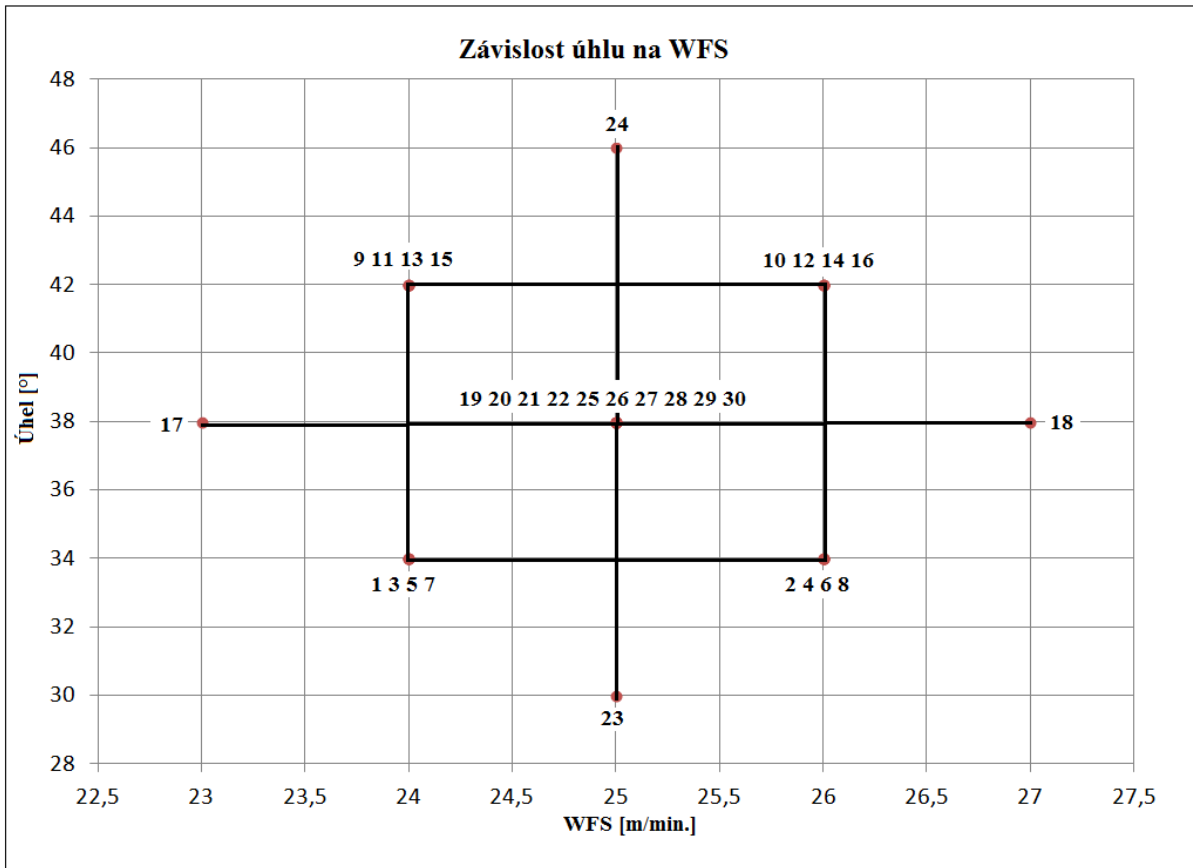
RA	WFS	A	CTWD	Úhel	WFS	A	CTWD	Úhel	TS
1	-1	-1	-1	-1	24	12	20	34	1,44
2	1	-1	-1	-1	26	12	20	34	1,56
3	-1	1	-1	-1	24	16	20	34	1,08
4	1	1	-1	-1	26	16	20	34	1,17
5	-1	-1	1	-1	24	12	22	34	1,44
6	1	-1	1	-1	26	12	22	34	1,56
7	-1	1	1	-1	24	16	22	34	1,08
8	1	1	1	-1	26	16	22	34	1,17
9	-1	-1	-1	1	24	12	20	42	1,44
10	1	-1	-1	1	26	12	20	42	1,56
11	-1	1	-1	1	24	16	20	42	1,08
12	1	1	-1	1	26	16	20	42	1,17
13	-1	-1	1	1	24	12	22	42	1,44
14	1	-1	1	1	26	12	22	42	1,56
15	-1	1	1	1	24	16	22	42	1,08
16	1	1	1	1	26	16	22	42	1,17
17	-2	0	0	0	23	14	21	38	1,18
18	2	0	0	0	27	14	21	38	1,39
19	0	-2	0	0	25	10	21	38	1,8
20	0	2	0	0	25	18	21	38	1
21	0	0	-2	0	25	14	19	38	1,29
22	0	0	2	0	25	14	23	38	1,29
23	0	0	0	-2	25	14	21	30	1,29
24	0	0	0	2	25	14	21	46	1,29
25	0	0	0	0	25	14	21	38	1,29
26	0	0	0	0	25	14	21	38	1,29
27	0	0	0	0	25	14	21	38	1,29
28	0	0	0	0	25	14	21	38	1,29
29	0	0	0	0	25	14	21	38	1,29
30	0	0	0	0	25	14	21	38	1,29

5.2. Grafické vyjádření návrhu parametrů

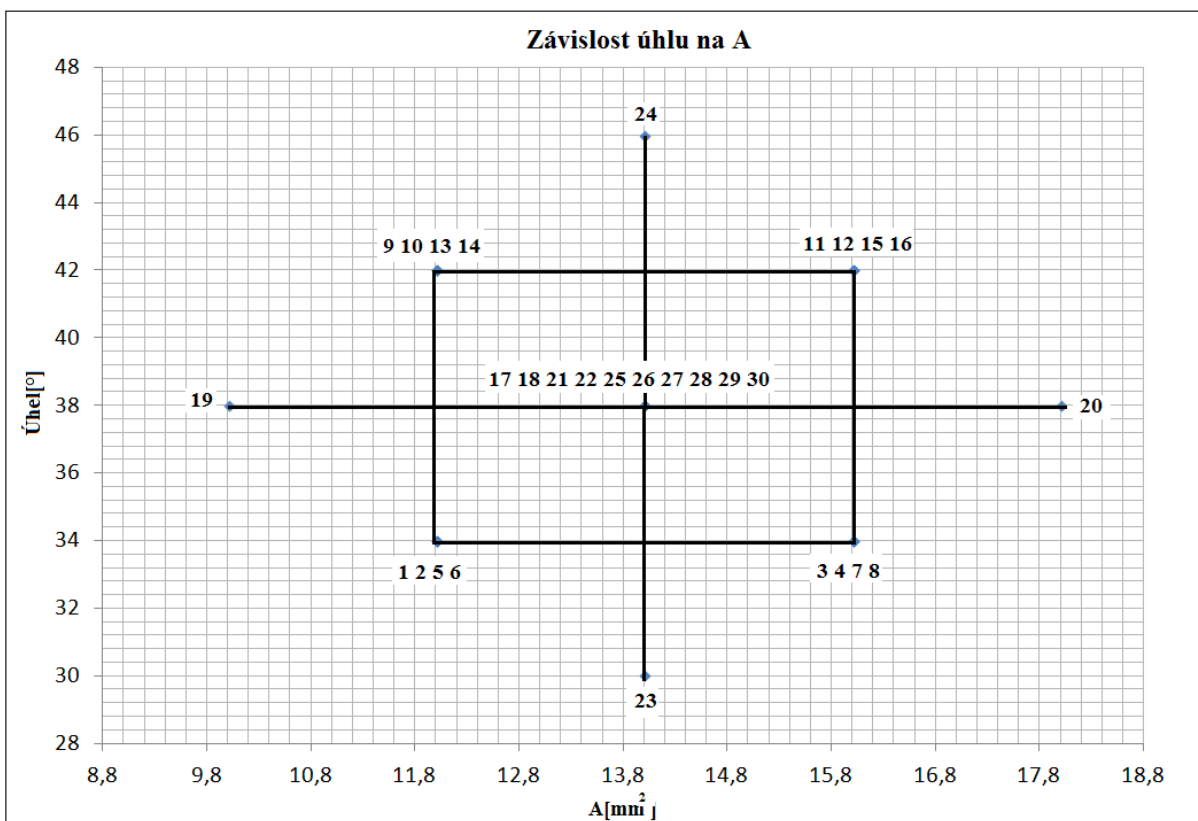
Graficky je možno tento rozpis parametrů vyjádřit pomocí několika dvourozměrných grafů:



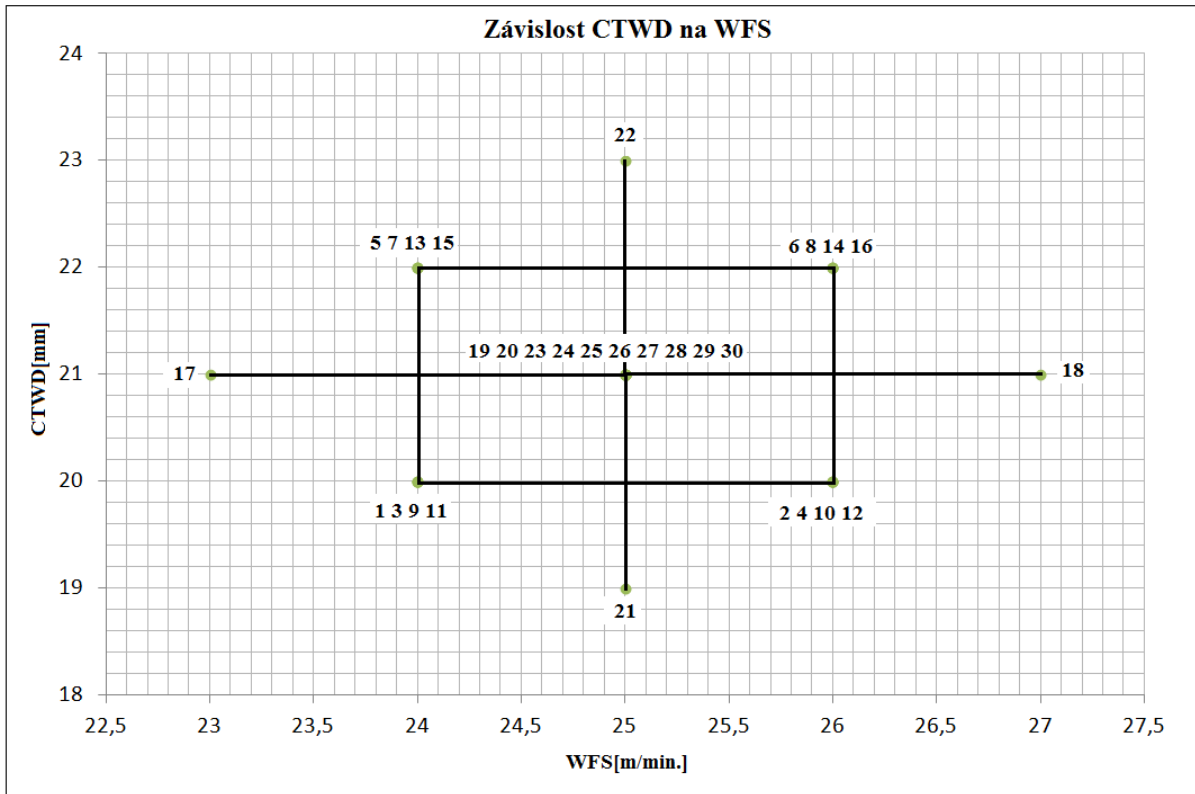
Graf 1 – Závislost WFS/TS



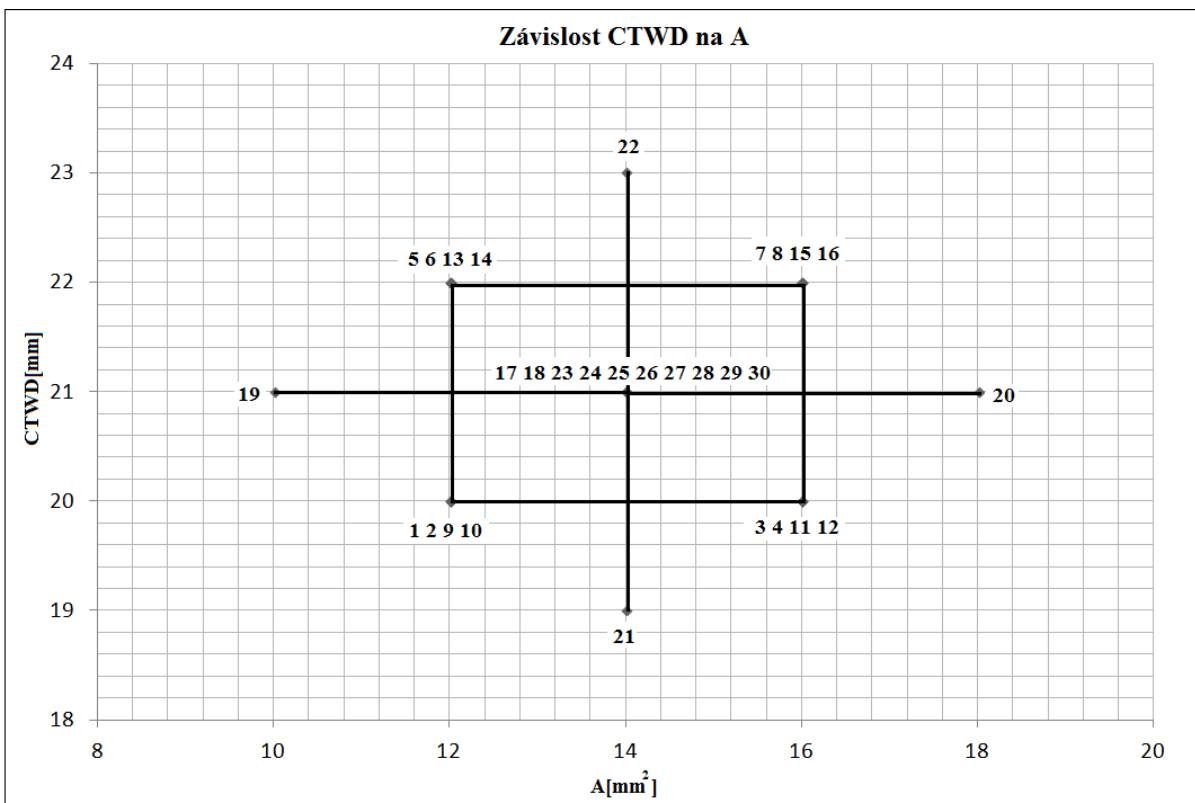
Graf 2 – Závislost Úhel/WFS



Graf 3 – Závislost Úhel/A



Graf 4 – Závislost CTWD/WFS

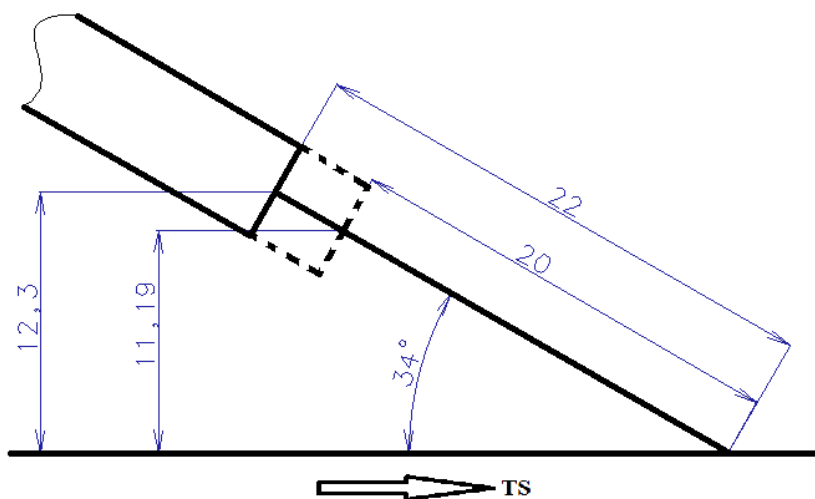


Graf 5 – Závislost CTWD/A

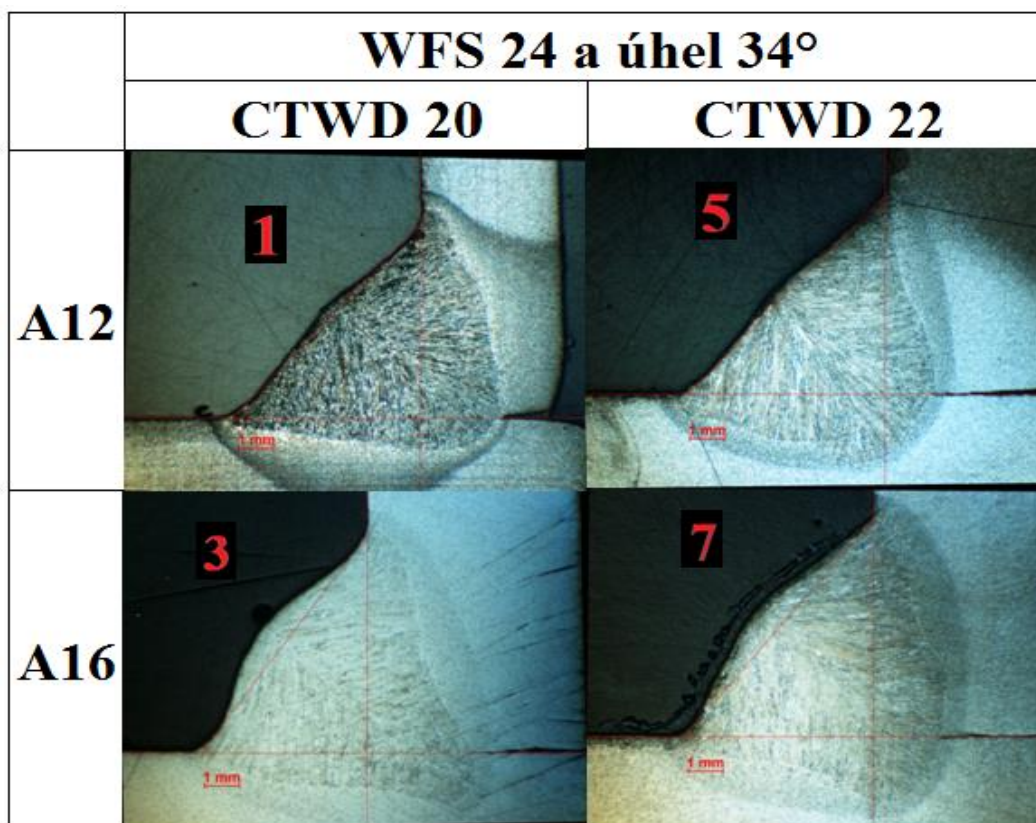
5.3. Zpracování výsledků

Byla provedena geometrická analýza makrosnímků pomocí programu NIS-Elements a dále bylo provedeno měření velikosti zápalů a povrchové nepravidelnosti housenky. Hlavní procesní i geometrické parametry jsou uvedeny v tabulce pod každou skupinou svarů. Pro lepší orientaci o vlivu jednotlivých parametrů budou nejprve posouzeny svary na úrovni všech kombinací (-1, 1) a to ze dvou pohledů – vlivu CTWD a vlivu úhlu hořáku. Teprve potom budou posouzeny extrémní hodnoty jednotlivých parametrů.

5.4.1. Posouzení vlivu výletu drátu a plochy návaru (rychlosti svařování) při konstantní rychlosti drátu $24 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, a sklonu hořáku 34°



Obr. 31 – Nastavení pro svary RA1 až RA8



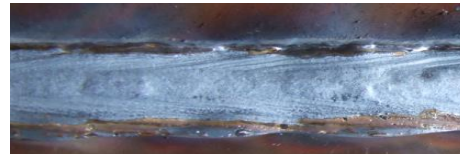
Obr. 32 – Svary RA1,3,5,7

Tab. 7 – Základní parametry svarů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
1	24	1,42	20	34	405	34,2	4,97	12,2	1,7	5,6	0,3	7,8	P 0,5	0,76-D
5	24	1,42	22	34	395	34,6	4,91	12,2	1,32	5,2	0,1	8,3	P 0,2	0,232-B
3	24	1,08	20	34	415	33,9	6,46	15,6	3,1	6,86	0,77	8	P 0,5	0,912-D
7	24	1,08	22	34	395	34,7	6,35	15,7	2	6,1	0,8	8,3	N 0,7	2,8-x



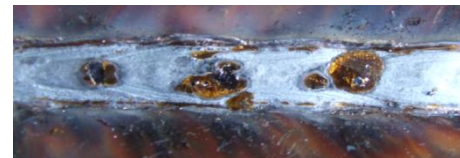
Obr. 33 – Housenka svar 1



Obr. 34 – Housenka svar 5



Obr. 35 – Housenka svar 3

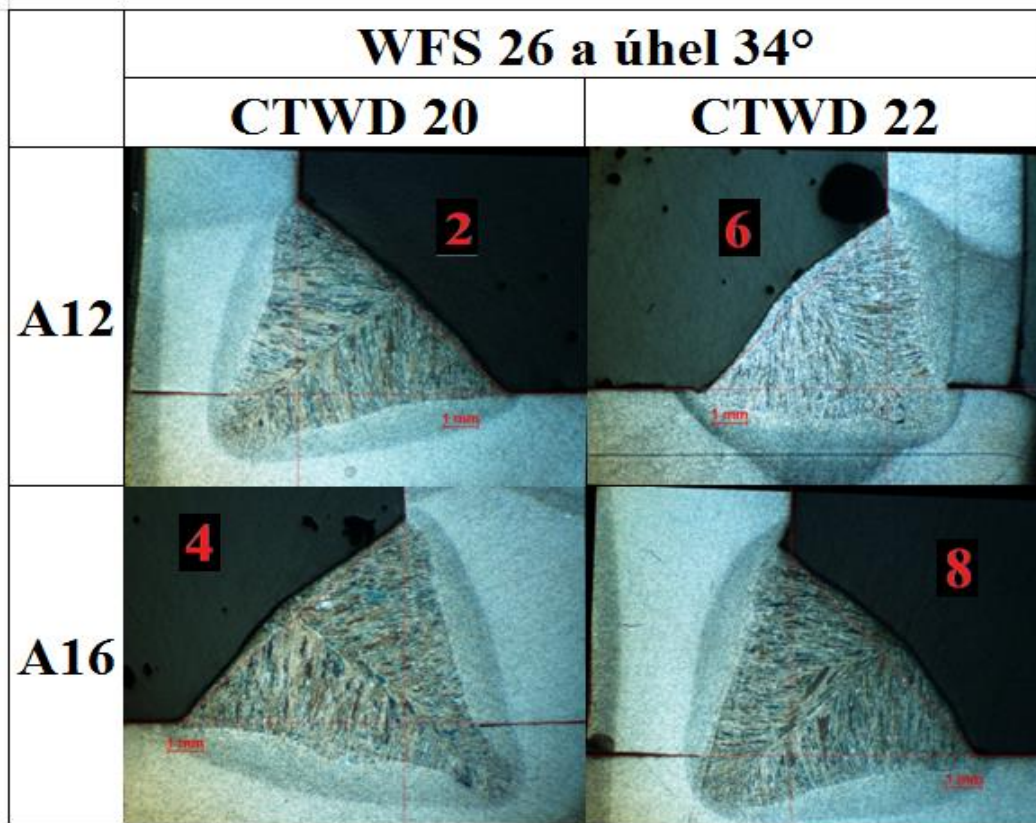


Obr. 36 – Housenka svar 7

Diskuze:

Porovnání svarů stejných parametrů s rozdílným CTWD 1 a 5 při menší ploše návaru a vyšší rychlosti svařování a svarů 3 a 7 při větší ploše návaru a nižší rychlosti svařování. Při porovnání svarů 1 a 5 je patrné, že došlo ke snížení hloubky závaru a snížení nepravidelnosti housenky u svaru 5 s větším CTWD. Při porovnání svarů 3 a 7 je patrné, že opět došlo ke snížení závaru, ale kvalita se zhoršila, navíc svar 7 je již na hranici přijatelnosti. Lze konstatovat, že větší CTWD snižuje závar a větší plocha svaru (nižší rychlost svařování) zvyšuje závar ale i převýšení a má větší sklon k boulování a zápalům. Měření zápalů bylo nejlepší pro svar 5, který se nachází ve stupni jakosti B a má větší CTWD a vyšší rychlost svařování. Svar 7 má nevyhovující jakost – rozdílem velikosti svaru a hloubkou zápalu.

5.4.2. Rychlost drátu 26 m.min⁻¹



Obr. 37 – Svary RA2,4,6,8

Tab. 8 – Základní parametry svařů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
2	26	1,56	20	34	433	34,3	4,77	12,1	2,43	6,57	0,3	8,3	P 0,25	0,426-C
6	26	1,56	22	34	408	34,7	4,88	12	1,71	5,35	0,51	7,25	N 0,3	1,5-x
4	26	1,17	20	34	440	34,4	6,44	16,1	3,6	7,9	0,5	8,7	P 0,3	0,132-B
8	26	1,17	22	34	412	34,5	6,29	16,1	2,55	6,5	0,7	7,9	P 0,5	1,35-x



Obr. 38 – Housenka svar 2



Obr. 39 – Housenka svar 6



Obr. 40 – Housenka svar 4

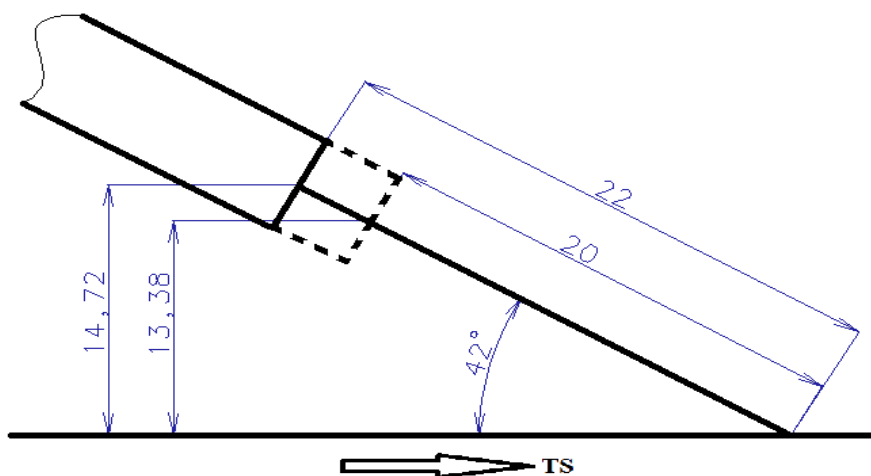


Obr. 41 – Housenka svar 8

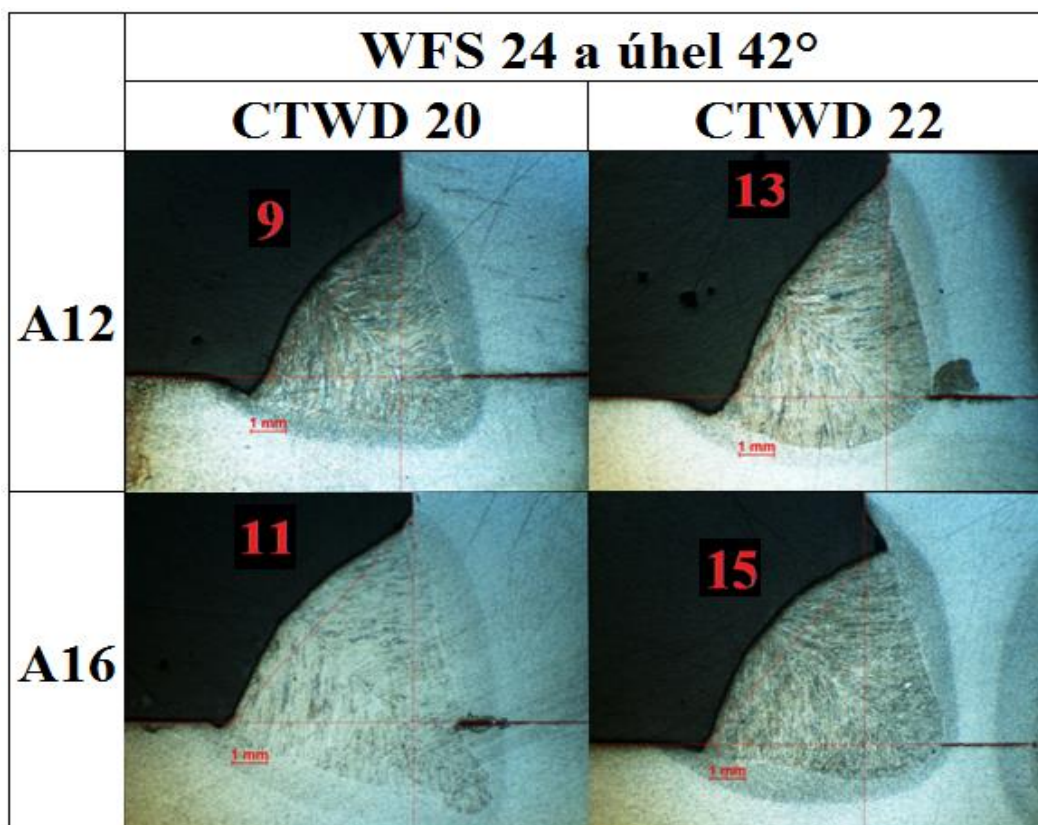
Diskuze:

Porovnání svarů stejných parametrů s rozdílným CTWD 2 a 6 při menší ploše návaru a vyšší rychlosti svařování a svarů 4 a 8 při větší ploše návaru a nižší rychlosti svařování – při vyšší hustotě výkonu. Při porovnání svarů 2 a 6 opět došlo ke snížení hloubky závaru s větším CTWD, ale nepravidelnost housenky se u svaru 6 zhoršila. Při porovnání svarů 4 a 8 je patrné snížení závaru při zvýšení převýšení a zúžení housenky, takže výška svaru je stejná. Kvalita se zhoršila vlivem hlubších zápalů na nepřijatelnou úroveň, zatímco nepravidelnost svaru je v normě. Lze konstatovat, že větší CTWD snižuje závar a navíc v tomto případě viditelně zužuje housenku a zvětšuje zápaly. Svary 2 a 4 při nižším CTWD mají hluboký prstový závar, svar 4 až extrémně úzký. Svary 6 a 8 jsou viditelně užší a mají nevyhovující parametry zápalů mimo stupnici jakosti. Vliv plochy svaru a rychlosti svařování je stejný jako v předchozím případě.

5.4.3. Posouzení vlivu výletu drátu, sklon hořáku 42°, rychlost drátu 24 m.min⁻¹



Obr. 42 – Nastavení pro svary RA9 až RA16



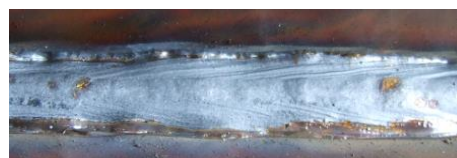
Obr. 43 – Svary RA 9,11,13,15

Tab. 9 – Základní parametry svarů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
9	24	1,44	20	42	420	33,7	4,94	11,8	2,3	5,29	0,69	6,1	N 0,4	1,68-x
13	24	1,43	22	42	400	34,4	4,91	12,1	0,95	4,84	0,67	7,8	N 0,6	1,56-x
11	24	1,08	20	42	418	33,8	6,55	15,7	3,2	7,2	0,76	7,9	N 0,7	0,858-D
15	24	1,08	22	42	393	34,8	6,4	15,9	1,8	6,13	0,87	7	N 0,7	1,206-D



Obr. 44 – Housenka svar 9



Obr. 45 – Housenka svar 13



Obr. 46 – Housenka svar 11



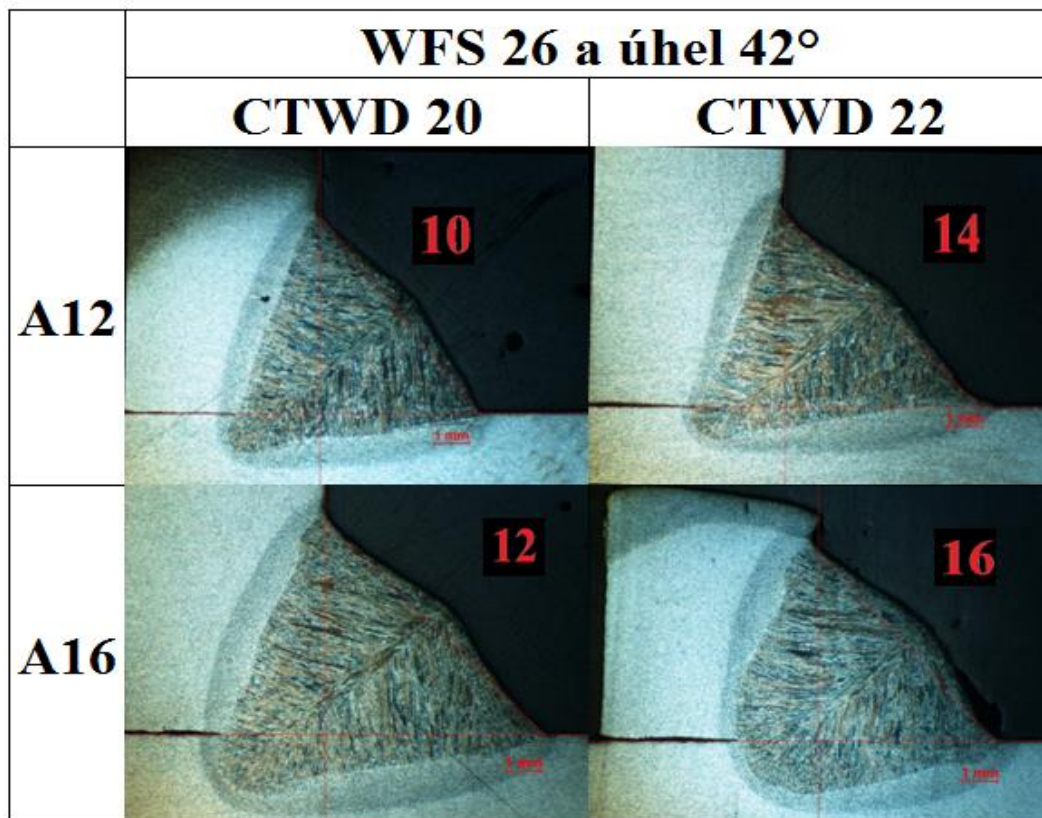
Obr. 47 – Housenka svar 15

Diskuze:

Porovnání svarů stejných parametrů při větším úhlu hořáku - 42°.

Na rozdíl od stejné skupiny svarů 1, 3, 5, 7 při úhlu 34° jsou všechny svary subjektivně nevyhovující. Objektivně jsou zápaly u větších svarů 11 a 15 ještě v mezích normy. Rozdíly hloubky závaru při různém CTWD jsou ještě výraznější – to znamená, že kombinace větší úhel hořáku a větší CTWD vede k výrazně nižšímu závaru a zhoršení kvality svaru. Velikost svaru a rychlost svařování má výrazný vliv na kvalitu svaru – čím menší svar, tím horší kvalita, což je trochu rozdílný závěr než u svarů zhotovených s úhlem hořáku 34°.

5.4.4. Rychlost drátu 26 m.min⁻¹



Obr. 48 – Svary RA10,12,14,16

Tab. 10 – Základní parametry svařů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
10	26	1,56	20	42	438	34,5	4,81	12	2,55	6,1	0,6	7,4	N 0,5	1,32-x
14	26	1,56	22	42	421	34,4	4,73	12	2,12	6,2	0,5	8,1	N 0,6	4,2-x
12	26	1,17	20	42	424	34,5	6,34	15,8	2,2	7,4	0,7	8,5	P 0,6	0,522-C
16	26	1,17	22	42	412	34,5	6,25	16	1,85	5,8	0,7	8	P 0,6	1,572-x



Obr. 49 – Housenka svar 10



Obr. 50 – Housenka svar 14



Obr. 51 – Housenka svar 12



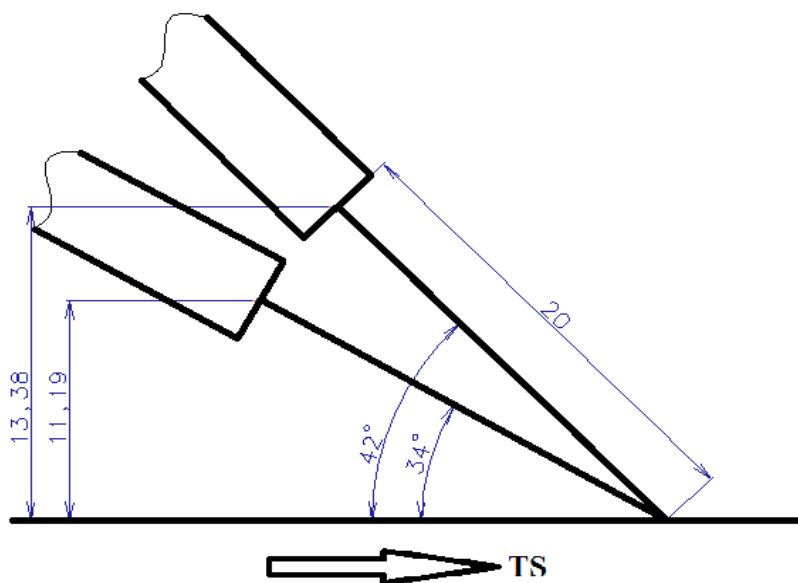
Obr. 52 – Housenka svar 16

Diskuze:

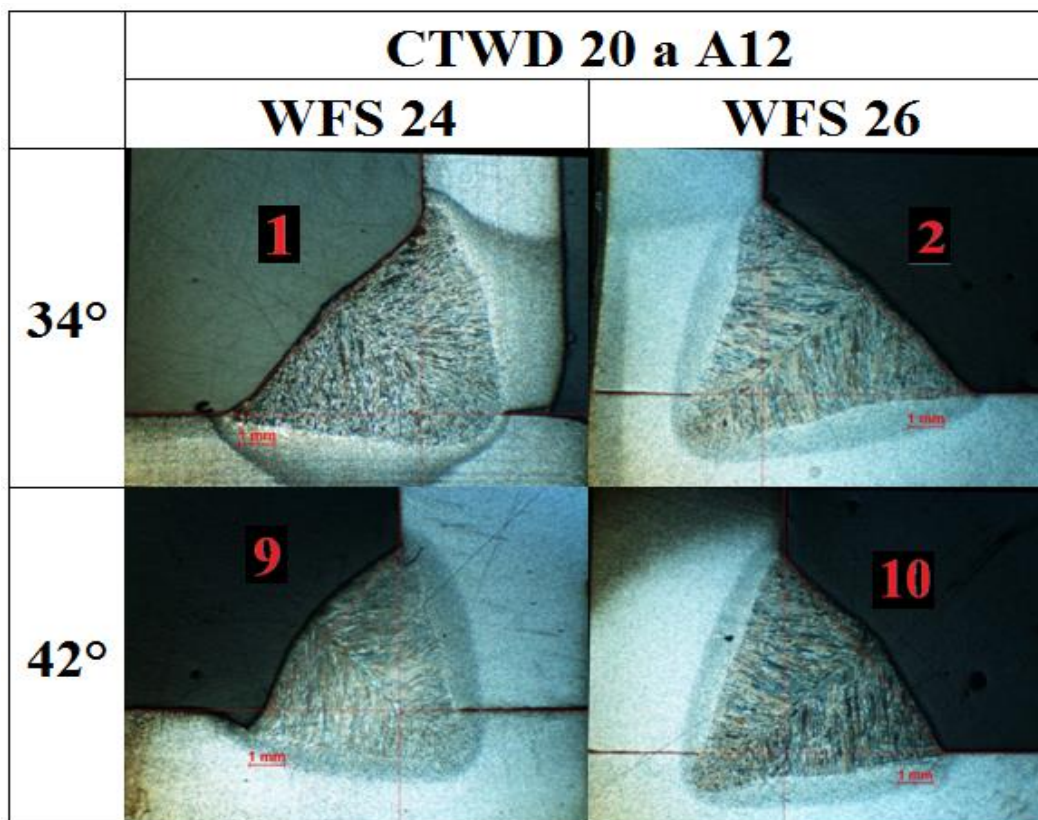
Porovnání svarů stejných parametrů při větším úhlu hořáku - 42° a vyšší hustotě výkonu. Na rozdíl od stejné skupiny svarů 2, 4, 6, 8, při úhlu 34° je opět kvalita celkově horší, zejména u svarů 10, 14 menší velikosti a větší rychlosti svařování. V mezích normy je pouze svar 12 při výletu 20 mm. I zde se dá konstatovat, že kombinace větší úhel hořáku a větší CTWD vede k výrazně nižšímu závaru a zhoršení kvality svaru.

5.5.1. Vliv úhlu hořáku

Stejná skupina svarů byla posouzena na vliv úhlu hořáku



Obr. 53 – Nastavení pro svařování R1,2,9,10



Obr. 54 – Svařování RA1,2,9,10

Tab. 11 – Základní parametry svarů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
1	24	1,44	20	34	405	34,2	4,97	12,2	1,7	5,6	0,3	7,8	P 0,5	0,76-D
2	26	1,56	20	34	433	34,3	4,77	12,1	2,43	6,57	0,3	8,3	P 0,25	0,426-C
9	24	1,44	20	42	420	33,7	4,94	11,8	2,3	5,29	0,69	6,1	N 0,4	1,68-x
10	26	1,56	20	42	438	34,5	4,81	12	2,55	6,1	0,6	7,4	N 0,5	1,32-x



Obr. 55 – Housenka svar 1



Obr. 56 – Housenka svar 2



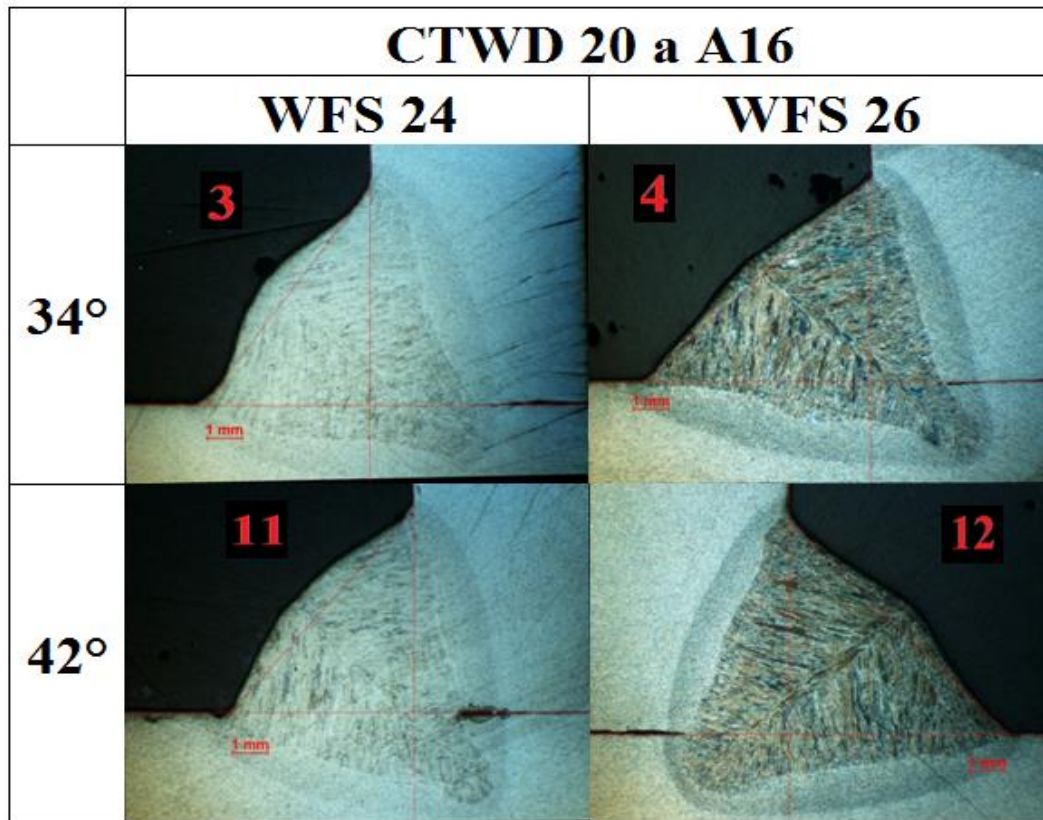
Obr. 57 – Housenka svar 9



Obr. 58 – Housenka svar 10

Diskuze:

Porovnání svarů shodné plochy návaru 12 mm² a CTWD 20 mm s rozdílným úhlem hořáku 1 a 9 při nižší hustotě výkonu a 2 a 10 při vyšší hustotě výkonu v obou případech vzroste hloubka závaru, ale zhorší se kvalita, zejména zápaly. Zvýšení hustoty výkonu samo o sobě má v obou případech pozitivní vliv na kvalitu. Oba svary, zhotovené pod úhlem hořáku 42° jsou nevyhovující.



Obr. 59 – Svary RA3,4,11,12

Tab. 12 – Základní parametry svarů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
3	24	1,08	20	34	415	33,9	6,46	15,6	3,1	6,86	0,77	8	P 0,5	0,912-D
4	26	1,17	20	34	440	34,4	6,44	16,1	3,6	7,9	0,5	8,7	P 0,3	0,132-B
11	24	1,08	20	42	418	33,8	6,55	15,7	3,2	7,2	0,76	7,9	N 0,7	0,858-D
12	26	1,17	20	42	424	34,5	6,34	16	2,2	7,4	0,7	8,5	P 0,6	0,522-C



Obr. 60 – Housenka svar 3



Obr. 61 – Housenka svar 4



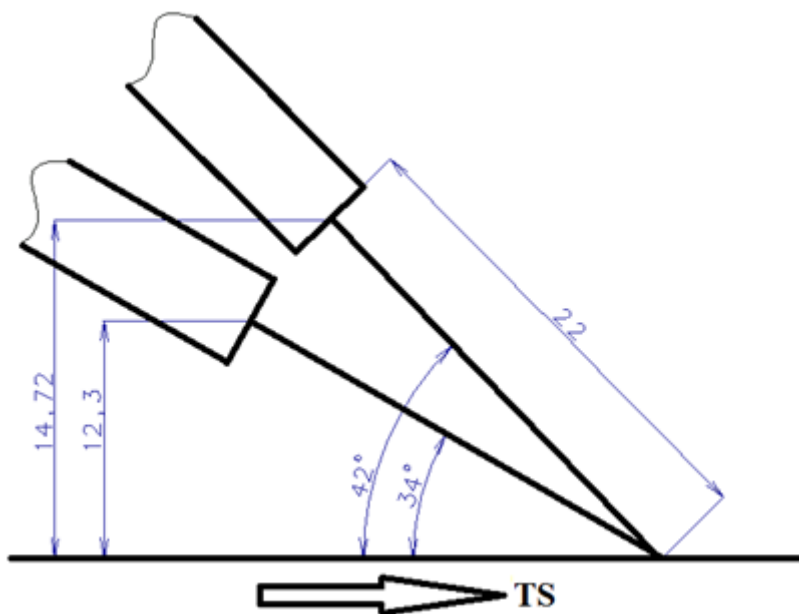
Obr. 62 – Housenka svar 11



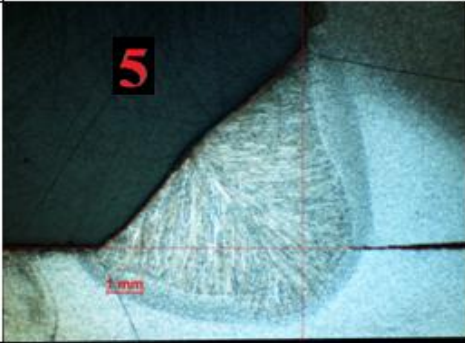
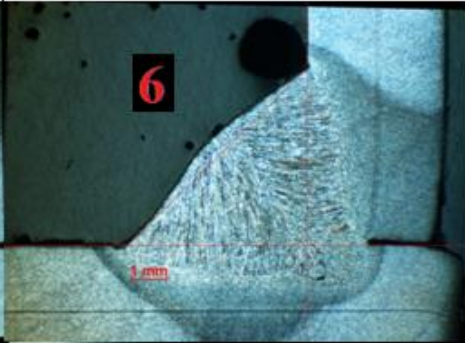
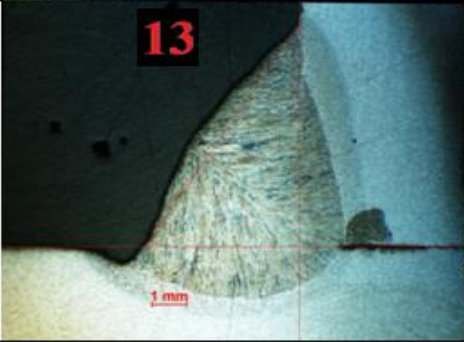
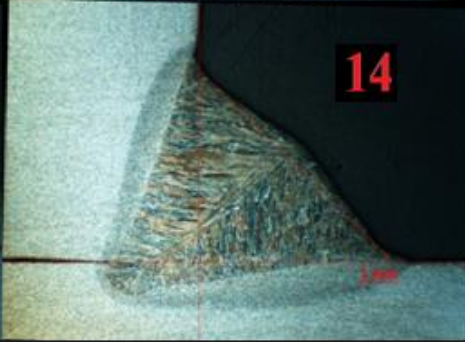
Obr. 63 – Housenka svar 12

Diskuze:

Porovnání svarů shodné plochy návaru 16 mm^2 a CTWD 20 mm s rozdílným úhlem hořáku 3 a 11 při nižší hustotě výkonu a 4 a 12 při vyšší hustotě výkonu při úhlu 34° vzrostla hloubka závaru a při úhlu 42° klesla hloubka závaru. Kvalita je u těchto větších svarů vyhovující, lepší u vyšší hustoty výkonu.



Obr. 64 – Nastavení pro svařování R5,6,13,14

		CTWD 22 a A12	
		WFS 24	WFS 26
34°	5		
42°	13		

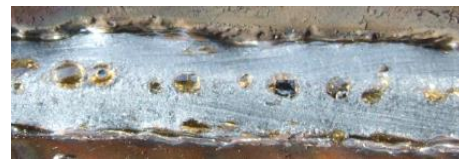
Obr. 65 – Svařování RA5,6,13,14

Tab. 13 – Základní parametry svarů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
5	24	1,44	22	34	395	34,6	4,91	12,2	1,32	5,2	0,1	8,3	P 0,2	0,232-B
6	26	1,56	22	34	408	34,7	4,88	12	1,71	5,35	0,51	7,25	N 0,3	0,978-C
13	24	1,44	22	42	404	34,4	6,44	12,1	0,95	4,84	0,67	7,8	N 0,6	1,56-x
14	26	1,56	22	42	421	34,4	4,73	12	2,12	6,2	0,5	8,1	N 0,6	4,2-x



Obr. 66 – Housenka svar 5



Obr. 67 – Housenka svar 6



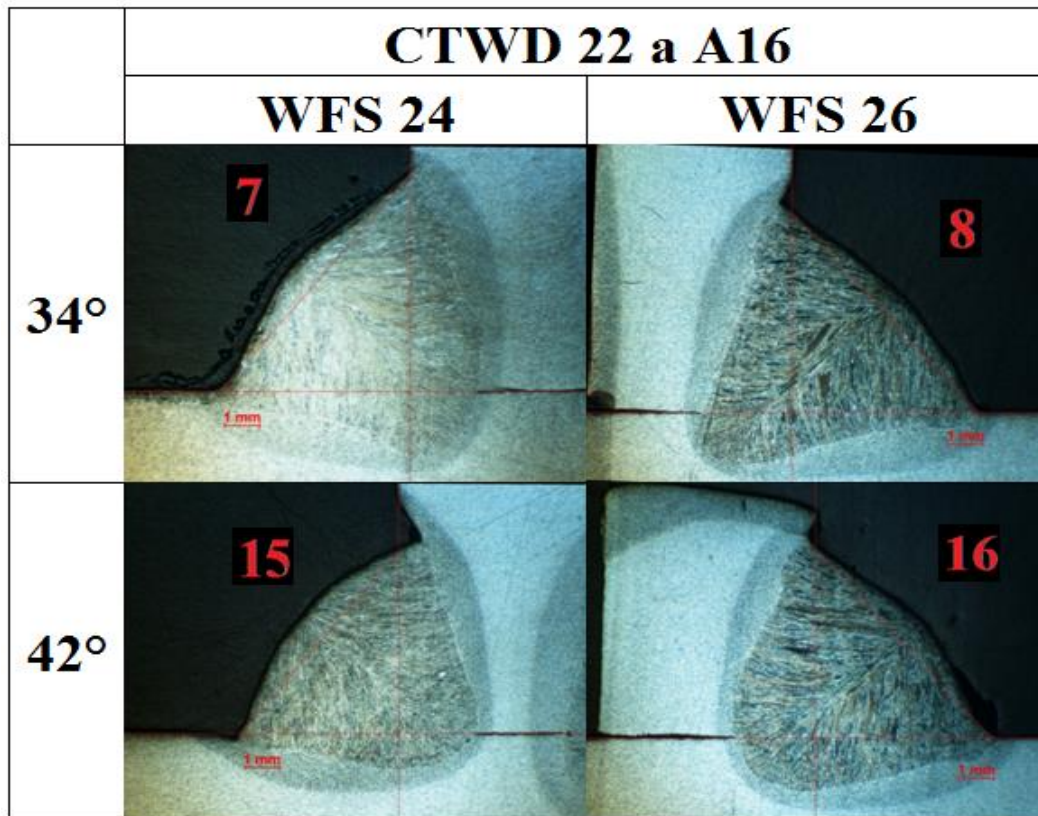
Obr. 68 – Housenka svar 13



Obr. 69 – Housenka svar 14

Diskuze:

Porovnání svarů shodné plochy návaru 12 mm² a CTWD 22 mm s rozdílným úhlem hořáku 5 a 13 při nižší hustotě výkonu a 6 a 14 při vyšší hustotě výkonu v obou případech vzroste hloubka závaru, ale zhorší se kvalita, zejména zápaly. Oba svary, zhotovené pod úhlem hořáku 42⁰ jsou nevyhovující a výrazně horší než stejné svary s CTWD 20 mm. Z toho vyplývá, že kombinace většího úhlu a vyššího CTWD vede nejen ke snížení závaru ale zejména ke zhoršení jakosti.



Obr. 70 – Svary RA 7, 8, 15, 16

Tab. 14 – Základní parametry svarů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
7	24	1,08	22	34	395	34,7	6,35	15,7	2	6,23	0,8	8,3	N 0,5	2,8-x
8	26	1,17	22	34	412	34,5	6,29	16,1	2,55	6,5	0,7	7,9	P 0,5	1,35-x
15	24	1,08	22	42	393	34,8	6,4	15,9	1,8	6,13	0,87	7	N 0,7	1,206-x
16	26	1,17	22	42	412	34,5	6,25	16	1,85	5,8	0,7	8	N 0,6	1,572-x



Obr. 71 – Housenka svar 7



Obr. 72 – Housenka svar 8



Obr. 73 – Housenka svar 15

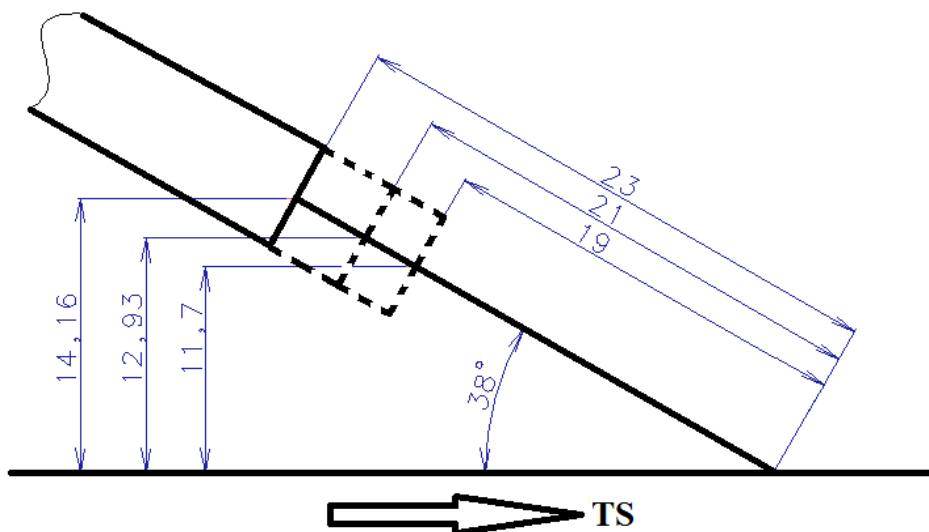


Obr. 74 – Housenka svar 16

Diskuze:

Porovnání svarů shodné plochy návaru 16 mm² a CTWD 22 mm s rozdílným úhlem hořáku 7 a 15 při nižší hustotě výkonu a 8 a 16 při vyšší hustotě výkonu při úhlu 34⁰ vzrostla hloubka závaru a při úhlu 42⁰ zůstala stejná. Kvalita je u všech větších svarů 16 mm² nevyhovující.

5.5.2. Posouzení vlivu rychlosti drátu a výletu drátu – extrémní hodnoty, sklon hořáku 38°



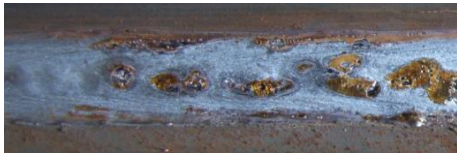
Obr. 75 – Nastavení pro svary R17,18,21,22

		Úhel 38°			
		WFS 23		WFS 27	
A14		17		18	CTWD 21
		CTWD 19		CTWD 23	
A14		21		22	WFS 25

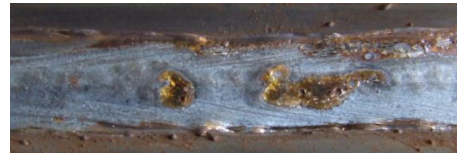
Obr. 76 – Svary RA17,18,21,22

Tab. 15 – Základní parametry svarů

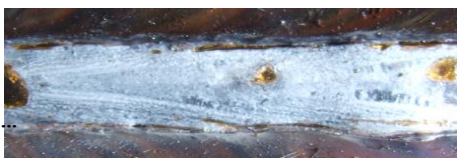
Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
17	23	1,18	21	38	394	34	5,79	14	3,2	6,64	0,77	7,1	P 0,8	0,588-C
18	27	1,39	21	38	432	34	5,39	14	2,1	6,31	0,62	8,3	P 0,8	0,768-D
21	25	1,29	19	38	413	34,2	5,63	14,1	2,5	6,4	0,53	7,5	P 0,8	0,284-B
22	25	1,29	23	38	388	34,3	5,4	13,8	0,88	5,0	0,3	8,4	P 0,3	0,748-D



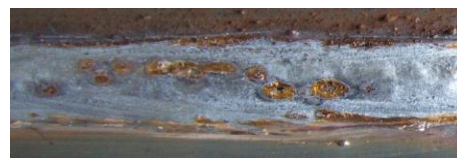
Obr. 77 – Housenka svar 17



Obr. 78 – Housenka svar 18



Obr. 79 – Housenka svar 21



Obr. 80 – Housenka svar 22

Diskuze:

Vliv rychlosti drátu – svary 17, 18:

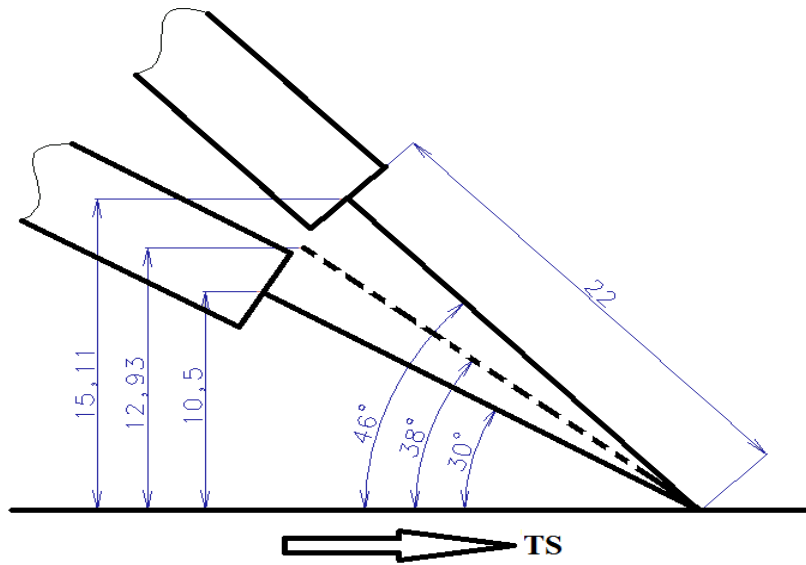
Zvýšení rychlosti drátu a tomu odpovídající hodnoty proudu překvapivě nepřineslo zvětšení hloubky závaru ale naopak.

Vliv CTWD – svary 21, 22:

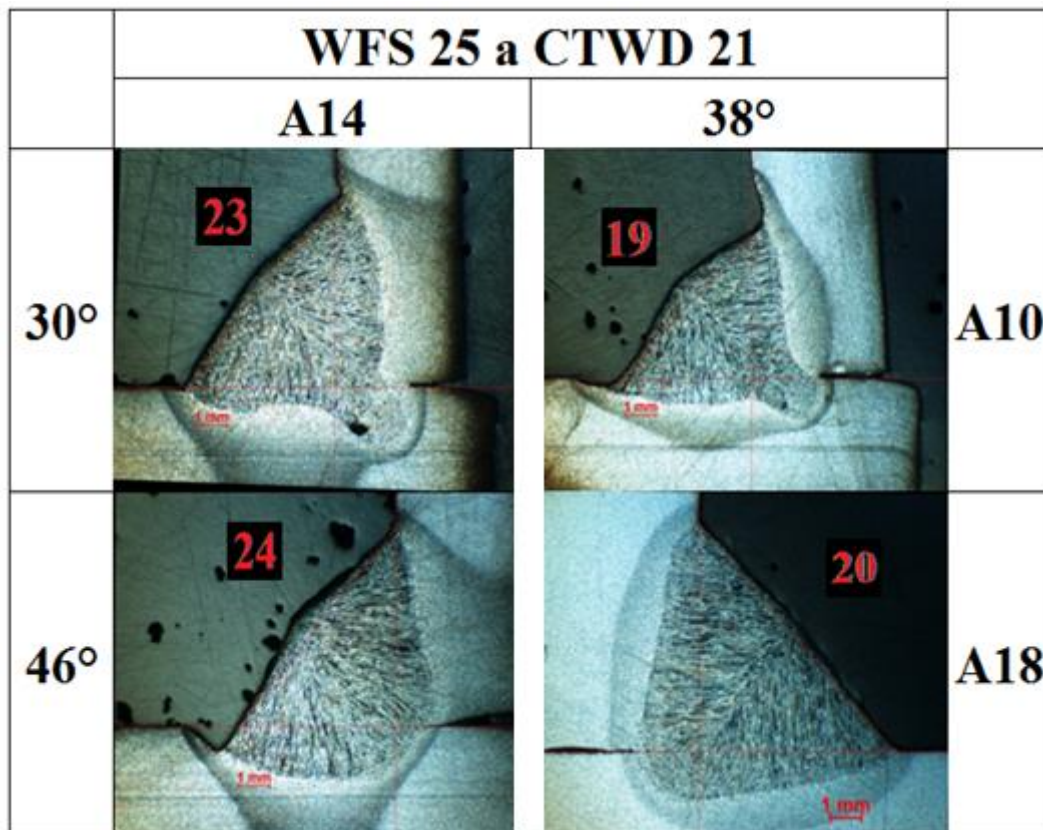
Větší CTWD prokazatelně snižuje závar.

Překvapivé je i to, že všechny 4 svary extrémních hodnot jsou subjektivně i objektivně přijatelné.

5.5.3. Posouzení vlivu sklonu hořáku a plochy návaru – extrémní hodnoty



Obr. 81 – Nastavení pro svařování RA23 až RA24



Obr. 82 – Svařování RA19,20,23,24

Tab. 16 – Základní parametry svařů

Svar RA	WFS	TS	CTWD	Úhel	I	U	H	A	p	v	r	w	Humping	Zápaly
19	25	1,8	21	38	437	33,2	4,09	9,9	2,13	5	0,7	5,8	N	0,592-D
20	25	1	21	38	407	34,9	7,24	18	1,47	6	0,3	9,2	P 0,2	1,35-D
23	25	1,29	21	30	430	34,3	5,76	14,1	2,43	6,08	0,5	7,1	N	0,12-B
24	25	1,29	21	46	374	34,2	5,27	13,8	0,75	4,6	0,7	7,7	P 0,5	0,212-B



Obr. 83 – Housenka svar 19



Obr. 84 – Housenka svar 20



Obr. 85 – Housenka svar 23



Obr. 86 – Housenka svar 24

Diskuze:

Vliv plochy návaru – svary 19, 20:

Nejmenší svar 19 o ploše návaru 10 mm² je subjektivně nepřijatelný, má prstový závar a viditelné zápaly po obou stranách, ale objektivně vyhovuje, zatímco u největšího svaru 20 o ploše 18 mm² je tomu přesně naopak. Závar je znatelně menší.

Svar 23 s nemenším sklonem hořáku je také subjektivně nepřijatelný ze stejného důvodu ale objektivně je vyhovující a má nejhlubší závar. Svar 24 s největším úhlem hořáku má naopak nejmenší závar a viditelný zápal na pásnici, měřením ale vyšel jako vyhovující.

Kromě výrazného prstového závaru u svařů 19 a 23 jsou na snímcích housenek patrné i drobné zápaly po stranách. Zejména tento nepravidelný přechod svaru do základního materiálu je důvodem jejich subjektivní nepřijatelnosti. Opět je překvapivé, že všechny 4 svary extrémních hodnot jsou objektivně přijatelné.

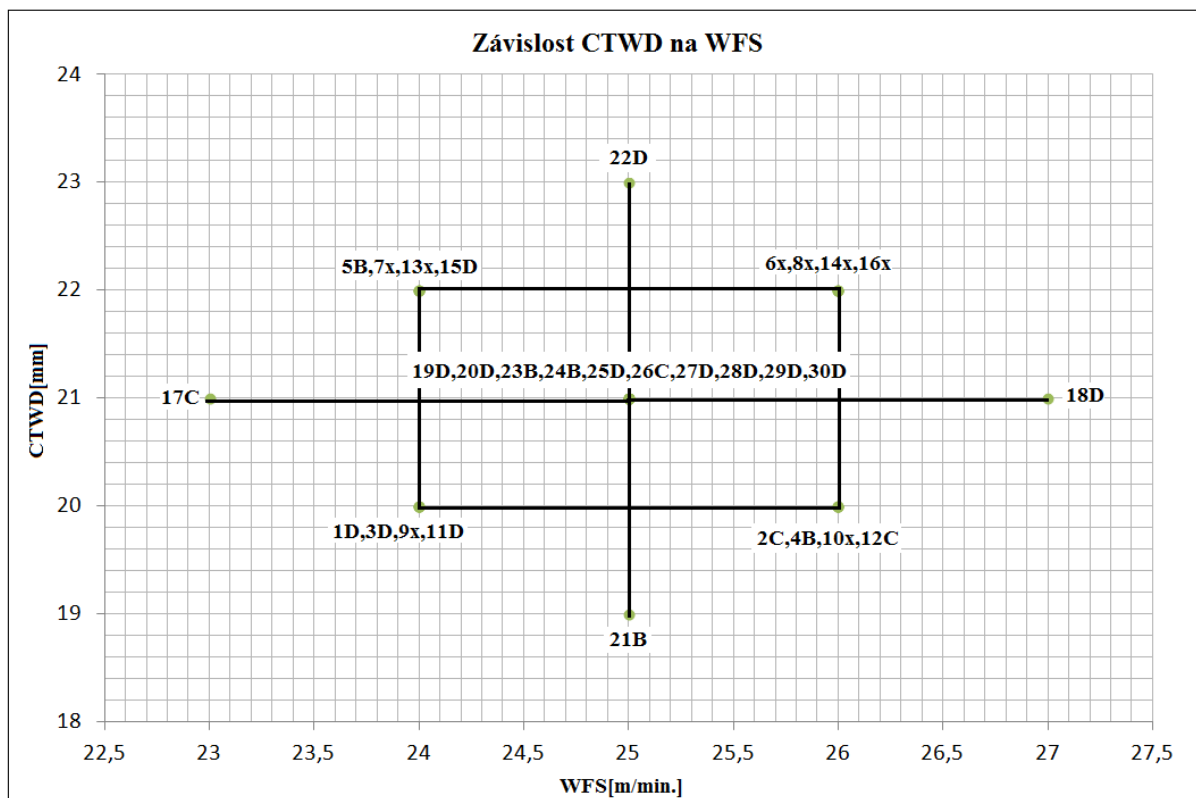
6. Závěr:

Při posouzení kvality svarů bylo použito několika hledisek:

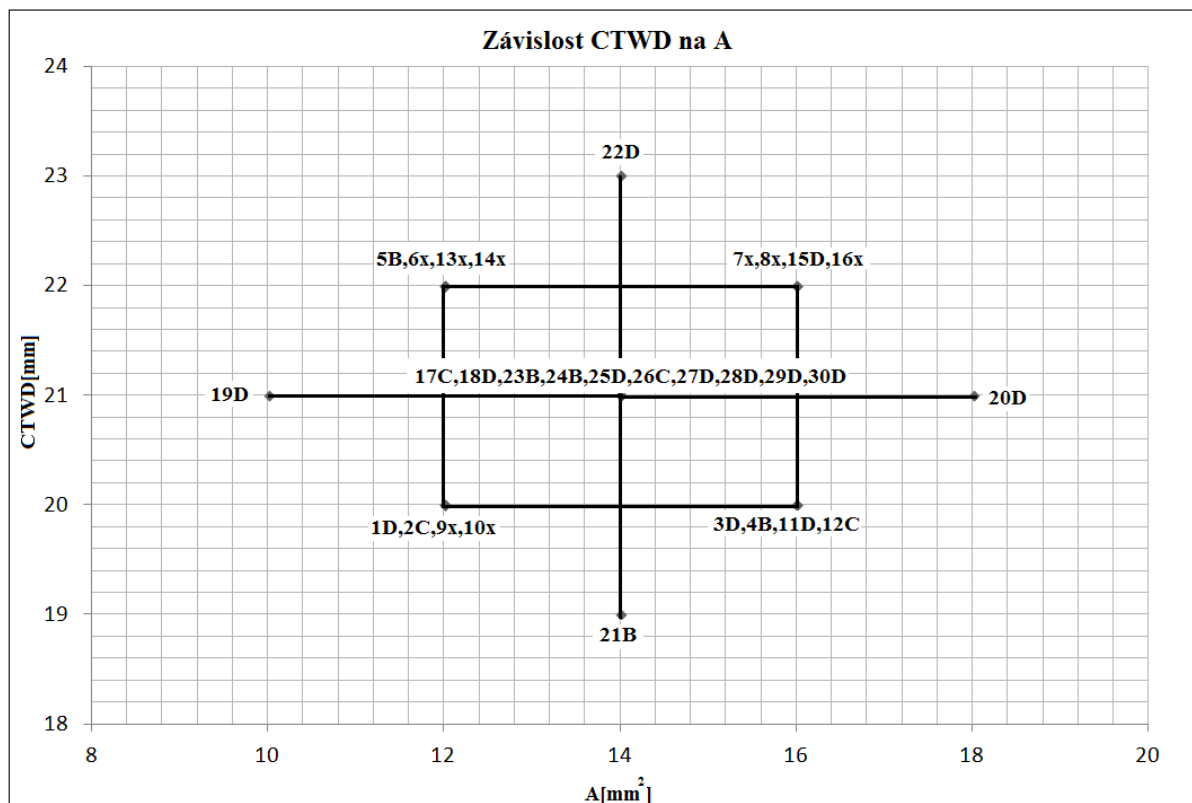
1. Makrosnímek leptaného svaru
2. Subjektivní hodnocení kvality provedení housenky
3. Měření velikosti a vzdálenosti boulí
4. Hloubka a délka zápalů

Poslední 2 kritéria byla porovnávána s hodnotami normy ČSN EN ISO 5871. Vzhledem k tomu, že norma je benevolentní k překročení rozměru koutového svaru, hlavními hodnotami pro určení stupně jakosti byly měřené hloubky zápalů.

Při posuzování vlivu parametrů na kvalitu svaru byly zjištěny tyto závislosti:

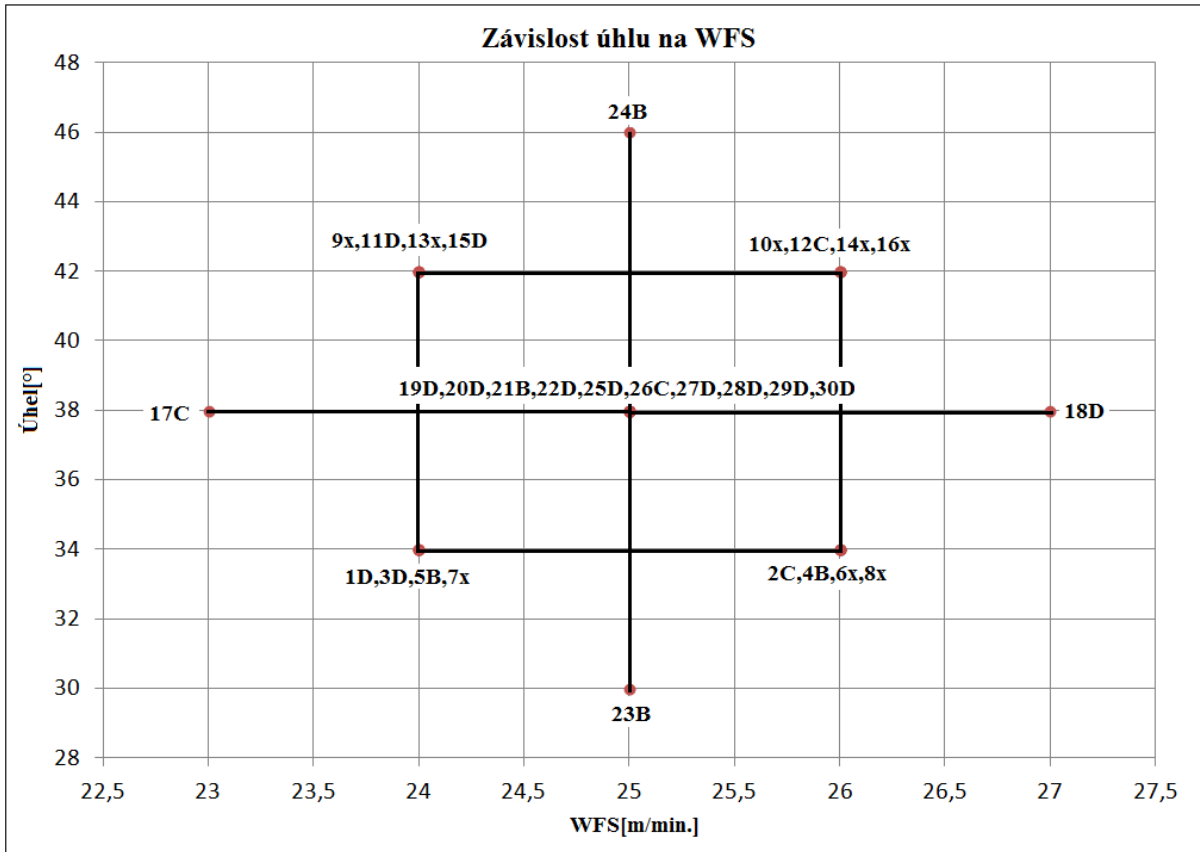


Graf 6 – Závislost CTWD/WFS

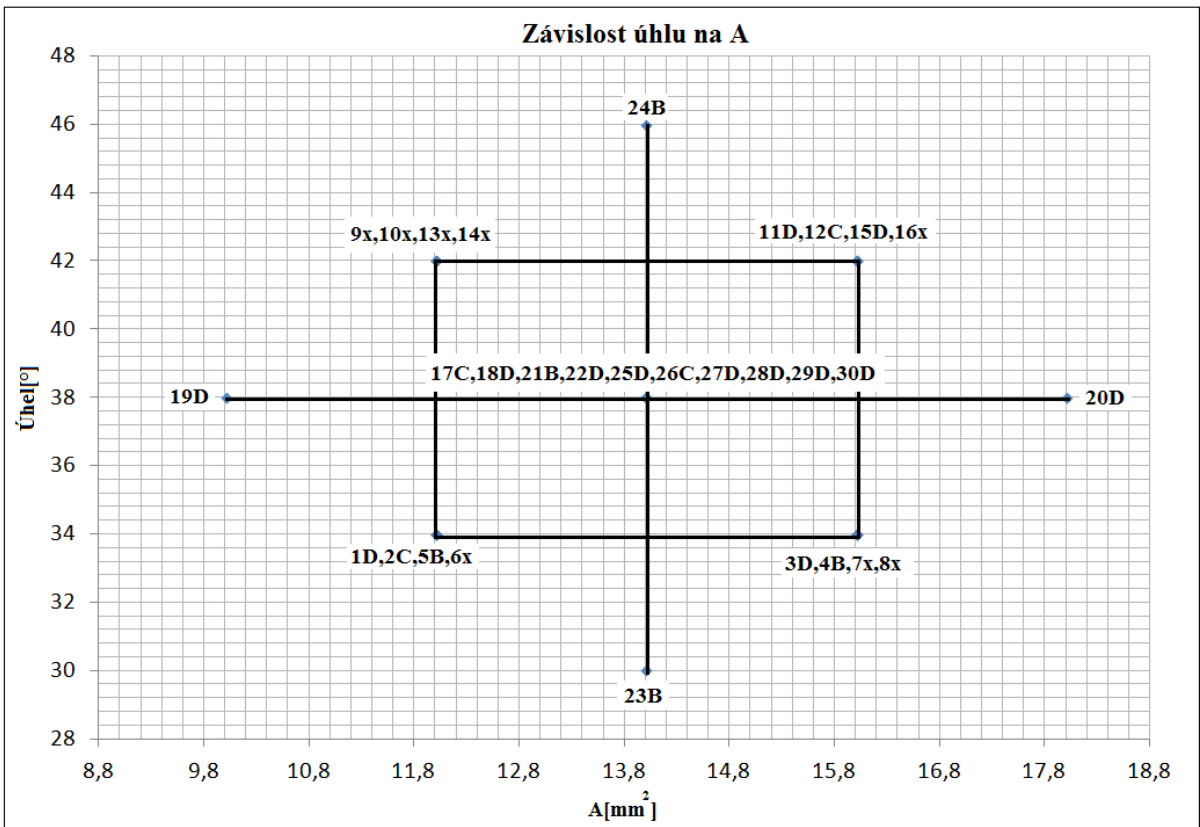


Graf 7 – Závislost CTWD/A

1. Vzdálenost konce drátu od povrchu (CTWD) přes 21 mm jednoznačně zvyšuje náchylnost k boulování a tvoření zápalů. Je zde patrné spolupůsobení rychlosti svařování (plochy návaru), při vyšší rychlosti (menší ploše) je náchylnost k zápalům větší. Svar 21 s min. CTWD, který je v nejvyšší kvalitě ukazuje na špatný odhad středu optimalizace u tohoto parametru.

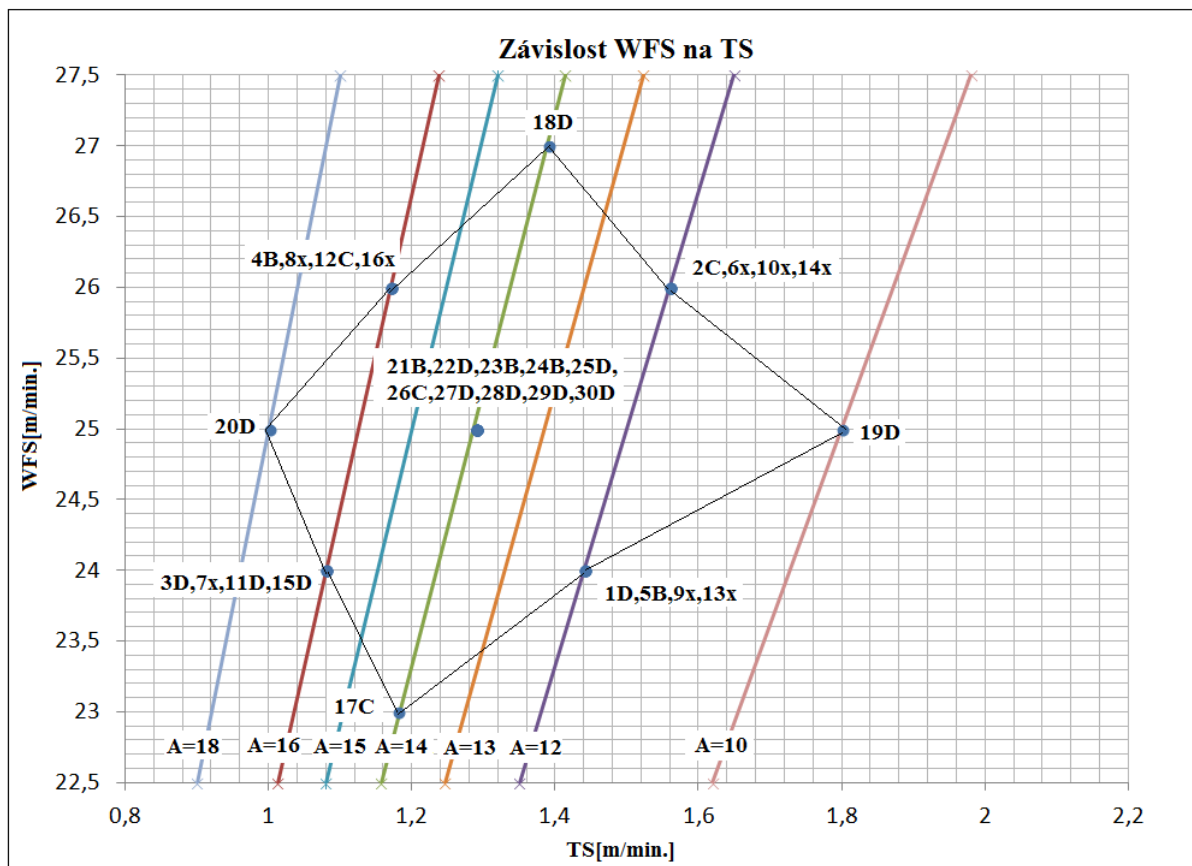


Graf 8 – Závislost Úhel/WFS



Graf 9 – Závislost Úhel/A

2. Úhel náklonu hořáku – menší úhel zvyšuje stabilitu housenky a zvětšuje závar. Při velmi malém úhlu $30 - 34^\circ$ to vede k vytváření prstového kořenového závaru. Větší úhel vede k nestabilitě housenky a vytváření zápalů. Kombinace většího úhlu při menší ploše návaru (větší rychlosti svařování) je jednoznačně negativní (svary 9, 10, 13, 14). Je zde patrný vliv CTWD – při větší vzdálenosti špičky je i při nižším úhlu větší sklon k zápalům. Dobré hodnocení svarů s extrémními úhly neodpovídá vzhledu makrosnímků – svar 23 má výrazný prstový závar a svar 24 naopak mělký, nepatrný závar.



Graf 10 – Závislost WFS/TS

3. Vliv rychlosti drátu a velikosti proudu. Obecně platí, že s větším proudem roste závar, což se potvrdilo. Přímý vliv rychlosti drátu na kvalitu se nepotvrdil, většinou tu spolupůsobí ostatní parametry – CTWD a úhel. Svary nepřijatelné jakosti se vyskytují při nižší i vyšší rychlosti drátu i rychlosti svařování. Velký vliv tu má i kombinace se

sklonem hořáku – u většího úhlu jsou výraznější změny kvality, než u menšího úhlu. U menších úhlů hořáku dochází k výraznému prstovému závaru i při nižším proudu.

4. Vliv plochy návaru a rychlosti svařování. Dobré svary byly zaznamenány při rychlostech svařování do 1,3 m/min. Nad touto rychlostí, zejména v kombinaci s větším CTWD se projevil sklon k zápalům a boulování. Na druhou stranu nižší rychlosti svařování při stejné rychlosti drátu a tedy větší plochou návaru vedly též k boulování a zápalům.

Optimální rozsah parametrů z hlediska jakosti svaru byl zjištěn následující:

Rychlost drátu – bez vlivu na kvalitu svaru.

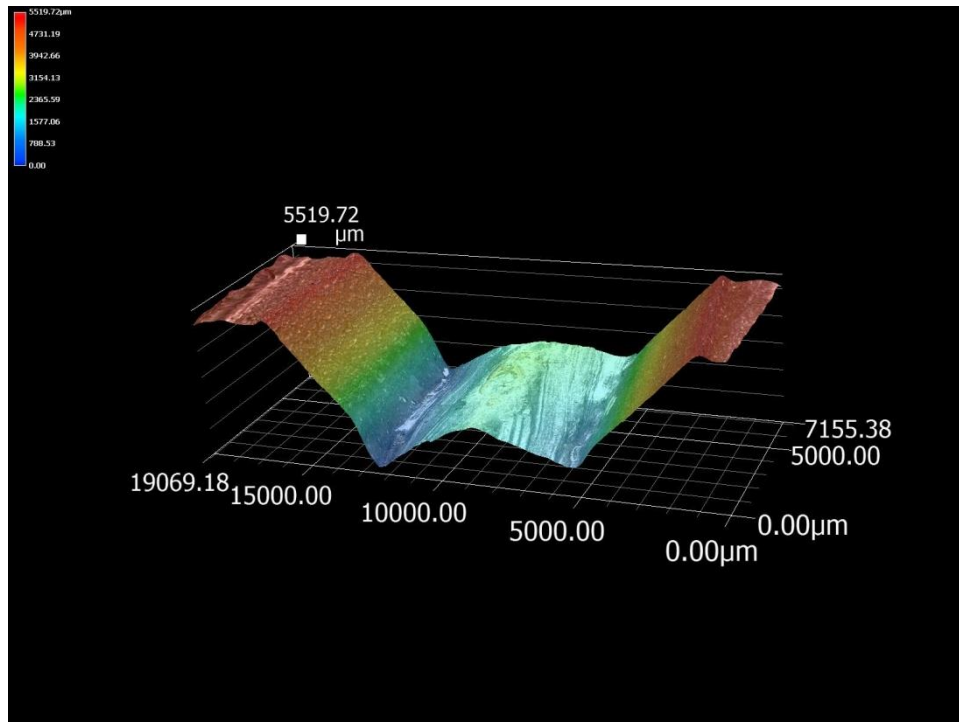
Plocha návaru – zvolený rozsah ploch se ukázal jako vhodný, bylo potvrzeno, že plochy svarů mezi 12 a 16 mm² jsou pro tuto kombinaci plynu a drátu v procesu zrychleného zkratu vyhovující.

Rychlost svařování – optimální mezi 1,1 a 1,3 m/min. ale v kombinaci s dalšími parametry lze dosáhnout stabilní svar i při rychlostech do 1,6 m/min.

CTWD – stabilnější jsou svary v rozsahu vzdálenosti kontaktní špičky kolem 20 mm, které zároveň vykazují hlubší závar, U tohoto jediného parametru lze očekávat, že optimální bod bude mimo stanovený rozsah a bude nutno doplnit experimenty pro CTWD 18 a 19 mm.

Úhel hořáku – má velký vliv na stabilitu housenky. Menší úhel hořáku jednoznačně zvyšuje stabilitu housenky. Nicméně úhly pod 30° jsou konstrukčně nedostupné vzhledem k tvaru hořáku a nedají se kombinovat s nízkou hodnotou CTWD, navíc způsobují úzký kořenový závar. Kvalitní svary s přijatelnou geometrií závaru byly v rozsahu 34 až 38°.

Celkové posouzení



Obr. 87 – Zkoumání svaru pomocí 3D skenování [18]

Svařování zrychleným zkratem (Rapid Arc) drátem 1 mm při rychlostech svařování až 1,6 m/min se ukázalo jako proces, jehož kvalita je ve velké míře závislá na dodržení přesně vymezených podmínek – geometrie dráhy hořáku a nastavení parametrů. Za těchto podmínek je proces stabilní a výsledný svar vyhovuje požadavkům na kvalitu. Přínosem je vysoká produktivita svařování, velmi nízké vnesené teplo do svaru a tím i podíl deformací. Velkou výhodou je možnost použití tohoto vysokovýkonného procesu pro svařování plechů již od tloušťky 4 mm. Při nesplnění těchto podmínek je proces náchylný k nestabilitě – boulování a vytváření zápalů a to nejen při překročení rychlosti svařování ale i při jejím podkročení, jak bylo dokázáno. Použitá metoda měření nedodržení požadovaného rozměru (boulování) a hloubky zápalů se ukázala jako použitelná v laboratorních podmínkách a méně subjektivně zatížená než prvotní vizuální kontrola. Nicméně do budoucna by bylo potřeba zvolit přesnější a objektivnější metodu např. pomocí 3D skenování – viz obr. 87.

7. Použité vzorce

Použité vzorce:

Celkový tepelný výkon

$$P = I \cdot (U_a + I \cdot R) = I \cdot U_a + I^2 \cdot \rho \cdot \frac{L}{D^2} \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

Kde L (mm) je délka výletu drátu, ρ je měrný odpor, D (mm) je průměr drátu, I (A) je proud, U_a je pokles napětí na anodě.

Vnesené teplo

$$H = 0,85 * \frac{I * U * 0,0006}{TS} \quad [\text{kJ/cm}] \quad (2)$$

I – proud [A], U – napětí [V], TS – rychlost svařování [m/min.]

Měřená plocha

$$A = 0,72 * \frac{WFS}{TS} \quad [\text{mm}^2] \quad (3)$$

WFS – rychlost podávání drátu [m/min.], TS – rychlost svařování [m/min.]

Skutečná vzdálenost kontaktní špičky od materiálu (max. možná délka oblouku)

$$\text{Arc} = \sin * \left(\frac{\text{Angle} * 3,142}{180^\circ} \right) * \text{CTWD} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

Angle – úhel [°], CTWD - vzdálenost kontaktní špičky od materiálu ve směru úhlu [mm]

8. Seznam použité literatury

- [1] ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektrodou*. Bratislava: ETERNA PRESS s.r.o, 2003. ISBN 80-968359-5-5.
- [2] HUDEC, Zdeněk. *Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG*. Liberec, 2005. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [3] LINDÉN, Edited by Klas Weman and Gunnar. *MIG welding guide*. Boca Raton, Fla [u.a.]: CRC Press [u. a.], 2006. ISBN 08-493-9112-1.
- [4] SUBAN, M., J. TUŠEK, G LINDÉN a G. LINDÉN. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, vol. 119, 1-3, s. 49-70. DOI: 10.1533/9781845691479.1.49.
- [5] NOSEK, Jindřich. *Technologie MAG pro svařování plechů tl. 2 – 6 mm*. Liberec, 2012. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [6] ČSN EN ISO 5817. *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titatnu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (mimo elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů jakosti*. Česká republika: Český normalizační institut, 2004.
- [7] MORAVEC, Jaromír. *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011, 101 s. ISBN 978-80-7372-805-2.
- [8] Zdroj Migatronik Omega 550 S-V Basic. [Http://shop.migatronik.cz/](http://shop.migatronik.cz/) [online]. [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: <http://shop.migatronik.cz/hlavni-oddeleni/kategorie/svarovaci-zdroje/omega-550-s-v-basic?=1237>
- [9] Svařovací drát Supra MIG. Http://www.czweld.cz/m_6.htm [online]. [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: <http://www.czweld.cz/supramig.htm>
- [10] Svařovací plyn Feromaxx 7. [online]. [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: http://www.airproducts.cz/microsite/cz/welding_selector/.../Ferromaxx_7.pdf
- [11] MYERS, R. H.: *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons Inc. N.Y. 1995

- [12] ALLEN, T.T., RICHARDSON, R.W., TAGLIABUE, D.P., MAUL, G.P.: Statistical Process Design for Robotic GMA Welding of Sheet Metal, *Welding Journal* 81(5): 69 - s – 77 - s, 2002.
- [13] T. C. Nguyen, D. C. Weckman, D. A. Johnson and H. W. Kerr. The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining* Vol. 10: 447 – s – 459-s, 2005.
- [14] HARWIG, D.D.: A Wise Method for Assessing Arc Welding Performance and Quality, *Welding Journal* Dec.2000
- [15] BARTÁK, Jiří. Vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. [online]. ŠKOLA WELDING Plzeň, 2012 [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [16] HUDEC, Zdeněk. *Technologičnost návrhu svarů MAG pro ocelové konstrukce*. Liberec, 2012. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [17] VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Praha: SNTL, 1983. ISBN 04-218-83.
- [18] *Keyence: A Microscope, SEM and Roughness Gauge in a Single Unit*. Japonsko, 2012.

9. Rozsah práce

Počet stran:.....	73
Počet obrázků:.....	87
Počet tabulek:.....	16
Počet grafů:.....	10