

Vysokovýkonné svařování MAG drátem 1,4 mm

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Zdeněk Filip**
Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk Filip**
Osobní číslo: **S14000486**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Vysokovýkonné svařování MAG drátem 1,4 mm**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte způsob svařování MAG hlubokozávarovou sprchou, 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. Proveďte sérii průzkumných svarů pro nalezení blízko-optimálních podmínek svařování hlubokozávarovou sprchou.
5. Na základě výsledků odhadněte polohu optima a navrhnete a proveďte plán experimentů podle středové kompozice pro optimalizaci parametrů a geometrie koutových svarů.
6. Proveďte zhodnocení svarů podle zavedené metodiky optimalizace efektivity provedení svaru. Dále svary vyhodnoťte podle normy ČSN EN ISO 5817 a vymezte parametrické pole podle normové kvality svarů. Porovnejte výsledky optimalizace svařování drátem 1,4 mm s dříve provedenými optimalizacemi drátu 1,2 a 1,0 mm.
7. Formulujte dílčí závěry formou komentovaných tabulek a diagramů.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
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.a kol. *Experimental test sof High Performance short-spray GMAW, using Ferromaxx 7 shielding gas. Technická zpráva pro Air Products, 2013.*
[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, Welding Journal, 2003.*

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

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. března 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

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.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto 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:

Podpis:

Abstrakt

Diplomová práce navazuje na předchozí práce optimalizace svařování MAG soustavy zdroj-drát-plyn pomocí algoritmu matematického výpočtu efektivity provedení koutového svaru. V diplomové práci byla provedena optimalizace svařování hlubokozávarovou sprchou plného drátu o průměru 1,4 mm, který není běžně používán a pro účel této práce byl vyroben firmou Lincoln. Optimalizace byla provedena pomocí dvou statistických metod (DOE), nejprve metodou ortogonálních polí (Taguchi) pro přibližný odhad optimálních parametrů a dále metodou středové kompozice, jako u předchozích prací. Zejména byl posouzen vliv parametrů svařování na kvalitu svaru. Výsledky byly posouzeny z hlediska praktického využití.

Klíčová slova:

MAG, koutový svar, drát 1,4 mm, efektivita provedení, optimalizace.

Abstract

This thesis is based on previous work with optimizing of MAG welding source-wire-gas systems using a mathematical algorithm for calculating fillet weld design efficiency. The thesis was carried out optimization of the short spray deep penetrated method of solid wire 1.4 mm that is not commonly used in praxis and for the purpose of this work was made with Lincoln Electric comp. Optimization was carried out using two statistical DOE methods. First with Taguchi method of orthogonal arrays for first evaluation of optimal parameters and second with central composition method as used in previous works. Especially process parameters cause on the weld's quality were evaluated. The results were assessed in terms of practical use.

Key words:

MAG, fillet weld, wire, performance efficiency, optimization

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
1 ÚVOD.....	10
2 REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE	11
2.1 Princip svařování metodou MAG	11
2.2 Ochranné plyny	13
2.3 Zařízení pro svařování metodou MAG	16
2.4 Zdroje pro svařování metodou MAG.....	17
2.5 Parametry svařování.....	18
2.5.1 Svařovací napětí.....	18
2.5.2 Svařovací proud	19
2.5.3 Proudová hustota.....	20
2.5.4 Rychlost svařování.....	20
2.5.5 Druh a polarita svařovacího proudu.....	21
2.5.6 Volná délka drátu – výběh drátu (výlet drátu).....	21
2.6 Způsob přenosu kovu v oblouku	22
2.7 Hlubokozávarové svařování v režimu zkratované sprchy	27
2.8 Monitorizace svařovacích parametrů systémem WeldMonitor	28
2.9 Optimalizace procesu svařování	32
2.10 Plánování programu experimentů.....	34
2.10.1 Taguchiho metoda.....	35
2.10.2 Metoda středové kompozice	35
2.10.3 Heuristické metody	37
2.11 Technologičnost koutového svaru.....	37
2.12 Metodiky.....	38
2.12.1 Metodika 1	38

2.12.2	Metodika 2	39
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	41
3.1	Charakteristika zdroje použitého při experimentu	41
3.2	Přídavný materiál	44
3.3	Ochranný plyn.....	44
3.4	Příprava, zpracování a vyhodnocení vzorků	44
3.4.1	Příprava vzorků před svařováním	44
3.4.2	Svařování vzorků	44
3.4.3	Vyhodnocení metalografických výbrusů	45
3.5	Návrh parametrů experimentu.....	46
3.6	Optimalizace dle metodiky 1B.....	51
3.7	Zhodnocení výsledků	54
3.7.1	Posouzení vlivu hlavních parametrů - v_d a v_s na kvalitu svarů.....	54
3.7.2	Posouzení vlivu vedlejších parametrů napětí U a výšky kontaktní špičky CTWD na kvalitu svaru.	63
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	PŘÍLOHA.....	68
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Popis
MAG (metoda 135)	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
MIG (metoda 131)	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
TIG (metoda 141)	obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
MMA (metoda 114)	obloukové svařování obalenou elektrodou
DOE	Design of Experiments (statistický návrh experimentů)
I	svařovací proud [A]
U	svařovací napětí [V]
v_d	rychlost podávání drátu [m/min]
v_s	rychlost svařování [m/min]
CTWD	vzdálenost kontaktní špičky od povrchu základního materiálu [mm]
L	výlet drátu [mm]
a	jmenovitá velikost koutového svaru [mm]
b, c	měřené strany koutového svaru [mm]
x_{max}	maximální osový závar [mm]
z_{max}	maximální hloubka závaru [mm]
v_{max}	maximální účinná výška koutového svaru [mm]
v_t	efektivní výška svaru [mm]
w	šířka housenky [mm]
p	převýšení svaru [mm]
β_1	přechodový úhel svaru do pásnice [mm]
β_2	přechodový úhel svaru do stojny [mm]
e	excentricita [mm]
P_N	měřená plocha návaru [mm ²]
P_s	průřezová plocha svaru [mm ²]
P	výpočtová plocha návaru [mm ²]

Zkratka/Symbol	Popis
Q	jednotkové vnesené teplo [kJ/cm]
D	% zředění [%]
PE	efektivita závaru svaru [-]
DE	efektivita návaru svaru [-]
FE	celková efektivita provedení koutového svaru [-]
d	průměr drátu [mm]
r	poloměr drátu [mm]
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma

1 ÚVOD

Zadání této diplomové práce navazuje na celou řadu diplomových prací [4,5], které byly zaměřeny měření a optimalizaci efektivity provedení koutového svaru metodou svařování MAG. Optimalizace svařovacích parametrů při hlubokozávarovém režimu svařování u drátu 1,4 mm dosud nebyla prováděna a nejsou dostupné ani synergické parametry standartních režimů svařování (zkrat, přechod, sprcha), protože tento drát se v praxi nepoužívá. Cílem této práce je provést optimalizaci efektivity provedení svaru podle zavedené metodiky a na základě experimentálních výsledků vymezit parametrické pole při akceptovatelné kvalitě svaru.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21122 ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

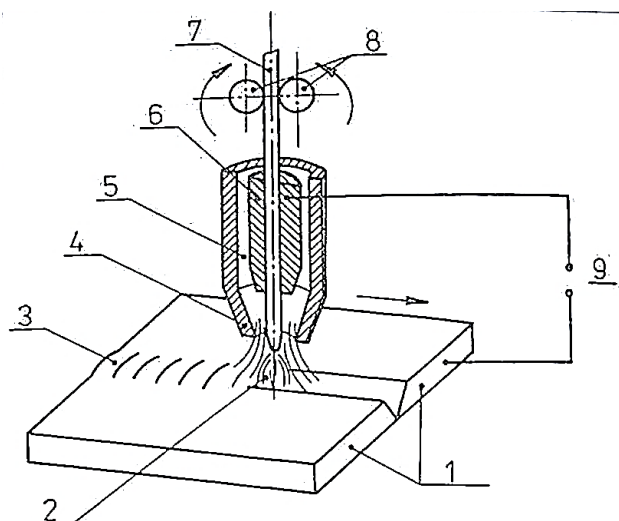
2 REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Princip svařování metodou MAG

Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu – MAG (metoda 135) patří vedle svařování obalenou elektrodou v celosvětovém měřítku k nejrozšířenějším metodám pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Hlavními důvody rozšíření metody MAG jsou: široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení a především významné výhody a charakteristiky uvedené metody svařování. [1]

Svařování metodou MAG je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře aktivního plynu. Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku, tak aby elektricky zatížená délka drátu byla co nejkratší. Drát je podáván podávacími kladkami umístěnými v podavači, vlastním hořáku nebo kombinací obou systémů z cívky o běžné hmotnosti 15 kg. Proudová hustota je u svařování MAG nejvyšší ze všech obloukových metod a dosahuje až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a svařovací proudy se pohybují od 30 A u svařování tenkých plechů drátem o průměru 0,6 – 0,8 mm, až do 800 A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Charakter přenosu kovu obloukem závisí na parametrech svařování a ochranném plynu, přičemž běžný je zkratový pro tenké plechy a sprchový pro větší tloušťky plechů. U vysokých proudů se mění charakter přenosu kovu obloukem a vlivem elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku. Teplota kapek se při MAG svařování pohybuje v rozmezí 1700 až 2500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemické složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C. [1]

Díky vysokým proudům se svařovací rychlost blíží hranici $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost kapek přenášených obloukem přesahuje $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [1] Schematický obrázek svařování metodou MAG je na obr. 1.



Obr. 1: Schéma svařování metodou MAG [1]

1 – svařovaný materiál, 2 – elektrický oblouk, 3 – svar, 4 – plynová hubice,
5 – ochranný plyn, 6 – kontaktní průvlek, 7 – přídatný drát, 8 – podávací kladky,
9 – zdroj proudu

V současné době je největší uplatnění při ručním a mechanizovaném svařování nelegovaných, nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, při použití směsného plynu argonu s oxidem uhličitým.

Hlavní výhody svařování metody MAG jsou:

- svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm;
- minimální tvorba strusky;
- přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně;
- vysoká efektivita, úspora nedopalků tzv. nekonečným drátem;
- snadný start oblouku bez nárazu svařovacího drátu do svarku;
- velmi dobrý profil svaru a hluboký závar;
- malá tepelně ovlivněná oblast především u vysokých rychlostí svařování;
- vysoká proudová hustota;
- vysoký výkon odtavení;
- široký proudový rozsah pro jeden průměr drátu;
- stabilní plynová ochrana;
- nízká pórovitost;

- malý nebo žádný rozstřík kovu elektrody;
- snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systémů svařování. [1]

Ochranný plyn se volí podle druhu svařovaného materiálu, ovlivňuje však také přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku.

2.2 Ochranné plyny

Hlavní úlohou ochranných plynů je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování, tj. především chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň, její okolí a kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku, který způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků.

Ochranné plyny mají významný vliv na přenos kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, chování tavné lázně, hloubku závaru, rychlost svařování a další parametry svařování. [1]

Ochranný plyn svým složením a množstvím ovlivňuje tyto charakteristiky svařování:

- vytvoření ionizovaného prostředí pro dobrý start a hoření oblouku;
- metalurgické děje v době tvoření kapky, při přenosu kapky obloukem a ve svarové lázni;
- síly působící v oblouku;
- tvar a rozměry oblouku;
- charakter přenosu kovu v oblouku, tvar a rozměry kapek a rychlost jejich přenášení obloukem;
- tvar a rozměry průřezu svaru;
- hladkost povrchu svaru a jeho přechod na základní materiál;
- kvalitu, celistvost a mechanické vlastnosti svarového spoje. [1]

V současné době se na ochranu oblouku používají jednosložkové nebo vícesložkové plyny. Podle charakteru se ochranné plyny se projevují neutrálním, oxidačním nebo nahličujícím vlivem na svarovou lázeň. V tab. 1 jsou ochranné plyny rozděleny podle chemického účinku na svarový kov na několik skupin. [1]

Tab. 1: Rozdělení plynů dle chemického charakteru – norma ČSN EN 439 [1]

ČSN EN 439									
Označení		Prvky v procentuálním objemu						Typické použití	Poznámka
Skupina	Identifikační číslo	Oxidační		Inertní		Redukční	Nereagující		
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂		
R	1			zbytek		0 až 15		WIG PAW(C) Ochrana kořene	Redukční
	2			zbytek		0 až 35			
I	1			100				MIG WIG PAW	Inertní
	2				100				
	3			zbytek	0 až 96				
M1	1	0 až 5		zbytek	0 až 5			MAG	Mírně oxidační
	2	0 až 5		zbytek					
	3		0 až 3	zbytek					
	4	0 až 5	0 až 3	zbytek					
M2	1	0 až 25		zbytek					
	2		3 až 10	zbytek					
	3	0 až 5	3 až 10	zbytek					
	4	0 až 25	0 až 8	zbytek					
M3	1	25 až 50		zbytek					
	2		10 až 15	zbytek					
	3	5 až 50	8 až 15	zbytek					
C	1	100	0 až 30						Silně oxidační
	2	zbytek							
F	1						100	PAC Ochr.	Nereag.
	2					0 až 50	zbytek		Redukční

PAW – svařování plazmou, PAC – řezání plazmou

Inertní plyny skupiny „I“ argon, helium a jejich směsi chemicky nereagují se svarovou lázní a propal prvků ve svarovém kovu je minimální, nemají proto vliv na výsledné chemické složení svarového kovu. Inertní, případně nereagující plyny používáme pro svařování metodou WIG všech svařitelných materiálů a metodou MIG pro slitiny hliníku, mědi, niklu aj.

Aktivní plyny skupiny „M1, M2, M3 a C“ ovlivňují v menší nebo větší míře chemické složení svarového kovu.

Ochranné plyny se rozdělují podle indexu oxidačního účinku do řady 0 – 10 a vlivu na nauhličení.

Z poměrně širokého sortimentu nabízených směsných plynů je ve skupině „M1“ směs Ar + 1 – 2% O₂, která se používá pro svařování vysokolegovaných austenitických

ocelí. Tato směs má nejmenší index oxidačního účinku 1, resp. 2 a nemá nauhličující charakter.

Ve skupině směsných plynů „M2“ jsou nejpoužívanější plyny pro MAG svařování. Často používaná dvousložková směs plynů typ Ar + 20% CO₂, má oxidační účinek podobný jako u směsi Ar + O₂ (index 2). Argon s oxidem uhličitým má však nauhličující účinek. Používá se pro uhlíkové a nízkolegované oceli.

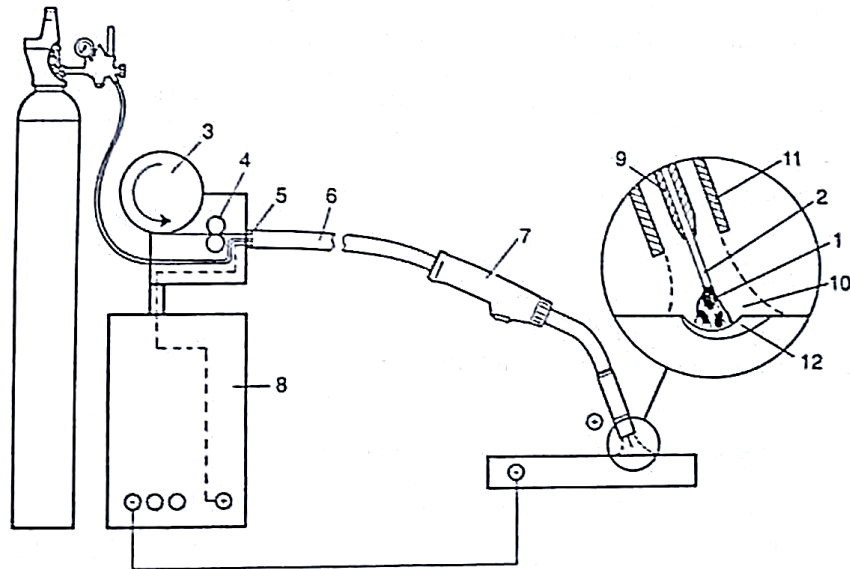
Trosložková směs na svařování tenkých plechů je Ar + 5% O₂ + 15% CO₂ a má výrazný oxidační účinek – index 6,5.

Nejvyšší oxidační účinek (index 10) má čistý CO₂ označený skupinou „C“. Má i výrazný nauhličující účinek a jeho využití má klesající tendenci.

V ochranném plynu CO₂ probíhají chemické reakce v širokém rozmezí podmínek svařování tak, že rovnovážný stav uhlíku ve svarovém kovu se ustálí v rozmezí 0,10 – 0,15%, bez ohledu na to jaký obsah uhlíku je ve svařovacím drátu. To znamená, při určitých podmínkách dochází k propalu uhlíku a při použití nízkouhlíkových drátů dojde k nauhličení svarového kovu. [1]

2.3 Zařízení pro svařování metodou MAG

V současnosti je velmi široký sortiment vyráběných zařízení pro svařování metodou MAG. Na obr. 2 je základní schéma zařízení pro svařování metodou MAG.



Obr. 2: Základní schéma svařování metodou MAG [1]

1 – elektrický oblouk, 2 – drátová elektroda, 3 – zásobník drátu, 4 – podávací kladky,
5 – rychloupínací spojka, 6 – hořákový kabel, 7 – svařovací hořák, 8 – zdroj
svařovacího proudu, 9 – kontaktní svařovací průvlak, 10 – ochranný plyn, 11 – plynová
tryska, 12 – svarová lázeň

Základní nutné vybavení pro svařování metodou MAG:

- zdroj svařovacího proudu s řídicí jednotkou;
- podavač drátové elektrody;
- svařovací hořák;
- multifunkční kabel hořáku s rychlospojkou;
- uzemňovací kabel se svorkou;
- zásobník ochranného plynu s redukčním ventilem.

V závislosti na výkonu, složitosti, náročnosti a požadavcích výroby mohou být dnešní výkonné moderní zařízení vybaveny dalšími technickými doplňky:

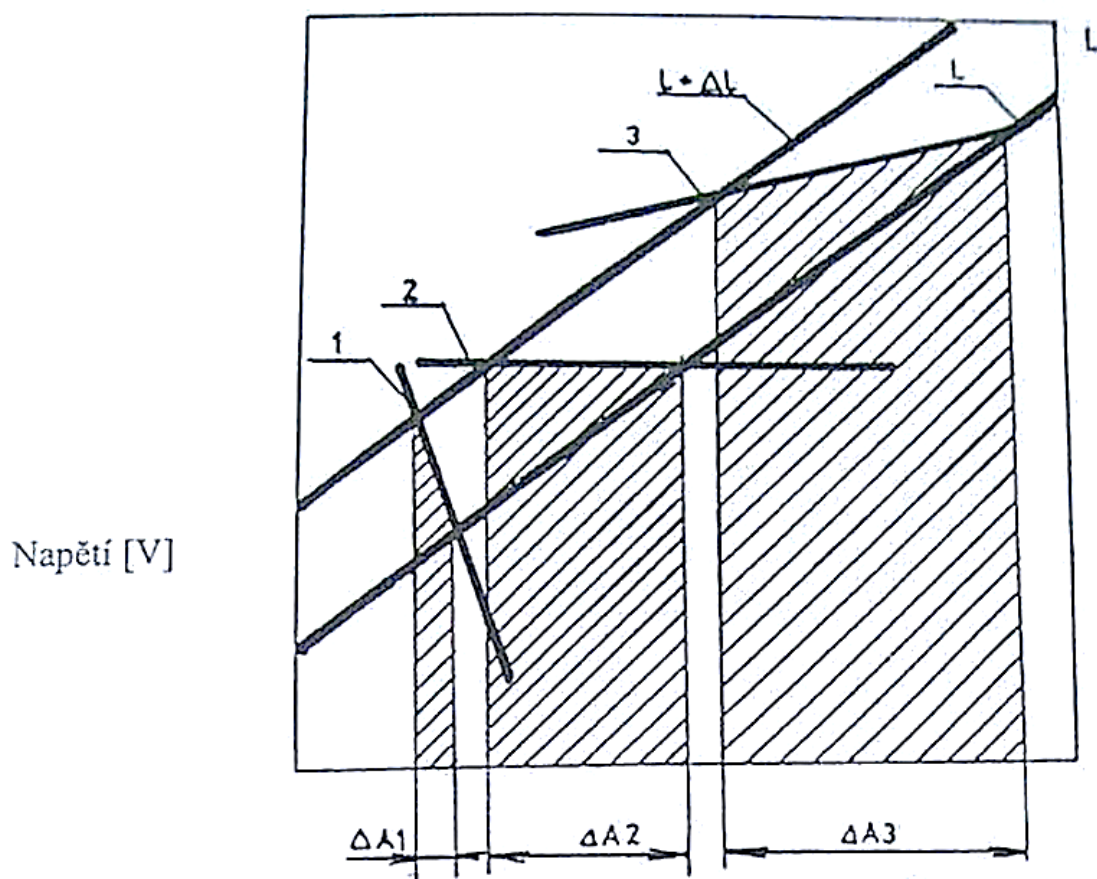
- chladicí jednotka pro chlazení hořáku a svařovacího kabelu;
- mezipodavač drátové elektrody pro svařování na velké vzdálenosti;

- dálkové ovládání svařovacích parametrů (ruční měnič);
- řídicí jednotkou vybavenou procesorem pro regulaci a kontrolu parametrů svařování v reálném čase, archivace dat v paměťovém bloku a databázi programů svařovacích cyklů;
- pojízdný vozík;
- rameno pro nesení hořáku a kabelu. [1]

2.4 Zdroje pro svařování metodou MAG

Pro svařování metodou MAG se používají zdroje se stejnosměrným výstupem proudu, kde kladný pól zdroje je připojen na drátovou elektrodu.

Používají se usměrňovače a v dnešní době převážně inventory různých výkonových vlastností. Zdroje pro svařování MAG mají plochou statickou charakteristiku obr. 3 s tzv. konstantním napětím se samoregulační schopností udržování konstantní délky oblouku. Tato regulace je založena na výrazné změně proudu při relativně malé změně délky oblouku a tím i napětí na oblouku. Tento princip regulace délky oblouku je možný jen při konstantní rychlosti podávání drátu. Při změně délky oblouku se změní napětí a dle pohybu pracovního bodu na statické charakteristice se mění proud. Při dlouhém oblouku se sníží proud i rychlost odtavování elektrody a při konstantní rychlosti podávání drátu se začne drát přibližovat ke svarové lázni a oblouk se tím zkrátí. Naopak při krátkém oblouku a poklesu napětí se zvyšuje intenzita proudu a odtavování je rychlejší. Délka oblouku se tím zvětší a u reálného procesu svařování osciluje kolem nastavené „rovnovážné“ hodnoty. [1]

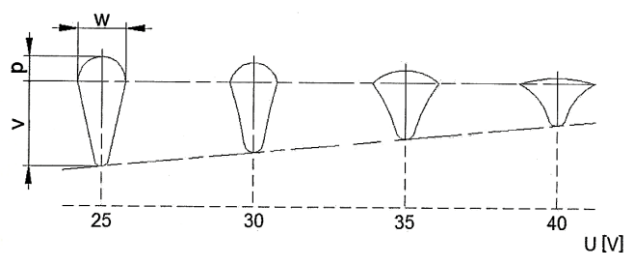


Obr. 3: Srovnání různých V – A charakteristik – vliv strmosti na změnu proudu [1]
1 – strmá charakteristika, 2 – plochá mírně klesající charakteristika, 3 – plochá mírně rostoucí charakteristika, L a $L+\Delta L$ – charakteristiky oblouku

2.5 Parametry svařování

2.5.1 Svařovací napětí

Napětí na oblouku představuje potenciální rozdíl mezi drátem elektrody a povrchem svarové lázně. Mění se podle délky oblouku a na odtavovací výkon má jen malý vliv. Výrazný vliv má napětí na šířku svarové housenky obr. 4, ale hloubku závaru ovlivňuje samotné napětí jen málo. [1]



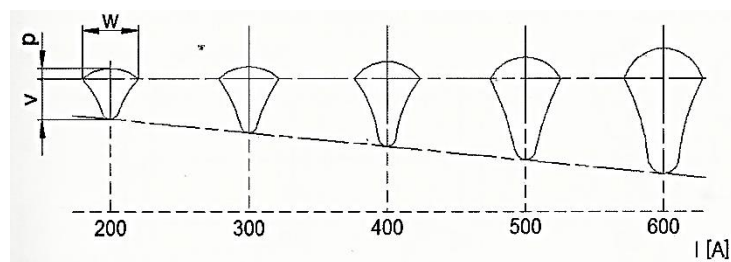
Obr. 4: Závislost tvaru svarové housenky na napětí [2]

Nadměrně vysoké napětí zvyšuje délku oblouku a propal prvků, svary jsou náchylné na pórovitost a zvyšuje se rozstřík. Svarová lázeň je široká, mělká a vzniká nebezpečí předbíhání svarové lázně před oblouk. Obtížně se ovládá tavná lázeň v nucených polohách.

Nízké napětí bývá příčinou nestabilního procesu, úzkých housenek s velkým převýšením především při vysokých rychlostech svařování. Při nízkém napětí nedochází k dokonalému natavení svarových hran a při vícevrstevném svařování dochází k výskytu studených spojů. [1]

2.5.2 Svařovací proud

Svařovací proud má na charakter přenosu kovu při svařování a tvar průřezu svarové housenky největší vliv obr. 5. S růstem proudu roste proudová hustota, velikost a tekutost svarové lázně, součinitel roztavení a odtavovací výkon.



Obr. 5: Závislost tvaru svarové housenky na intenzitě proudu [2]

Při konstantním napětí na oblouku nastává při zvyšování proudu výrazný růst hloubky závaru s relativně malým růstem šířky housenky i převýšení.

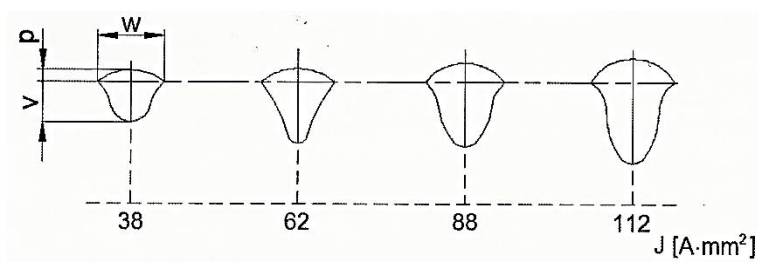
Svařovacím proudem lze ovlivnit charakter přenosu kovu v oblouku:

- růstem proudu roste frekvence kapek;
- intenzita proudu ovlivňuje síly, které působí na kapky kovu;
- růstem proudu se u běžných typů přenosů kovu zmenšuje objem kapek.

Z hlediska kvality svaru je výhodnější menší průměr drátu, poněvadž dává větší počet drobných kapek a kvalita povrchu svarové housenky je velmi dobrá. Z hlediska směrové stability výletu drátu a ekonomických nákladů je výhodnější větší průměr, protože z důvodu snížení počtů tahů je drát levnější. Toho lze využít u pulzního svařování, kde rozměr kapek je řízen vlastním procesem svařování. [1]

2.5.3 Proudová hustota

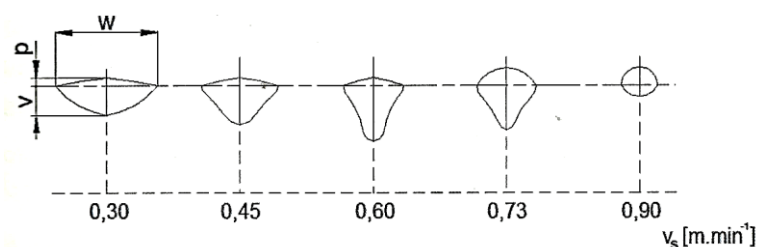
Proudová hustota vyjadřuje proudové zatížení drátu s ohledem na jeho průřez. Udává se v $A \cdot mm^{-2}$ a roste se zmenšováním průměru drátu. Vliv proudové hustoty na charakter svařování a tvar průřezu svarové housenky je podobný jako vliv proudu obr. 6, tzn. s růstem proudové hustoty při konstantním napětí roste hloubka závaru i výkon odtavení drátu. [1]



Obr. 6: Závislost tvaru svarové housenky na proudové hustotě [2]

2.5.4 Rychlost svařování

Rychlost svařování je dalším ze základních parametrů svařování. Působí opačně než svařovací proud a napětí na oblouku. Zvyšováním rychlosti svařování se snižuje tepelný příkon svařování na jednotku délky svaru, rychleji se odevzdává teplo a zmenšuje se teplo potřebné pro předehřev svarových ploch. S rostoucí rychlostí svařování se snižuje šířka svarové lázně a zároveň roste převýšení svaru obr. 7. S rostoucí rychlostí svařování se mírně zvětšuje hloubka závaru a to až do takové hodnoty svařovací rychlosti, při které se ještě svarové plochy stačí natavovat. Po překročení této hodnoty velikost závaru naopak klesá. S dalším růstem rychlosti svařování se šířka svarové lázně výrazně zmenšuje a velikost převýšení roste. [2]



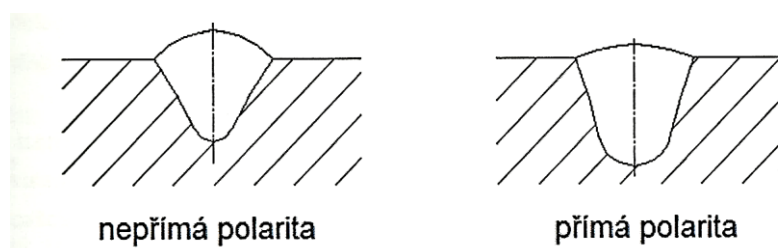
Obr. 7: Závislost tvaru svarové housenky na rychlosti svařování [2]

2.5.5 Druh a polarita svařovacího proudu

Při svařování metodou MAG se nejčastěji používá stejnosměrný proud a zapojení elektrody na kladném pólu zdroje, tzn. nepřímá polarita. Při tomto zapojení se tvar průřezu vyznačuje zvýšenou hloubkou závaru, malým převýšením a relativně širší housenkou.

Při zapojení elektrody na záporném pólu tzn. přímá polarita, hloubka závaru se zmenšuje, stejně tak šířka housenky a převýšení roste. Těchto skutečností lze využít při navařování, kde je požadavek malého závaru a tím i zředění prioritní. Při přímé polaritě se u plného průřezu drátu tvoří na konci drátu rozměrná a stabilní kapka, což se projeví zvýšeným rozstříkem. [1]

Na obr. 8 lze porovnat tvar svarové lázně při přímé a nepřímé polaritě.



Obr. 8: Porovnání tvaru svarové lázně při rozdílném typu zapojení [2]

2.5.6 Volná délka drátu – výběh drátu (výlet drátu)

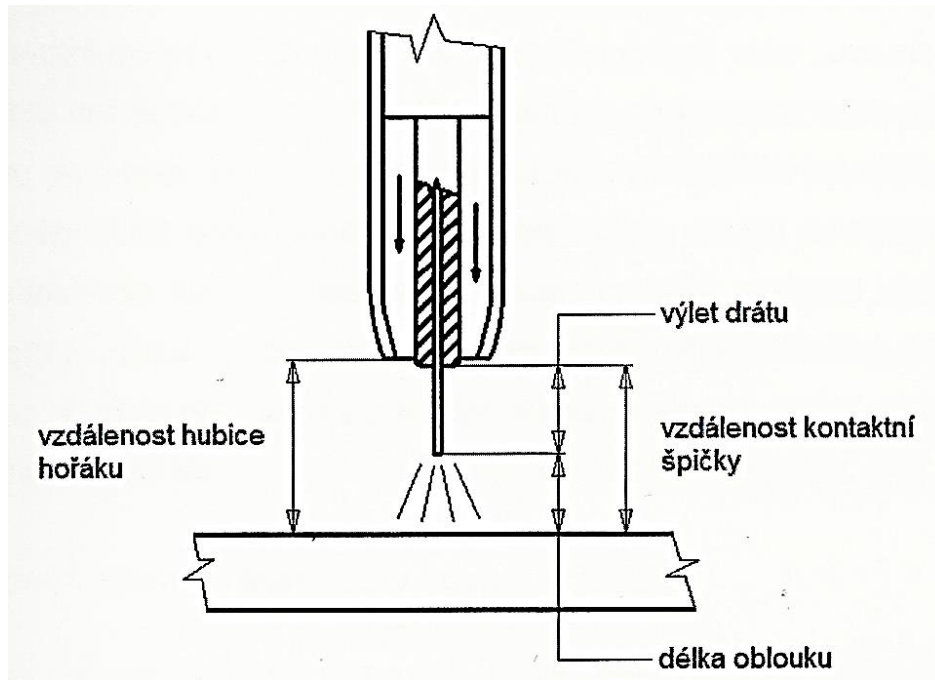
Volná délka drátu se měří od konce kontaktního proudového průvzlaku po oblouk a obecně platí, že je rovná desetinásobku průměru drátu. Na skutečnou délku výběhu drátu má vliv více podmínek svařování – typ přenosu kovu a použitý ochranný plyn.

Přesnější hodnoty lze určit ze vztahů (1) a (2):

$$L = 5 + 5 \cdot d \quad \text{pro oxid uhličitý} \quad (1)$$

$$L = 7 + 5 \cdot d \quad \text{pro směsné plyny, kde } d \text{ je průměr drátu} \quad (2)$$

Se změnou vzdáleností kontaktní špičky a svařovaného materiálu obr. 9 se mění řada parametrů svařování. Významná je změna proudu, který klesá se zvyšující se vzdáleností špičky od materiálu a důsledkem tohoto poklesu je menší průvar. Snížení proudu je způsobeno odporovým ohřevem drátu a představuje přibližně 10 až 20 A na 1 mm změny délky výběhu drátu. Celková změna intenzity proudu může být až 80 A proti nastavené hodnotě. [1]



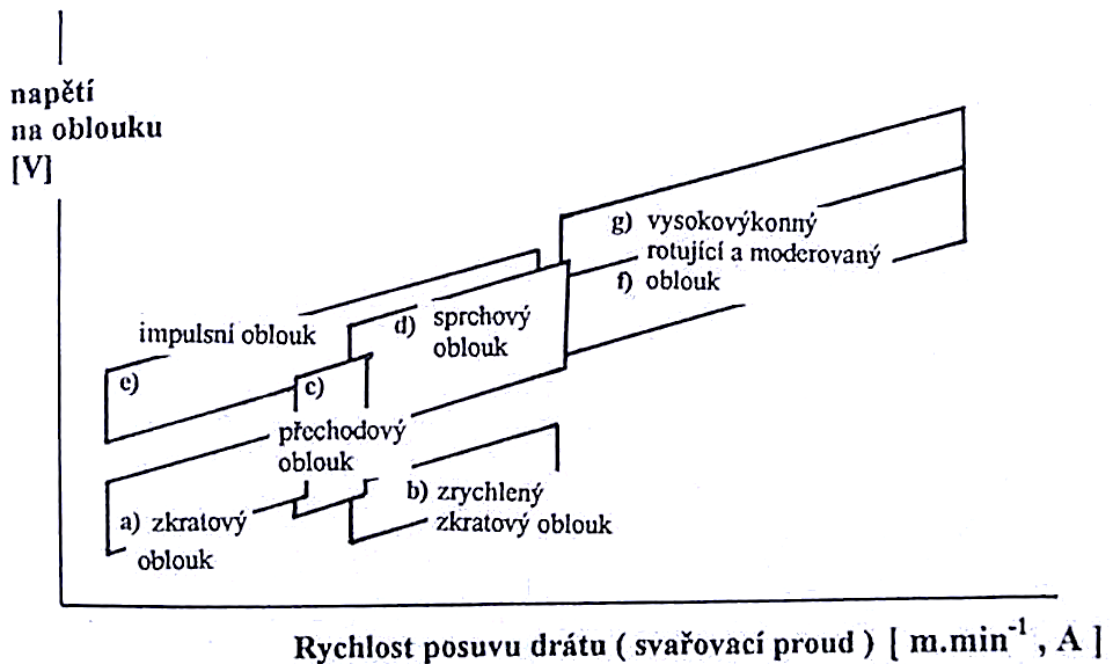
Obr. 9: Schématické znázornění volné délky drátu [2]

2.6 Způsob přenosu kovu v oblouku

Způsob přenosu kovu v oblouku patří mezi základní charakteristiky metody svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou a závisí především na svařovacích parametrech tj. proudu a napětí. Významně však jeho charakter ovlivňuje složení ochranného plynu, druh přídavného materiálu a technika svařování. [1]

Přenos kovu v oblouku můžeme rozdělit na jednotlivé typy, které jsou znázorněné na obr. 10:

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



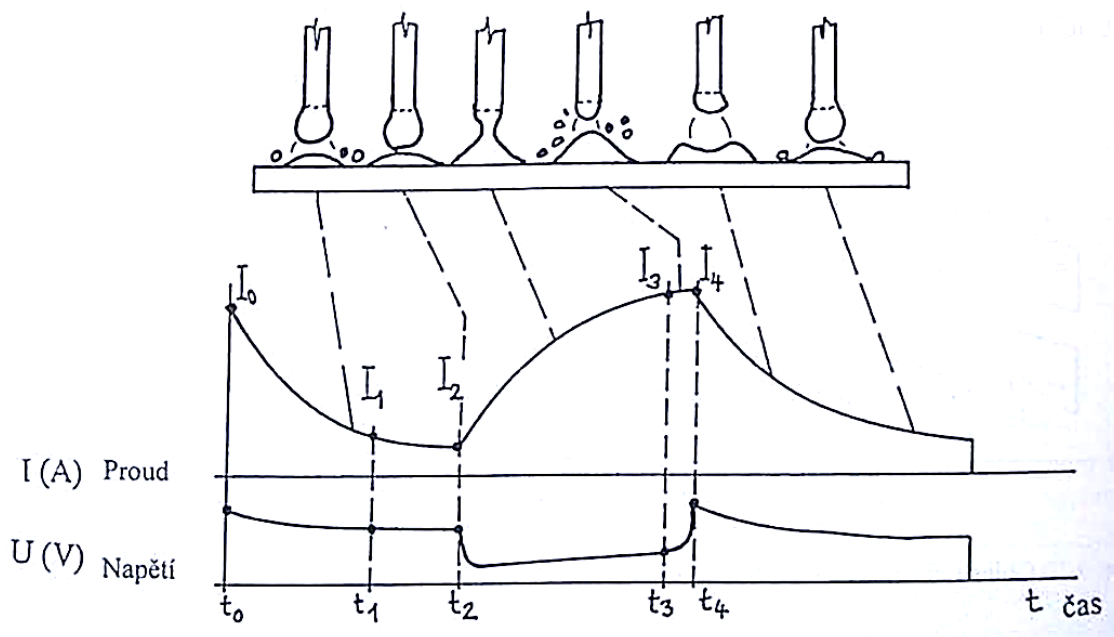
Obr. 10: Oblasti přenosu kovu v oblouku [1]

a) Krátký oblouk se zkratovým přenosem

Zkratový přenos se uplatňuje v rozsahu svařovacího proudu od 60 do 180 A a napětí 14 – 22 V. Výkon navaření při těchto parametrech se pohybuje v rozmezí 1 – 3 $\text{kg}\cdot\text{hod}^{-1}$. Při zkratovém způsobu přenosu dochází k přerušování oblouku zkratem, při kterém se odděluje část kovu elektrody.

Bylo prokázáno, že při nízkých proudech a vysokém napětí 25 – 30 V je frekvence kapek malá a rozstřík kovu velký. Pro drát 1,2 mm je frekvence kolem 5 kapek za sekundu při napětí cca 27 V. Se snižujícím se napětím roste počet zkratů na 150 až 200 za sec. při 14 – 18 V.

Tento proces souvisí se zkracující se délkou oblouku, kdy se vlivem posunu přiblíží drát do zkratu s tavnou lázní dříve, a tím se zamezí růstu kapky kovu. Vlivem povrchového napětí taveniny se kapka kovu rovnoměrně rozptýlí ve svarové lázni. [1] Na obr. 11 je znázorněn průběh napětí a proudu při zkratovém cyklu.



Obr. 11: Průběh napětí a proudu při zkratovém přenosu [1]

V bodě t_0 dochází při proudu I_0 k zapálení oblouku. Při poklesu proudu na hodnotu I_1 je ohřívána svarová lázeň působením tepla oblouku. V bodě I_2 se drát dotkne povrchu svarové lázně a vlivem krátkého spojení začne proud exponenciálně stoupat. Napětí přitom klesne na minimální hodnotu. V intervalu $t_2 - t_4$ je drát ohříván odporovým teplem, které přispívá k snadnému oddělení kapky v intervalu I_3 a I_4 při špičkovém proudu cca 250 – 300 A. Oddělení kapky při vysoké intenzitě proudu je hlavní příčinou rozstříkání kovu při zkratovém přenosu. Pravidelným zhasínáním elektrického oblouku se vnáší do svaru menší množství tepla, což snižuje tepelně deformační účinek svařování. [1]

Zkratový přenos se využívá především v oblasti svařování tenkých plechů, kořenových vrstev tupých svarů, překlenutí širších mezer a pro svařování vysokolegovaných ocelí.

b) Krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem

Zkratový zrychlený přenos se vyznačuje neobvyklými parametry. Napětí odpovídá konvenčnímu zkratovému přenosu tj. 14 – 25 V, ale proud a rychlost podávání se pohybuje v oblasti sprchového přenosu, tj. nad 200 A. Tento přenos se označuje jako proces RAPID ARC. Výkon navaření je vyšší a jeho hodnota 3 – 10 kg.hod⁻¹ odpovídá rozsahu sprchového přenosu. [1]

Při vlastním procesu je drát vysokou podávací rychlostí tlačěn do svarové lázně pod relativně velkým úhlem sklonu hořáku. Vysoká frekvence zkratů neumožňuje dostatečně dlouhou dobu na tvorbu velké kapky jako u konvenčního zkratového způsobu. Odporovým teplem při dlouhém výletu drátu (25 až 30 mm) a vysokém proudu je konec elektrody dostatečně přehřátý a působením elektromagnetických sil oddělený ve svarové lázni. [1]

Vzhledem k velké vzdálenosti plynové trysky od materiálu a velkému sklonu hořáku je nutné zvýšit průtok plynu na 20 až 30 l.min⁻¹.

Tento typ přenosu kovu umožňuje svařovat s vysokým výkonem navaření i vysokou rychlostí svařování tenké plechy od 1 mm, kořeny svarů i polohové svary. [1]

c) Přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty

Tento typ přenosu vzniká při průměrných hodnotách oblouku. Napětí se pohybuje v rozmezí 22 až 28 V a proud od 190 do 300 A. [1]

Při přenosu se konec elektrody, vlivem vysokého proudu, nataví do velké kapky. Reakčním tlakem par se kapka vydouvá mimo osu drátu a oblouk putuje po roztaveném konci elektrody, až magnetické síly přeruší můstek. Kapka je vymrštěna do svarové lázně vysokou rychlostí, ale s malou frekvencí 5 – 40 kapek za sekundu. [1]

Přechodový oblouk se projevuje výrazněji v CO₂ (velké povrchové napětí) a způsobuje velký rozstřík vznikající při občasných nepravidelných zkratech a vymrštění kapky mimo osu. Lze jej využít pro svařování středních tloušťek, ale z důvodu hrubé svarové housenky a výraznému rozstříku se nedoporučuje používat. [1]

d) Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem

Sprchový přenos je typický pro hodnoty svařovacího proudu od 200 do 500 A a napětí 28 až 40 V. Tento typ přenosu se dá realizovat ve směsích plynů Ar s CO₂, případně O₂ nebo čistém Ar u svařování neželezných kovů. Vzhledem k vysokým hodnotám povrchového napětí v CO₂, nelze tento přenos realizovat, protože nelze získat dostatečně drobné kapky. U směsných ochranných plynů bohatých na Ar, lze sprchového přenosu dosáhnout u směsí s minimálním obsahem 80% Ar. Díky snadné ionizaci plynu obklopuje plazma i konec tavicí se elektrody a tím se urychluje ohřev drátu, který tvoří ostrý hrot.

Tomu přispívá i předeřev drátu vlivem odporového tepla při dlouhém výletu drátu (15 x průměr drátu). [1]

Sprchový přenos je charakteristický velkou hloubkou závaru, který roste s hodnotou proudu, klidným hořením oblouku a vysokým výkonem navaření $3 - 12 \text{ kg.hod}^{-1}$ (až čtyřikrát vyšší než u zkratového přenosu).

Využití sprchového přenosu je pro výplňové housenky svarů středních a velkých tlouštěk. Velikost tavné lázně dovoluje pouze svařování ve vodorovné poloze a omezeně v polohách. [1]

e) Impulzní bezzkratový přenos

Svařování impulsním proudem je zvláštní formou bezzkratového přenosu kovu. Parametry svařování impulsním proudem překrývají oblast zkratového i sprchového přenosu. Impulsní přenos kovu obloukem je řízen elektronickou cestou, má pravidelný cyklus daný frekvencí amplitudy impulsního proudu. Základní proud je nízký od 20 do 50 A a jeho funkce je udržení ionizace sloupce oblouku a tím i vedení proudu. Impulsní proud, který se nastavuje, je tvarově i časově řízený a v konečné fázi jeho amplitudy je zajištěno odtavování kapky přídavného materiálu. V celém průběhu amplitudy impulsního proudu intenzivně hoří oblouk, který ohřívá svarovou lázeň i samotný přídavný materiál.

Závislostí frekvence impulsů na proudu se udržuje velikost kapky na téměř konstantní úrovni. Pro nízký svařovací proud musí být i frekvence impulsů nízká, tak aby kapka kovu dosáhla optimální velikosti. Naopak vysoký svařovací proud nutně vyžaduje vysokou frekvenci impulsů. Frekvence impulsů se obecně pohybuje mezi 25 – 500 Hz, výjimečně 1 kHz.

Optimální plyn pro svařování uhlíkových ocelí je směs Ar s 8% CO₂, pro nerezavějící oceli Ar + 2% O₂ a pro svařování hliníku se používá čistý argon. [1]

f) Moderovaný bezzkratový přenos

Výrazným zvýšením napětí i proudu se pracovní oblast hoření oblouku posune do oblasti velmi vysokých výkonů svařování. Moderovaný bezzkratový přenos bývá označován jako RAPID MELT, probíhá při vysokých proudech 450 až 750 A, při napětí v rozmezí 40 až 50 V. Vysokým parametrům svařování odpovídá i vysoká rychlost

posuvu drátu, která se pohybuje od 20 do 45 m.min⁻¹ a zvýšení výkonu odtavení až na 25 kg.hod⁻¹. Doporučená ochranná atmosféra je tvořena směsí argonu a 8% oxidu uhličitého při průtoku plynu v rozmezí 18 – 25 l.min⁻¹.

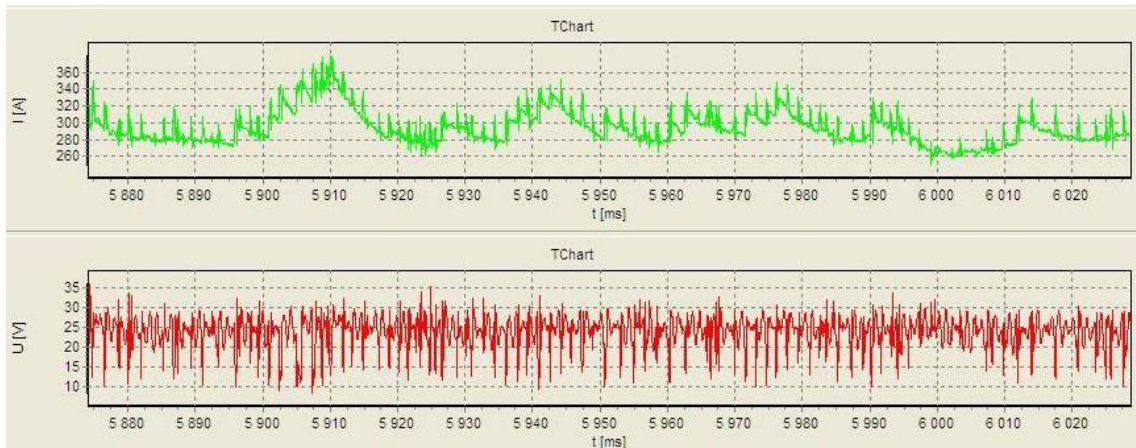
Vlastní přenos je tvořen relativně rozměrnými kapkami kovu (velikost přibližně odpovídá průměru drátu), které jsou odtavovány s vysokou frekvencí z dlouhého volného konce elektrody. Kapky jsou vysokou rychlostí urychlovány do tavné lázně, která je plazmou oblouku i dopadem kapek tvarována do hlubokého a úzkého závaru. Díky vysokým parametrům svařování může být vysoká i rychlost svařování při velké tloušťce svařovaného materiálu. [1]

g) Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu

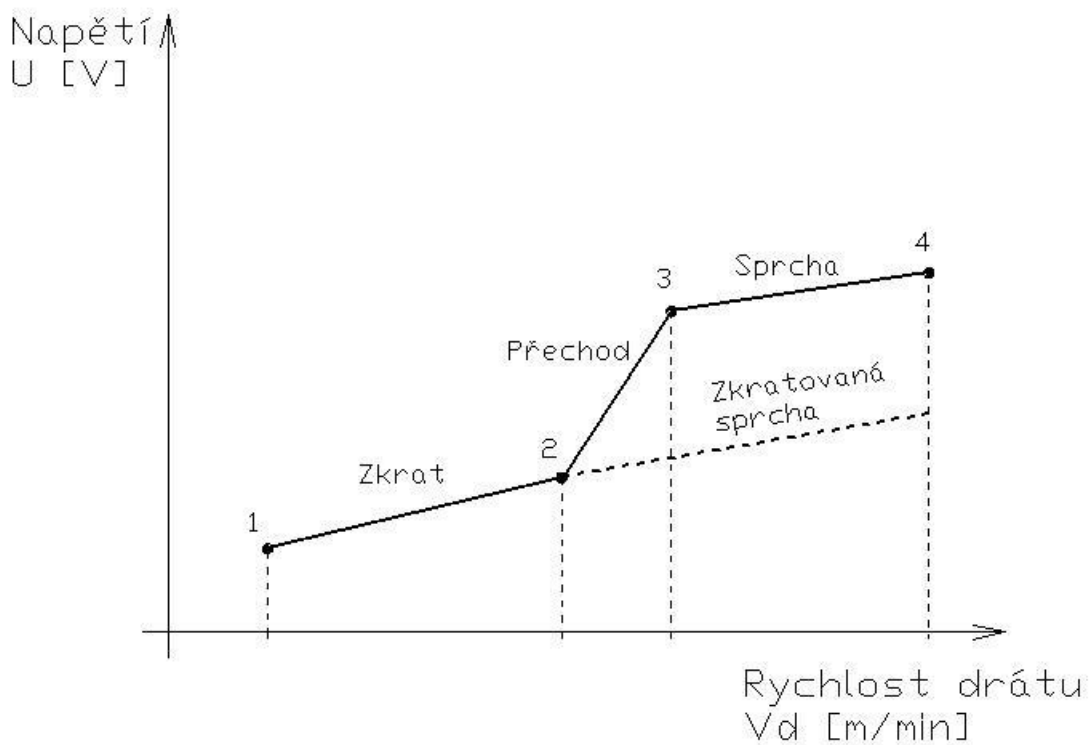
Svařovací parametry jsou téměř stejné jako u moderovaného přenosu. Liší se ve zvýšeném napětí na oblouku až na 65 V a větší délce výletu drátu nad 20 mm. Vlivem vysoké hodnoty intenzity proudu a velké volné délce je drát odporovým teplem přehříván téměř na teplotu tavení. Intenzivním silovým magnetickým polem je konec drátu ve vysoce plastickém stavu roztáčen a odtavující kapky kovu vytváří kuželovou plochu. Rotující oblouk umožňuje velmi dobrý závar do boků svarové plochy a vytváří se hluboký a široký svar s výrazně miskovitým profilem. [1]

2.7 Hlubokozávarové svařování v režimu zkratované sprchy

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 obr. 12, 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. [9]



Obr. 12: Záznam svařování v režimu zkratované sprchy [9]



Obr. 13: Parametrická oblast zkratované sprchy [9]

2.8 Monitorizace svařovacích parametrů systémem WeldMonitor

WeldMonitor je systém pro monitorování a dokumentaci svařovacího procesu. Připojením snímačů proudu, napětí, rychlosti svařování, rychlosti podávání drátu se svařovacím zdrojem a za pomoci monitorovacího programu WeldMonitor můžeme průběžně monitorovat základní parametry procesu svařování v celém časovém rozsahu.

Záznamy svařovacích parametrů získáváme jak v podobě dat, které se dají dále vyhodnocovat, tak i v podobě grafické tj. v grafech naměřených veličin. Tento program umožňuje detailní sledování hlavních parametrů – proudu a napětí se vzorkovací frekvencí 25000 Hz.

WeldMonitor – hardware (obr. 14) se připojuje na libovolný svařovací zdroj bez ohledu na jeho typ, výrobce, počet. Zároveň se systém připojuje k řídicímu počítači PC. Základním modulem se monitoruje průběh svařovacího proudu a napětí (modul WM-UI). V reálném čase měří efektivní hodnoty těchto veličin a zároveň vypočítává důležitou veličinu, tzv. vnesené teplo. Umožňuje dynamický záznam průběhu svařovacího napětí a proudu, kdy jsou zaznamenány změny v napětí a proudu až do frekvenčního rozsahu 25000Hz, což je nezbytná podmínka pro spolehlivou diagnostiku zkratových, impulsních a sprchových svařovacích procesů. Tento systém je vysoce odolný proti průmyslovému rušení a umožňuje nasazení i při automatizovaném procesu svařování pro sériové sledování kvality svařovaných výrobků. Všechny snímané parametry jsou ověřeny v akreditované metrologické zkušebně ČR. [3]

Přehled jednotlivých snímačů:

- modul pro manuální ovládání programu;
- modul pro snímání proudu a napětí;
- snímač teploty materiálu;
- snímač rychlosti pojezdu;
- snímač průtoku plynu.

Přehled sledovaných veličin:

- čas svařování;
- rychlost svařování (průměrná);
- měrný tepelný příkon;
- spotřeba drátu;
- spotřeba ochranného plynu.



Obr. 14: WeldMonitor hardware [3]

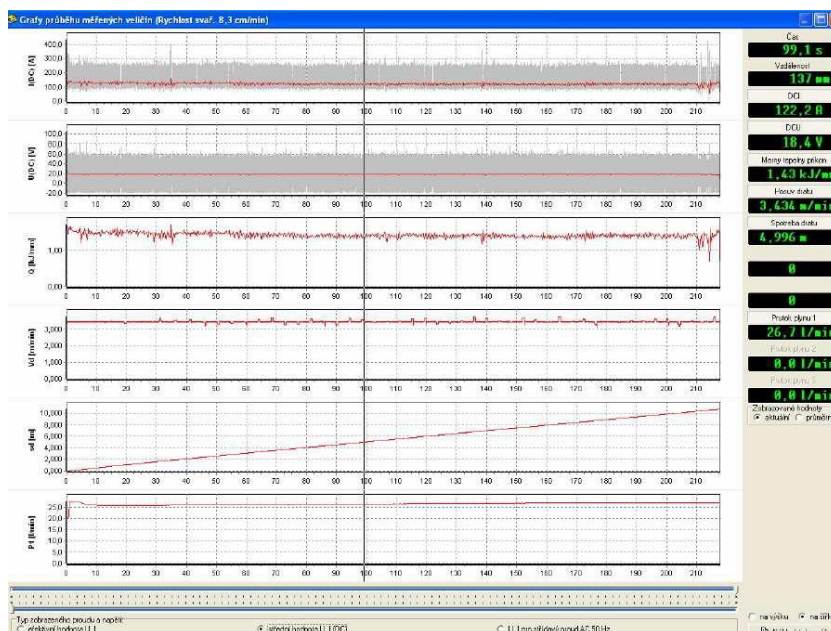
WeldMonitor - software je program, který má intuitivní ovládání a umožňuje profesionálně zobrazovat výsledky reálných nasnímaných dat. Dále program umožňuje tisk protokolů podle stávajících evropských a mezinárodních norem v oblasti svařování. Je zde zakomponována otevřená databáze firem, svářečů a jejich zkoušek, zařízení, základních a přídatných materiálů, plynů, dozorů svařování, postupů svařování a záznamy průběhu svařování jednotlivých svarů s možností uložení digitální fotografie [3].

Systém WeldMonitor 3.5 umožňuje monitorovat obloukové metody svařování. Systém monitoruje metody MIG, MAG a jim příbuzné metody. Zaznamenává správnost nastavených parametrů při svařování (tzv. pracovní bod v pracovním poli). Díky systému WeldMonitor a následným zkouškám svarů byla prokázána závislost proudu a napětí, která je popsána pracovním polem. To je oblast grafu (svislá osa napětí, vodorovná osa proud), kde by se měl pohybovat průsečík aktuálního svařovacího proudu a napětí

(pracovní bod) obr. 15. Pracovní pole je ovlivněno těmito faktory: základní materiál, ochranný plyn a průměr svařovacího drátu. Z toho plyne velké množství kombinací a zobrazení pracovních polí, které jsou v programu jednoduše popsány a jejich zvolení pro danou metodu svařování je snadné a zcela automatické. Pracovní pole je rozděleno podle svařovacího oblouku na oblast zkratového, přechodového, sprchového a impulsního oblouku. Na obr. 16 je znázorněn záznam svařovacího procesu s příslušnými měřeními veličinami (svařovací proud, svařovací napětí, vnesené teplo, rychlost podávání drátu). [3]

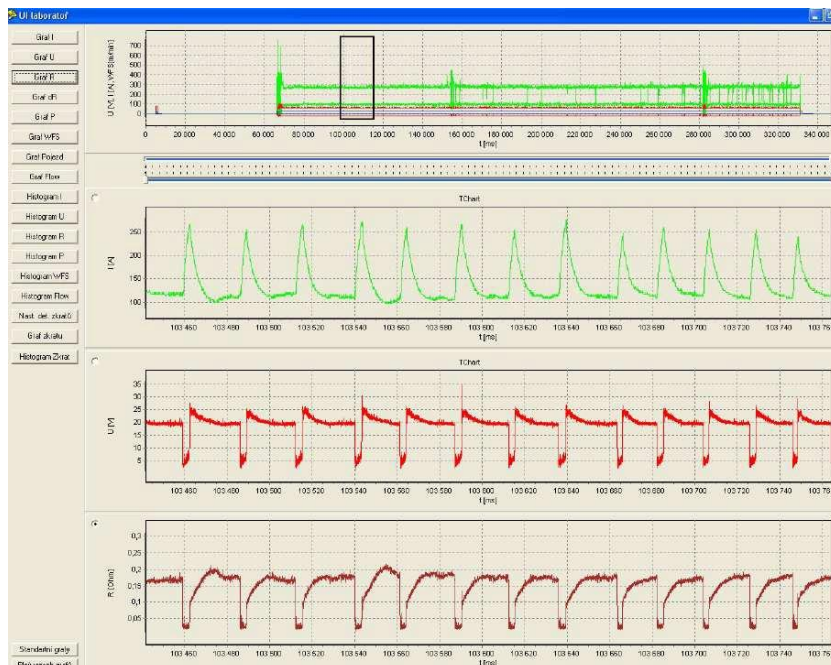


Obr. 15: Okno pracovního pole s pracovním bodem v systému WeldMonitor [3]



Obr. 16: Ukázka záznamu svařovacího procesu v systému WeldMonitor [3]

Pomocí nabídky programu-UI laboratoř obr. 17, můžeme podrobně sledovat v grafické podobě např. jednotlivé zkratky jejich četnost a pravidelnost, hodnoty proudu, napětí a mnoho dalších volitelných veličin (odpor, histogramy veličin atd.).



Obr. 17: Grafický záznam z UI laboratoře v programu WeldMonitor [3]

Můžeme použít funkci export naměřených dat, kdy se nám naměřená data převedou do formátu xls, které můžeme zpracovávat např. v softwaru Microsoft Excel.

2.9 Optimalizace procesu svařování

Při svařování MAG, působí řada vnějších faktorů a procesních proměnných, které doprovázejí každý technologický proces. Správná kombinace v omezeném rozsahu těchto proměnných veličin nám zaručuje optimální výsledek. S narůstajícím počtem proměnných veličin a podmínek se nám geometricky zvětšuje i prostor, který nám vymezuje optimální oblast nastavení. Je to dáno tím, že se zvětšujícím počtem kombinací a tím i experimentů oblast roste s každou další proměnnou vstupující do procesu.

Nejpoužívanější metody statického návrhu experimentu pro optimalizaci automatického obloukového svařování, které nám umožňují dosáhnout použitelných výsledků při minimálním počtu experimentů. Jednou z metod řešení optimalizace efektivity provedení koutového svaru je statická metoda středové kompozice, která se vyhodnocuje pomocí souboru provedených experimentů. [4]

Vymezení rámce podmínek a parametrů

První fází je uspořádání okrajových podmínek, vstupních a výstupních faktorů, které jsou součástí svařování MAG podle daného účelu optimalizace:

Vstupní podmínky, ze kterých vycházíme při řešení a nebudeme je v průběhu měnit. Např. poloha svařování, svařovaný materiál, způsob svařování.

Výchozí podmínky, z nichž v další fázi procesu, vybereme další procesní proměnné, které potom v dané fázi úkolů neměníme pro omezení počtu experimentu. Např. svařovací zdroj, podavač, délka bowdenu, hořák, druh drátu, průměr, povrchová úprava, složení ochranného plynu, tloušťka materiálu.

Procesní proměnné (vstupní) se dále pak dělí na nastavitelné: Např. rychlost drátu, napětí na prázdno, rychlost svařování, délka oblouku, úhel náklonu hořáku, vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem svařovaného materiálu, někdy také průtočné množství plynu, sklon statické charakteristiky zdroje a jen měřitelné-proud, pracovní napětí.

Šumové faktory mohou to být některé, už z uvedených podmínek, jejichž vliv není znám, ale při experimentech musíme umět určit, jejich možný rozsah a posoudit možný dopad na výstupní hodnoty – např. rozměrová a tvarová přesnost sestavení, seřízení dráhy hořáku (vyosení), mezera.

Výstupní měřitelné hodnoty (odezva) – jsou to většinou geometrické rozměry svaru: šířka svaru, hloubka závaru, převýšení, tloušťka svaru (nosná velikost), plocha průřezu návaru a celého svaru, atd.

Vstupní a výstupní výpočtové hodnoty, vyjadřující kombinaci působení hlavních parametrů a většinou jsou optimalizovanými hodnotami:

vstupní: **výpočtová plocha návaru** je dána vztahem (3)

$$P = \pi \cdot r^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{v_d}{v_s} \quad (3)$$

průřezová plocha drátu x koeficient propalu drátu (dle výrobce 0,97) x koeficient rozstřiku (0,99) x poměr rychlosti drátu k rychlosti svařování.

jednotkové vnesené teplo je dáno následujícím vztahem (4)

$$Q = k \cdot \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad (4)$$

tedy násobek proudu a napětí dělený rychlostí svařování x účinnost oblouku (MAG $\eta=0,84$) x převodní koeficient k (0,06 pro v_s [cm/min.])

výstupní: % zředění $D = (P_s - P)/P_s$ (5)

a efektivita provedení E

Restrikční kvalitativní ukazatel většinou se mohou týkat struktury i geometrie a vycházejí z příslušných norem. Např. převýšení, pravidelnost housenky, poměr šířky svaru k výšce, zápaly po stranách.

Hlavní a nejdůležitějšími parametry jsou (měřitelné) proud I a napětí U (nastavitelné-rychlost drátu a délka oblouku). Jejich kombinace má významný podíl na vytváření oblasti stability hoření oblouku a tím má i zásadní vliv na přítomnost a druh přenosu kovu při svařování MAG. Další vstupující základní veličinou je rychlost svařování v_s [cm/min], která má hlavní vliv na jednotkové množství vneseného tepla do svaru a tím má vliv i na geometrii housenky. Další parametry doprovázející svařovací proces jsou již méně důležité, proto se dá jejich optimalizace provádět na začátku nebo až v další fázi experimentálního procesu. V některých experimentech se jako další veličina ještě vyskytuje vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem CTWD, která souvisí s koncentrací svařovacího oblouku její délka je omezena délkou oblouku a stabilitou procesu (hořáku, drátu, podavače, kvalitou zdroje). [4]

2.10 Plánování programu experimentů

Experimentální optimalizace procesu je s výhodou prováděna formou statisticky navrženého programu experimentů DOE. Nejpoužívanější postupy plánování experimentů, které jsou zpravidla aplikovány na optimalizaci obloukového svařování lze rozdělit na 3 kategorie: [3]

1. Statistické Taguchi-ho metody.
2. Metody DOE, založené na tzv. metodách odezvového povrchu (Surface Response Methods). Jednou z nejpoužívanějších metod je metoda středové kompozice.
3. Heuristické metody optimalizace parametrů, např. založené na tolerančních polích.

2.10.1 Taguchiho metoda

Jedna z nejpoužívanějších statistických metod v průmyslové praxi je zaměřena na vytvoření “robustního návrhu“ výběru a seřízení procesních faktorů založená na zhodnocení síly působení jednotlivých proměnných – tedy výběr faktorů a kombinaci jejich hladin, které vykazují největší odstup od šumu získané pomocí analýzy rozptylu. Její výjimečnost je zejména ve volbě ortogonálních polí, kde každý sloupcový vektor, reprezentující faktor nebo interakci je kolmý ke všem ostatním. V jednotlivých řadách jsou kombinace hladin faktorů pro každý experiment a počet řad (experimentů) je jen o jednu vyšší než počet použitelných proměnných, takže systém lineárních rovnic obsáhne maximální parametrický prostor při minimálním přeúčtení, což je hlavní nespornou výhodou této metody. Její vypovídací schopnost je omezena tím, že se jedná o lineární metodu prvního řádu a omezeným výběrem tabelovaných ortogonálních polí, z nichž většina počítá s mnoha parametry ve dvou hladinách, dále uvádí pouze 3 pole se třemi hladinami, 2 s čtyřmi a jen jedno s pěti hladinami, kromě několika smíšených polí. Z toho vyplývá, že tato metoda se výborně hodí pro základní orientaci v nepřehledném parametrickém prostoru, kde spolupůsobí pokud možno lineárně velké množství faktorů a dokáže vybrat kombinaci hladin těch nejdůležitějších. Při aplikaci na svařování MAG může sloužit pro hrubý výběr rámcových vstupních podmínek svařování a ostatních vstupních parametrů – např. výběr, zahrnující 2 až 3 druhy plynů, typů a průměrů drátů, tloušťek materiálu, mezery v kořeni, sklony charakteristiky, průtočné množství plynu atd. Snadno se může stát, že znehodnotíme soubor naprosto nevhodnými kombinacemi pro reálnou existenci procesu, což je jednou z hlavních nevýhod ortogonálního pole. Další je skutečnost, že regresní model 1. řádu se dvěma nebo třemi hladinami parametrů není dostačující k vyladění optimální kombinace parametrů. [3]

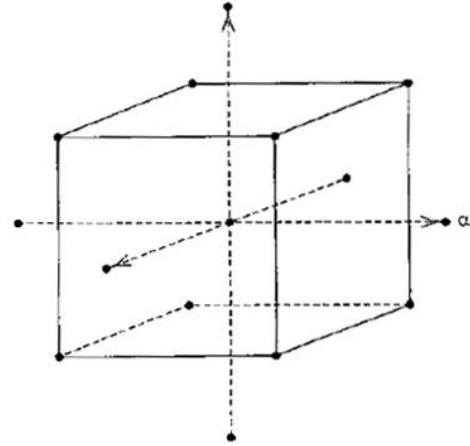
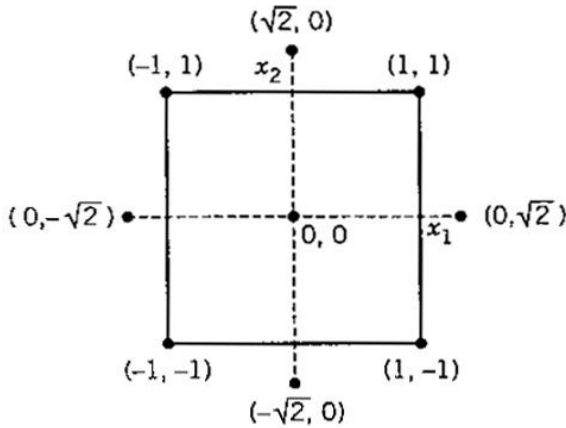
2.10.2 Metoda středové kompozice

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. k rovnic
3. Středových bodů (0,0) – doporučeno 3 až 7 rovnic

Body návrhu tak vymezi v parametrickém prostoru vícerozměrný sférický tvar (kruh pro 2 parametry, koule pro 3 parametry, atd. viz. obr 18 a 19), doplněné o několik středových bodů, poskytujících odhad rozptylu.



Obr. 18: Uspořádání hodnot parametrů pro 2 proměnné [3] Obr. 19: Uspořádání hodnot parametrů pro 3 proměnné [3]

Používá regresní rovnici druhého řádu, jejíž obecný tvar je dán vztahem (6):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6)$$

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.

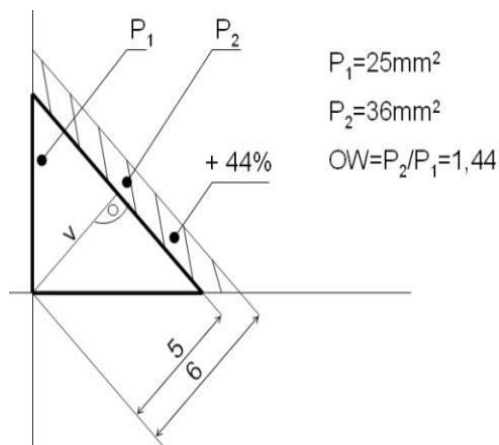
Předpokladem jejího použití je určitá znalost daného procesu, kdy dovedeme přibližně odhadnout působení jednotlivých faktorů na výstupní veličiny. Za tímto účelem nejprve provedeme tzv. screening, jehož výsledkem je vytipování oblasti blízko-optimálních podmínek, pro kterou pak s vymezeným souborem řídicích parametrů a jejich vymezeným rozsahem navrhne soubor experimentů podle středové kompozice. [3]

2.10.3 Heuristické metody

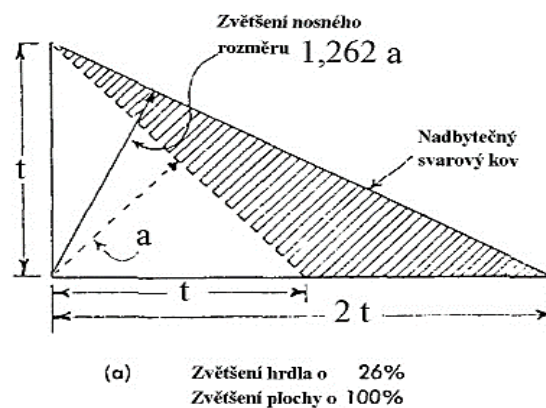
Byly vytvořeny pro řešení kombinačních optimalizačních problémů, příliš složitých pro řešení stávajícími statistickými metodami. Spočívají v návržení, testování a implementaci algoritmů. Některé jsou založeny na skutečných aplikacích, jiné jsou umělé, generované. Vhodně zvolený algoritmus umožňuje výzkumníkovi lépe porozumět zdrojům rozptylů a vlivu korelační struktury problému na průběh algoritmu.[3]

2.11 Technologičnost koutového svaru

U kolmých (T) spojů se téměř výhradně používá koutového svaru, který se tímto stává nejpoužívanějším typem svarového spoje. Koutový svar ale není konstrukčně ideálním řešením spoje dvou kolmých dílů. Počítá s neprůvarem v celé tloušťce plechu a na rozdíl od tupého svaru, zde není velikost svaru vymezena geometrií svarových ploch. Velikost koutového svaru u ruční aplikace svařování závisí jen na správné manipulaci s hořákem a často bývá předimenzována, aby se svar nemusel opravovat. Průřezová plocha svaru je kvadrátem výšky a^2 , takže např. rozdíl jediného milimetru mezi svarem nosné velikosti 5 a 6 mm (bez uvažování závaru), znamená zvýšení spotřeby přídavného materiálu přibližně o 44 %, bez započtení převýšení (obr. 20). Též nevhodné polohování, při kterém dochází ke stečení lázně neefektivně zvětší plochu svaru (obr. 21). [6]



Obr. 20: Overwelding [6]



Obr. 21: Nevhodný tvar koutového svaru [6]

Předimenzování svaru – tzv. “overwelding“ je u koutových svarů nejčastějším zdrojem možných úspor při výrobě svařenců.

Overwelding koutového svaru je poměr průřezové navařené plochy svaru ke čtverci navržené velikosti svaru. Tento problém je však u ručně prováděných svarů

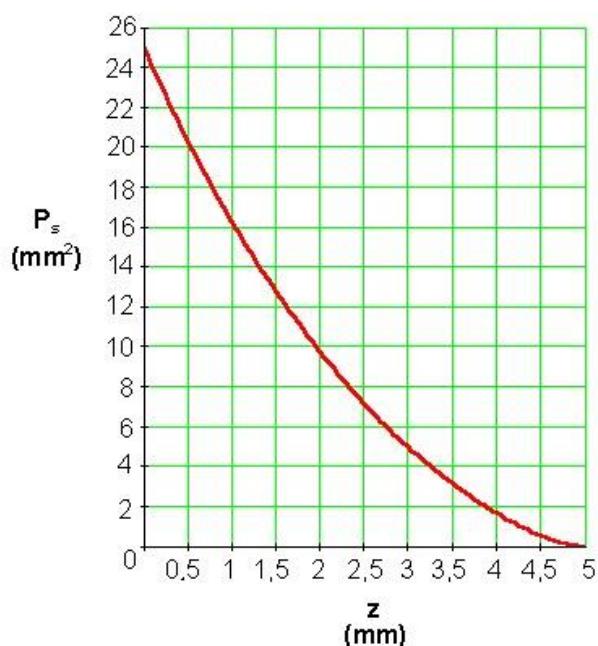
neřešitelný. Při automatizovaném svařování se naopak dá velikost svaru dimenzovat velmi přesně a navíc lze využít opačného efektu koutového svařování – snížení velikosti koutového návaru zvýšením nosné velikosti svaru o hloubku závaru. [6]

2.12 Metodiky

Na katedře KSP probíhá výzkum efektivity provedení koutového svaru metodou MAG již cca 10 let. Během této doby byly postupně odvozeny matematické modely výpočtu efektivního tvaru a rozměry svaru z geometrických parametrů skutečného svaru.

2.12.1 Metodika 1

Tato metodika je založena na tzv. řízené hloubce závaru, která je vyvozena z geometrie koutového svaru. Jako měřitelná hodnota je zde použita tzv. skutečná maximální hloubka závaru „z“, která je i součástí skutečné účinné výšky základního materiálu. Tato maximální hloubka závaru je klíčová pro výpočet tzv. efektivní účinné výšky svaru „ v_t “ pro danou plochu návaru P. Získaná hloubka závaru „z“ nám, ale určuje u plochy jen jednu velikost max. účinné výšky „ v_t “. Graf 1 nám ukazuje jak křivka závislosti $P=f(v_t, z)$ začíná plně výplňovým svarem s nulovým nebo min. závarem postupně roste a končí na plném závarovém svaru bez použití přídavného materiálu. [4]



Graf 1: Diagram $P = f(z)$ závaru pro konst. účinnou výšku v_t [4]

Při porovnávání svarů musíme brát tedy ohled na ideálně směřovaný závar i geometrii návaru. Při výpočtu je použita maximální hodnota závaru a to i v případě pokud není svar směřován do stykové plochy, ale naopak do pásnice. Svary, které nám směřují do stojny jsou při vyhodnocení vyřazeny, jelikož stojna má nižší koef. odvodu tepla. Návarová geometrie se nám také promítá v koeficientu efektivity návaru. Efektivita provedení u koutového svaru byla rozdělena na dvě hlavní určující veličiny a to efektivitu závaru $PE=z/v_t$ a efektivitu návaru, kterou lze také rozdělit do dvou variant dle jakosti zhotovení:

- a) První variantou je oddělení vlivu návaru od působení závaru vztahem (7)

$$DE = (v-z)/(v_t-z) \quad (7)$$

- b) Jako druhá varianta je použita jen korekce vlivu závaru vztahem (8)

$$DE = v/v_t \quad (8)$$

Pro výpočet výsledné hodnoty efektivity koutového svaru nám slouží konečný vztah (9):

$$FE = PE.DE \quad (9)$$

Takto získaná hodnota FE je charakteristickou pro každou optimalizovanou soustavu zdroj, drát, plyn, kde určuje parametrické pole, velikost svaru a efektivní plochu průřezu. Při provádění experimentu bylo zjištěno, že při použití vyhodnocovací metody a) má hlavní vliv převýšení a stečení svaru na konečnou efektivitu. Jako stupeň jakosti 1 jsou označeny svary, které mají malé převýšení a přechodové úhly přes 110° . Při použití metody b) jsou kritéria méně přísná a dovolují nám použít efektivní svary, které jsou převýšené až do přechodového úhlu 90° především u pásnice. Takto zhotovené svary, se vyznačují hlubším závarem, při pohledu jsou užší a mají i vyšší hodnotu efektivity. Tyto svary spadají do jakostního stupně 3. [4]

2.12.2 Metodika 2

Druhá metodika je založena na technologickém modelu, kde je zohledněno, že hloubka závaru i plocha návaru jsou závislé na velikosti proudu. To znamená, že pokud použijeme nižší rychlost drátu a proudu pro žádanou plochu návaru nebude dosaženo stejné hloubky závaru. Při přepočtu je požadována tedy konstantní plocha. V praxi to znamená, že ideální nosná výška je odvozena ze skutečné plochy ideálního tvaru a je vždy větší než skutečná výška. Do tohoto modelu je také zahrnuta nepřesnost vznikající

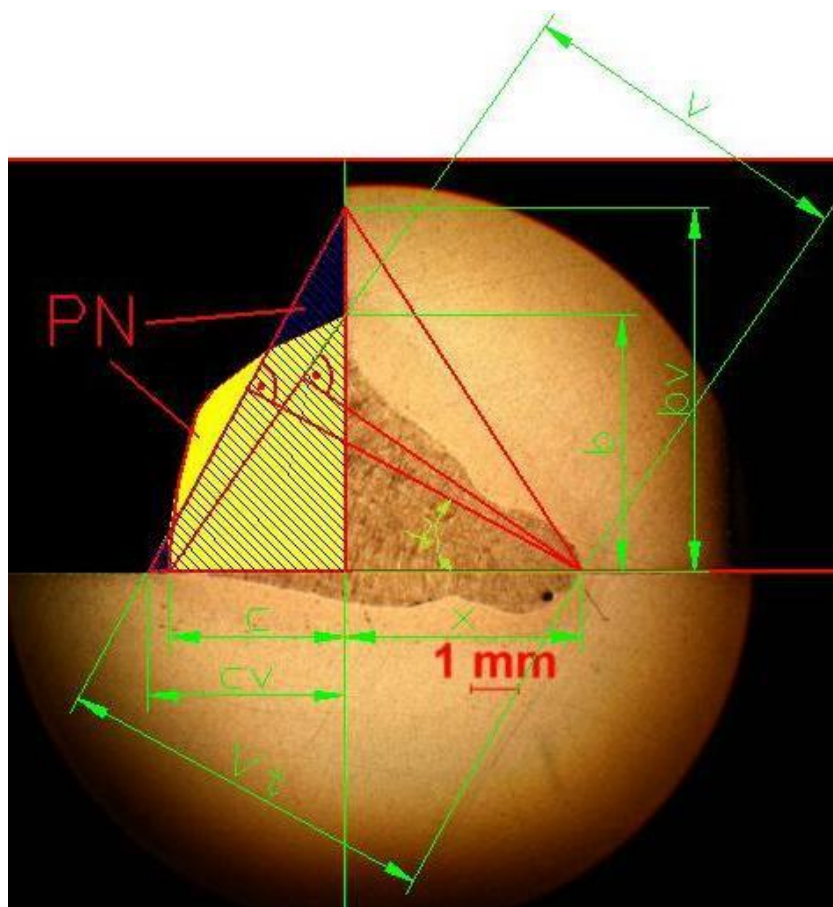
vyosením hořáku. Pro získání PE je zde tedy použit poměr skutečného osového závaru „x“ a ideální výšky „v_t“.

Přesný vzorec pro výpočet PE je tedy dán vztahem:

$$PE = x/v_t \quad (10)$$

Výpočet DE, zůstává stejný jako v předchozím případě tj. v/v_t (poměr skutečné výšky svaru k ideální výšce). V tomto vztahu jsou zahrnuty i ztráty vzniklé nerovností trojúhelníka a převýšením svaru. Tento algoritmus se od předchozího liší především v náročnějším výpočtu, který vede k řešení kvartické rovnice. Toto řešení tedy vychází z reálných technologických a konstrukčních podmínek. Díky tomu je získáno reálné zobrazení ideálního koutového svaru, který svou plochou a závarem odpovídá skutečnému, provedenému svaru, jehož rozměry lze spočítat a nakreslit. Nevýhodou této metodiky jsou vyšší nároky na přesnost provedení experimentu především pak na vyosení svařovacího hořáku. U svarů, kde max. závar jde spíše do pásnice, jak do mezery vznikají pak zkreslené výsledky. [4]

Na obr. 22 je znázorněná metodika 2 na svaru.



Obr. 22: Znázornění metodiky 2 na svaru [4]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem experimentální části práce bylo zjištění optimálních podmínek, tedy efektivity provedení koutové svaru metodou svařování MAG u drátu 1,4 mm. Prvním krokem bylo zjištění blízko – optimálních podmínek pomocí dvou statistických metod (DOE), nejprve metodou ortogonálních polí (Taguchi) pro přibližný odhad optimálních parametrů a dále metodou středové kompozice. Výpočtová hodnota efektivity provedení koutového svaru se vypočítala pomocí matematického algoritmu. Výsledkem aplikované metodiky na provedené a vyhodnocené metalografické vzorky koutových svarů bylo určení základních parametrů svařování pro dosažení maximální efektivity provedení koutového svaru.

3.1 Charakteristika zdroje použitého při experimentu

Při svařování experimentálních vzorků byly použity zapůjčené svařovací zdroje Omega 550 od firmy Migatronic a Speedtec 505SP od firmy Lincoln Electric.

Svařovací zdroj Omega 550

Zdroj Omega 550 (obr. 23) je určen pro dílenské i montážní průmyslové svařování. Umožňuje svařování technologií MIG/MAG, MMA a je vhodný i pro drážkování. Zdroj využívá tzv. invertorovou technologii, která má nesporné výhody oproti zdrojům založených na skokovém řízení. Tato technologie zaručuje rychlou odezvu a pružnost parametrů. Mezi další výhody patří snadná obsluha pomocí řídicího panelu Advanced, který umožňuje synergické i manuální svařování. Ovládací panel Advanced je vybaven více než 70 všestrannými synergickými svařovacími programy.

Podavač drátu MWF 27 je otočný, odnímatelný a je vybaven čtyřkladkovým systémem podávání drátu. Omega 550 je standardně vybavena možností změny polarity, která umožňuje použití trubičkových drátů innershield (tj. bez potřeby plynové ochrany), 2T/4T spínání. Stroj má vestavěný systém vodního chlazení, jenž udržuje dostatečně nízkou provozní teplotu hořáku.[7]

Tab. 2: Technická data svařovacího zdroje

Omega 550 [7]

ZDROJ PROUDU	OMEGA 550
Napájecí napětí +/- 15%, V	3 x 400
Pojistky, A	35
Zatěžovatel 100%/40°C, A/V	430/35,5
Zatěžovatel 60%/40°C, A/V	510/39,5
Zatěžovatel 100%/20°C, A/V	475
Zatěžovatel 60%/20°C, A/V	550
Napětí naprázdno, V	80
Proudový rozsah, A	10-550
Krytí	IP23
Rozměry (V x Š x D), mm	1400 x 510 x 1020
Norma	EN60974-1/5/10
Hmotnost, kg	85
PODAVAČ DRÁTU	MWF 27
Rychlost podávání drátu, m/min	0,5 - 27,0
Průměr cívky drátu, mm	300
Zatěžovatel 100%/40°C, A/%	430/100
Zatěžovatel max./40°C, A/%	550/50
Připojení hořáku	EURO
Krytí	IP 23
Norma	EN/IEC660974-1, EN/IEC660974-5, EN/IEC660974-10
Rozměry (V x Š x D), mm	470 x 210 x 690
Hmotnost, kg	13
CHLADÍČÍ MODUL	
Chladicí výkon (1 l/min), W	1100
Objem nádrže, l	3,5
Průtok, bar – °C – l/min	1,2 - 60 - 1,75
Max. tlak, bar	3
Norma	EN/IEC60974-2



Obr. 23: Svařovací zdroj
Omega 550 [7]

Svařovací zdroj Speedtec 505SP

Zdroj Speedtec 505 SP (obr. 24) od společnosti Lincoln Electric je multifunkční zařízení pro náročné průmyslové aplikace. Díky své modularitě, kompaktnímu designu a nízké hmotnosti je manipulace se zdrojem na pracovišti velice snadná a komfortní.

Použitím nejmodernější inverterové technologie s frekvencí invertoru 32 kHz je dosaženo přesného řízení oblouku, které je několikanásobně rychlejší než u konvenčních analogových zdrojů. Speedtec 505 SP je standardně vybaven čtyřkladkovým podavačem drátu Power Feed 44, řadou synergických programů, barevným TFT displayem, vnitřním osvětlení kladkového mechanismu, kolečka pro snadnou manipulaci, Hot start, Arc force, 2T/4T spínání, funkce bodování a vyplnění kráteru. [8]

Tab. 3: Technická data svařovacího zdroje Speedtec 505SP

ZDROJ PROUDU		SPEEDTEC 505SP
Napájecí napětí ± 10%, V		3 x 400
Proudový rozsah, A		20 - 500
Jištění, A		32
Hmotnost, kg		50
Rozměry (V x Š x D), mm		535 x 300 x 635
Krytí		IP23
PODAVAČ DRÁTU		POWER FEED 46
Počet kladek		4
Chlazení		vzduch/voda
Výstupní proud při dov. zat., V		40
Příkon při 60%, A		500
Připojení hořáku		EURO
Rychlost podávání drátu, m/min		1,0 - 22
Průměru drátu, mm	Plný	0,8 - 1,6
	Trubičkový	1,0 - 1,6
Průměr cívky drátu, mm		300
Hmotnost, kg		18,5
Rozměry (V x Š x D), mm		460 x 300 x 640



Obr. 24: Svařovací zdroj Speedtec 505SP [8]

3.2 Přídavný materiál

Jako přídavný materiál byl použit plný svařovací drát Supra Mig Φ 1,4 mm od firmy Lincoln Electric. Drát se používá pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí do pevnosti 590 MPa. 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.

3.3 Ochranný plyn

Při svařování vzorků byla použita ochranná atmosféra Ferromax Plus od firmy Airproducts. Ochranná atmosféra je určena pro svařování uhlíkových, uhlíko-manganových a nízkolegovaných konstrukčních ocelí metodou MAG. Je to tříložková směs argonu, helia a CO₂. Směs je v poměru 68% argonu, 20% helia a 12% CO₂. Směs zlepšuje kvalitu svaru, snižuje množství vad.

3.4 Příprava, zpracování a vyhodnocení vzorků

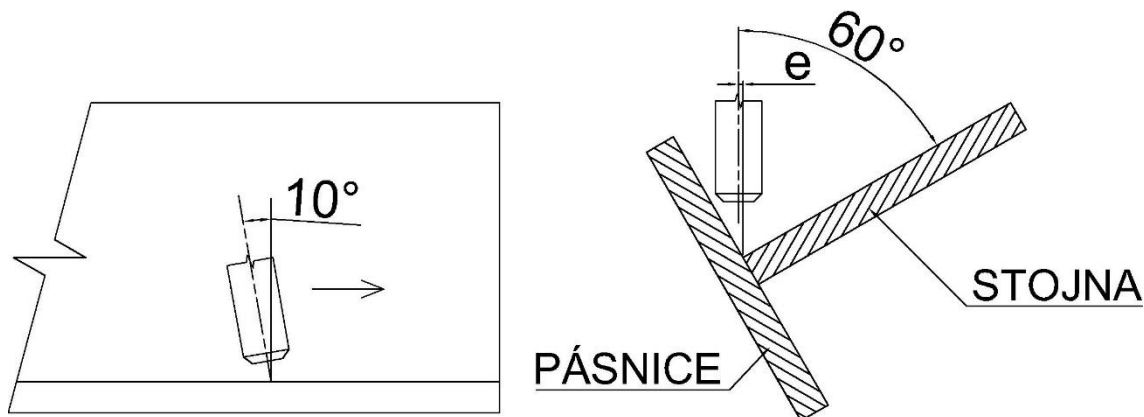
3.4.1 Příprava vzorků před svařováním

Experimenty byly realizovány pro koutové svary z plechů o rozměrech 150 x 100 x 10 mm. Experimenty u kterých dosahoval proud až 550 A byly provedeny na plechu tl. 16 mm. Plocha stojny, kde měl vzniknout koutový svar, byla opracována pomocí frézky a plocha pásnice byla očištěna pomocí ocelového kartáče. V dalším kroku bylo stehování pásnice a stojny v jeden svařenec. Stehování bylo provedeno metodou WIG na koncích materiálu, tak aby plechy svíraly úhel 90°. Po nastehování byly na vzorcích vyraženy raznicemi čísla vzorků.

3.4.2 Svařování vzorků

Svařování vzorků bylo provedeno na automatizovaném pracovišti, které se skládá z lineárního automatu s polohovacím přípravkem a ze staticky uloženého přípravku pro hořák. Přípravek slouží k zajištění požadované geometrické polohy mezi svařovaným materiálem a hořákem. Svařování vzorku probíhalo v polohovacím přípravku v poloze PA, s nastavením úhlu svarku na 60° a nastavení úhlu hořáku na 90° v rovině kolmé na

směr svařování obr. 25. Úhel nastavení náklonu hořáku v rovině rovnoběžné se směrem svařování je 10° a dále je vyosen o excentricitu e dle provedených předchozích experimentů.



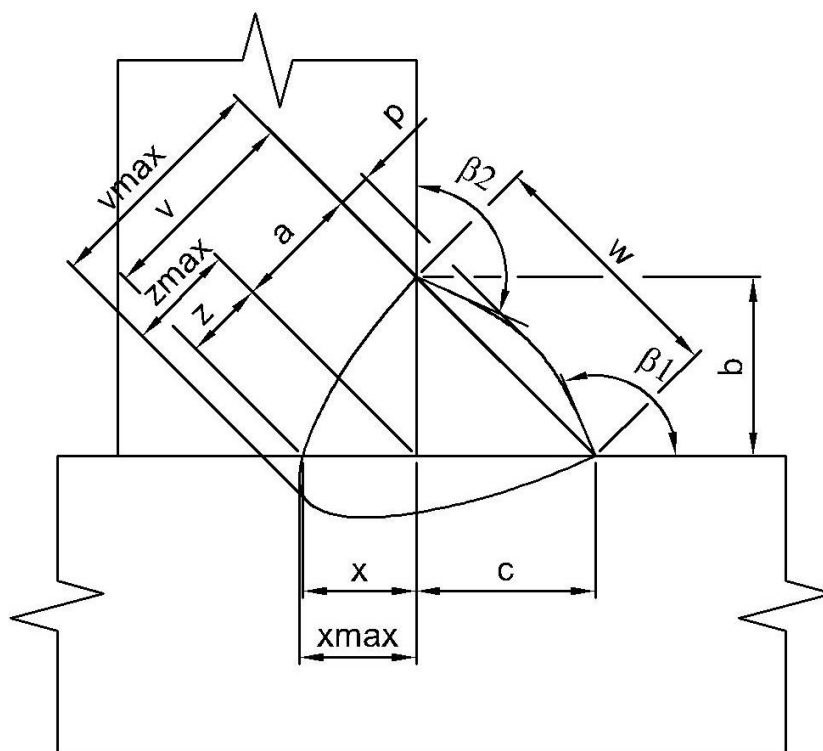
Obr. 25: Geometrie nastavení svařovacího hořáku (šipka označuje směr svařování)

Průběh svařování experimentů byl monitorován pomocí monitorovacího zařízení WeldMonitor, které měří hodnoty proudu, napětí, rychlosti podávání drátu, rychlosti svařování a množství průtočného plynu. Ukázka záznamu svařování systémem WeldMonitor je v příloze č. 2.

3.4.3 Vyhodnocení metalografických výbrusů

Po svaření následovalo podélné odřezání přebytečných plechů kyslíkem a poté příčné řezy na rozbrušovací pile DELTA Abrasimet Cutter od firmy Buehler. Takto nařezané vzorky byly zality do dentakrylu a po vytvrzení následovalo broušení na metalografické brusce. Po broušení následovalo leštění vzorků na leštícím kotouči. Po vyleštění vzorků následovalo jejich leptání 3% Nitalem, opláchnutí vodou a lihem.

Metalografické výbrusy nám poskytly údaje o tvaru a velikosti svaru v příčném řezu. Grafické zobrazení měřených hodnot na metalografickém výbrusu je na obr. 26.



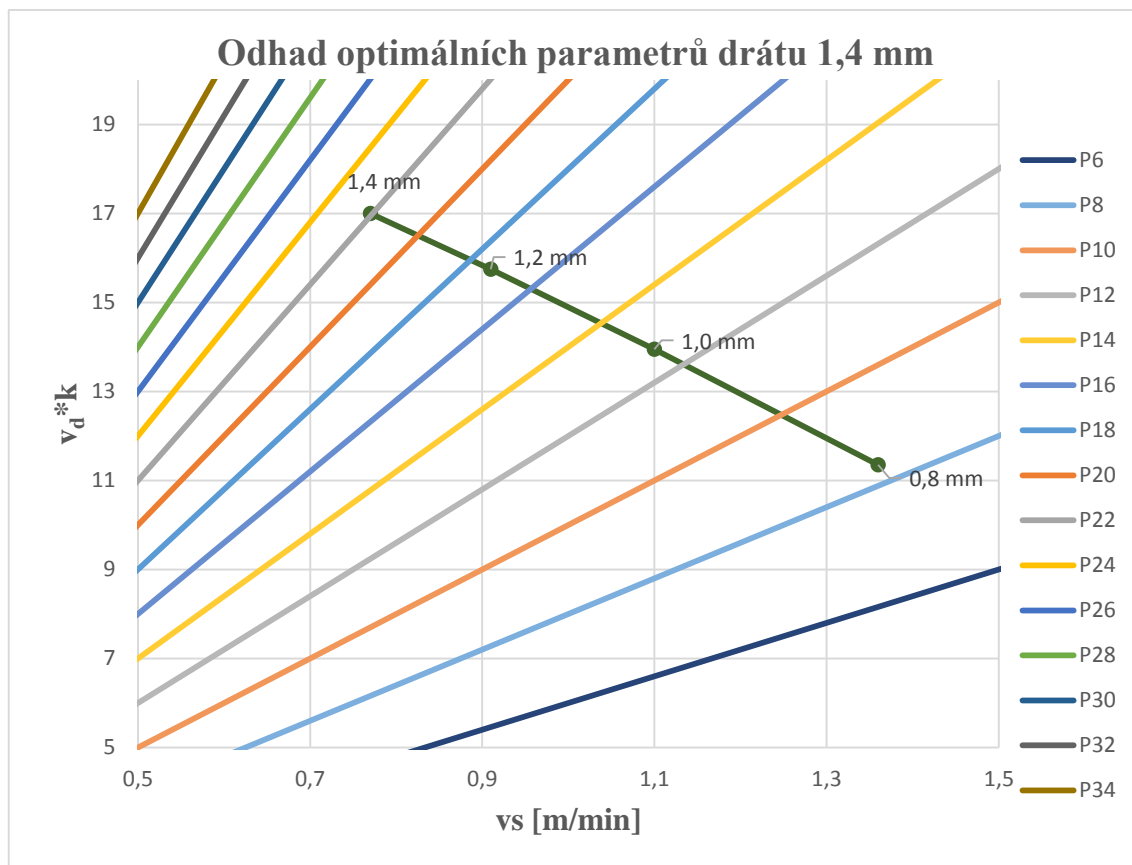
Obr. 26: Měření hodnoty koutového svaru

Snímky makrovýbrusů byly zhotoveny pomocí mikroskopu DSX 500 od firmy Olympus. Analýza měřených rozměrů byla provedena pomocí softwaru DSX – BSW. Všechny vzorky byly vyhodnoceny z hlediska kvality podle normy ČSN EN ISO 5817.

3.5 Návrh parametrů experimentu

Pro první orientaci optimální oblasti parametrů byla použita statistická Taguchiho metoda ortogonálních polí.

Byla zvolena ortogonální matice $L_9(3)^4$ pro 4 parametry ve 3 úrovních s celkem 9-ti experimenty. Přibližná oblast parametrů byla odhadnuta pomocí extrapolace (graf 2) ze známých výsledků optimalizace pro dráty průměru 0,8, 1,0 a 1,2 mm, které pro stejné složení ochranného plynu byly v minulosti provedeny [4,5]. Výstupním parametrem byla efektivita provedení koutového svaru FE, která byla vypočtena pomocí již v minulosti používaného programu.



Graf 2: Odhad optimálních parametrů

Extrapolací odhadnuté optimální parametry:

$v_d = 11$ m/min, $P = 22$ mm², $v_s = 0,74$ m/min, $U = 30,5$ V, CTWD = 16,5 mm

Tab. 4: Volba parametrů ve 3 úrovních

	1	2	3
v_d	9,5	11	12,5
P	20	22	24
U	29,5	30,5	31,5
CTWD	15,5	16,5	17,5

Tab. 5: Závislé parametry napětí U a výška špičky CTWD (plovoucí)

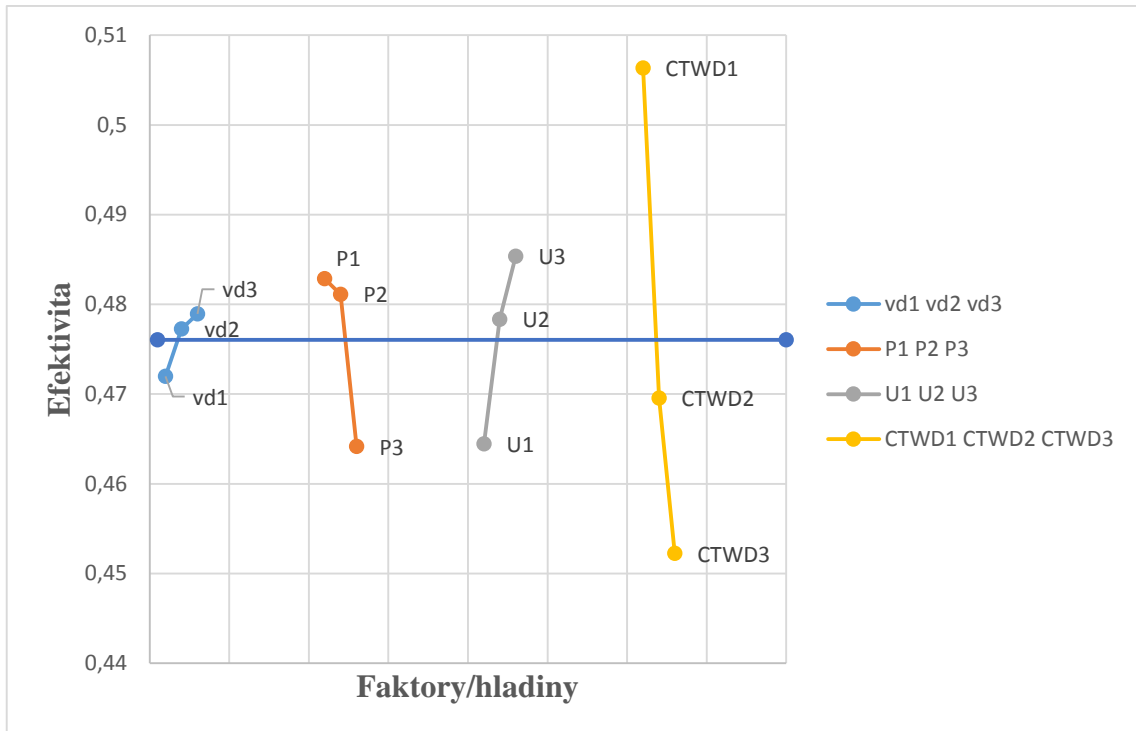
v_d				plovoucí		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
9,5	29,5	29,5	30,5	15,5	15,5	16,5
11	29,5	30,5	31,5	15,5	16,5	17,5
12,5	30,5	31,5	31,5	16,5	17,5	17,5

Tab. 6: Ortogonální matice $L_9(3)^4$

	v_d	P	U	CTWD		v_d	P	U	CTWD	FE
1	1	1	1	1		9,5	20	29,5	15,5	0,498
2	1	2	2	2		9,5	22	30,5	16,5	0,473
3	1	3	3	3		9,5	24	31,5	17,5	0,446
4	2	1	2	3		11,0	20	30,5	17,5	0,463
5	2	2	3	1		11,0	22	31,5	15,5	0,522
6	2	3	1	2		11,0	24	29,5	16,5	0,447
7	3	1	3	2		12,5	20	31,5	16,5	0,489
8	3	2	1	3		12,5	22	29,5	17,5	0,449
9	3	3	2	1		12,5	24	30,5	15,5	0,500

Tab. 7: Hodnoty aritmetických průměrů parametrů

Aritmetický průměr	FE	0,476
	v_{d1}	0,472
	v_{d2}	0,477
	v_{d3}	0,479
	P_1	0,483
	P_2	0,481
	P_3	0,464
	U1	0,464
	U2	0,478
	U3	0,485
	CTWD1	0,506
	CTWD2	0,470
	CTWD3	0,452



Graf 3: Vliv parametrů na efektivitu koutového svaru

Ukázalo se, že hlavní nezávislý parametr - rychlost drátu v_d byl zvolen v úzkém rozmezí a na efektivitu koutového svaru měl v tomto intervalu sice rostoucí, ale minimální vliv. U plochy návaru P je vliv prvních dvou hodnot shodný a u nejvyšší klesá. Oba závislé parametry, které byly pro svoji závislost na rychlosti drátu navrženy jako "plovoucí", měly výraznější vliv na výslednou hodnotu. Napětí rovnoměrně rostoucí vliv a zejména vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem CTWD měla vliv nejvýraznější a prudce klesající. Po důkladné analýze geometrie svarů s nejnižší vzdáleností špičky bylo rozhodnuto tento poznatek neakceptovat z důvodů zhoršené kvality, protože i když svary vykazovaly nejhlubší závar, byly úzké, převýšené se zápaly, s výskytem trhlin za tepla a tunelové porosity.

Po geometrické analýze bylo pro další kolo experimentů rozhodnuto posunout předpokládané optimum na vyšší hodnotu rychlosti drátu, nižší hodnotu rychlosti svařování, tím se nám ale posune plocha návaru do vyšších hodnot proti předpokladu, zvýšit napětí a proti předpokladu zvýšit i vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem.

Nový odhad optimálních parametrů:

$v_d = 13 \text{ m/min}$, $P = 26 \text{ mm}^2$, $v_s = 0,74 \text{ m/min}$, $U = 30,5 - 32,5 \text{ V}$, $CTWD = 18,5 - 19,5 \text{ mm}$

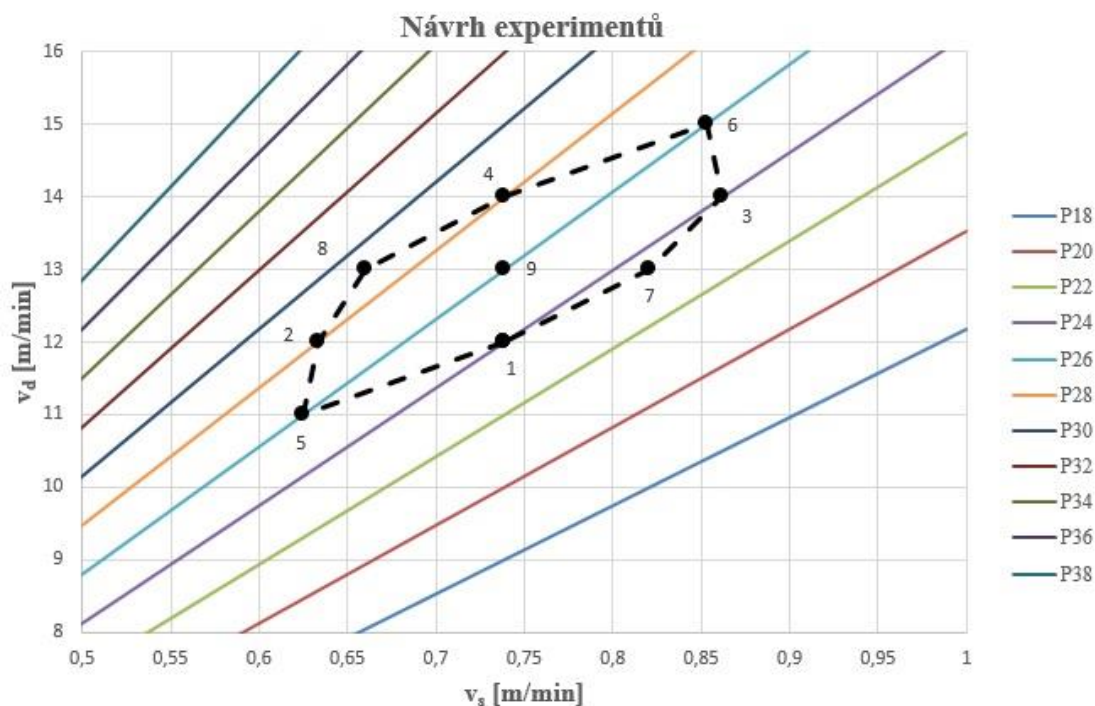
Pro optimalizaci byla zvolena statistická metoda středové kompozice pro 2 hlavní nezávislé parametry tak, jak se to již osvědčilo u předchozích prací [4,5]. Závislé parametry - napětí a vzdálenost špičky budou úměrně zvyšovány podle rychlosti drátu. V tab. 8 je vymezené parametrické pole 2 zvolených proměnných, rychlosti podávání drátu v_d a plocha návaru P. Pomocí tab. 8 byla vytvořena matice experimentů tab. 9.

Tab. 8: Zvolené parametry pro tvorbu matice experimentů

	$-\sqrt{2}$	-1	0	1	$\sqrt{2}$
v_d [m/min]	11	12	13	14	15
P [mm ²]	23,4	24	26	28	29,1

Tab. 9: Matice experimentů

Rozpis			Navržené		
VZ	v_d	P	v_d [m/min]	P [mm ²]	v_s [m/min]
1	-1	-1	12	24	0,74
2	-1	1	12	28	0,63
3	1	-1	14	24	0,86
4	1	1	14	28	0,74
5	$-\sqrt{2}$	0	11	26	0,63
6	$\sqrt{2}$	0	15	26	0,85
7	0	$-\sqrt{2}$	13	23,4	0,82
8	0	$\sqrt{2}$	13	29,1	0,66
9	0	0	13	26	0,74



Graf 4: Návrh experimentů

Graf 4 zobrazuje navržené experimentální pole metodou středové kompozice.

3.6 Optimalizace dle metodiky 1B

V další části experimentální práce byly zpracované hodnoty zjištěné při geometrické analýze svaru, aby mohla být vypočtena efektivita koutového svaru. Pro výpočet efektivity byla použita metodika 1 ve variantě b. Hlavním kritériem metodiky 1 je hloubka závaru v ose svaru.

Pro vyhodnocení a získání grafu optimalizace byl použit program Rgui. Pomocí již zmíněného programu jsme získali graf optimalizace, hodnoty efektivity a hodnoty teoretické výšky pro jednotlivé vzorky.

Při optimalizaci s použitím uvedeného souboru vzorků nebylo dosaženo potřebné úrovně pravděpodobnosti (0,95%) proto byl proveden další soubor experimentů, podél naznačeného optimálního pole - v rozsahu rychlostí drátu od 10,5 do 15 m/min. a v rozsahu rychlostí svařování 0,6 - 0,8 m/min. Zároveň byly vyzkoušeny varianty zbylých dvou parametrů - výšky špičky a napětí. Tím byl dotvořen celkový parametrický rozsah optimální efektivity provedení svaru a statistická pravděpodobnost výsledku se zvýšila na téměř 98%.

Výpis hodnot vypočtených koeficientů v programu Rgui včetně statistických údajů pro posouzení statistické významnosti:

Hodnoty získané z programu Rgui pro metodiku 1B:

Call:

lm(formula = Ef ~ x1 + x2 + x12 + x22 + x1x2)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0,08769	-0,02377	0,01003	0,02811	0,07008

Coefficients:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept) 0,550610 0,010995 50,078 <2e-16 ***

x1 0,025804 0,016703 1,545 0,1340

x2 -0,001779 0,017430 -0,102 0,9194

x12 -0,033631 0,016856 -1,995 0,0562 ,

x22 -0,032531 0,017187 -1,893 0,0692 ,

x1x2 0,049103 0,022190 2,213 0,0355 *

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 0,0401 on 27 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0,3678, Adjusted R-squared: 0,2507

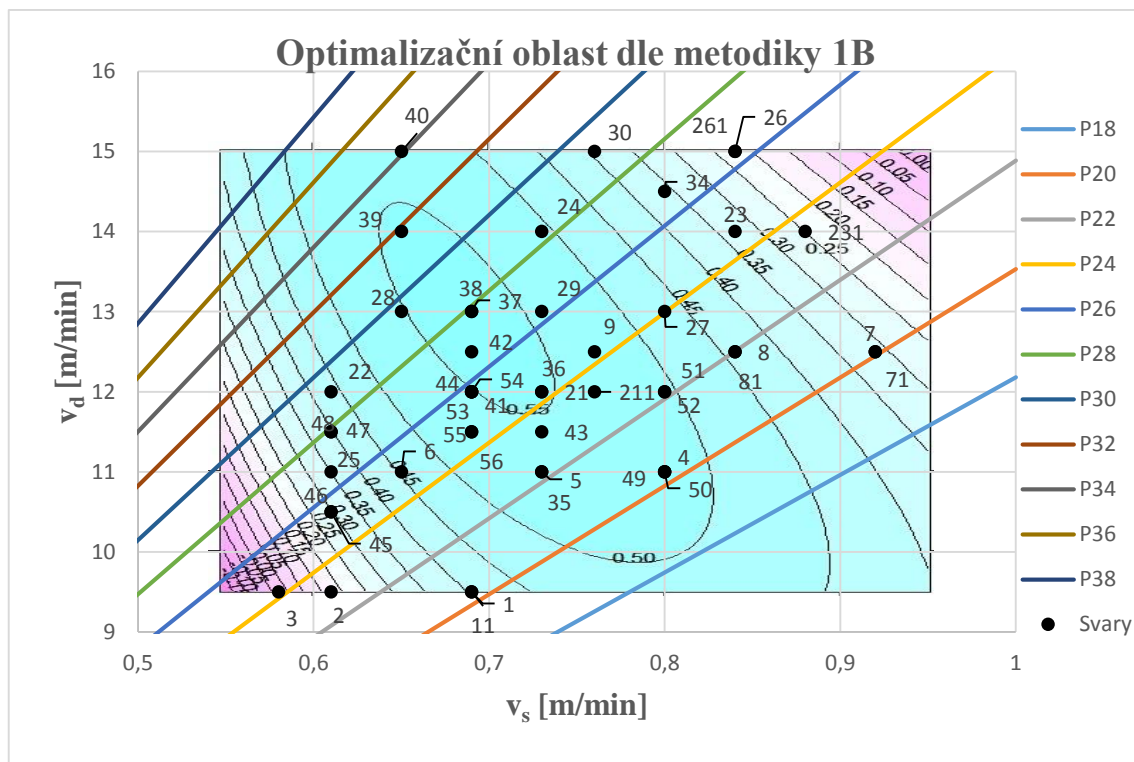
F-statistic: 3,141 on 5 and 27 DF, p-value: 0,02312

$E = 0,5506098 + 0,04910341 v_d * P_s$

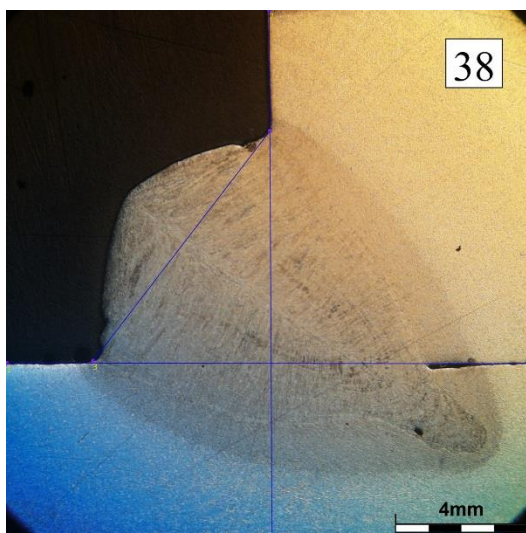
Optimální řešení:

$E = 0,5605396$ $v_d = 13,03853$

$P_s = 28,38381$ $v_s = 0,6789416$



Graf 5: Výsledný graf efektivity pro metodiku 1B



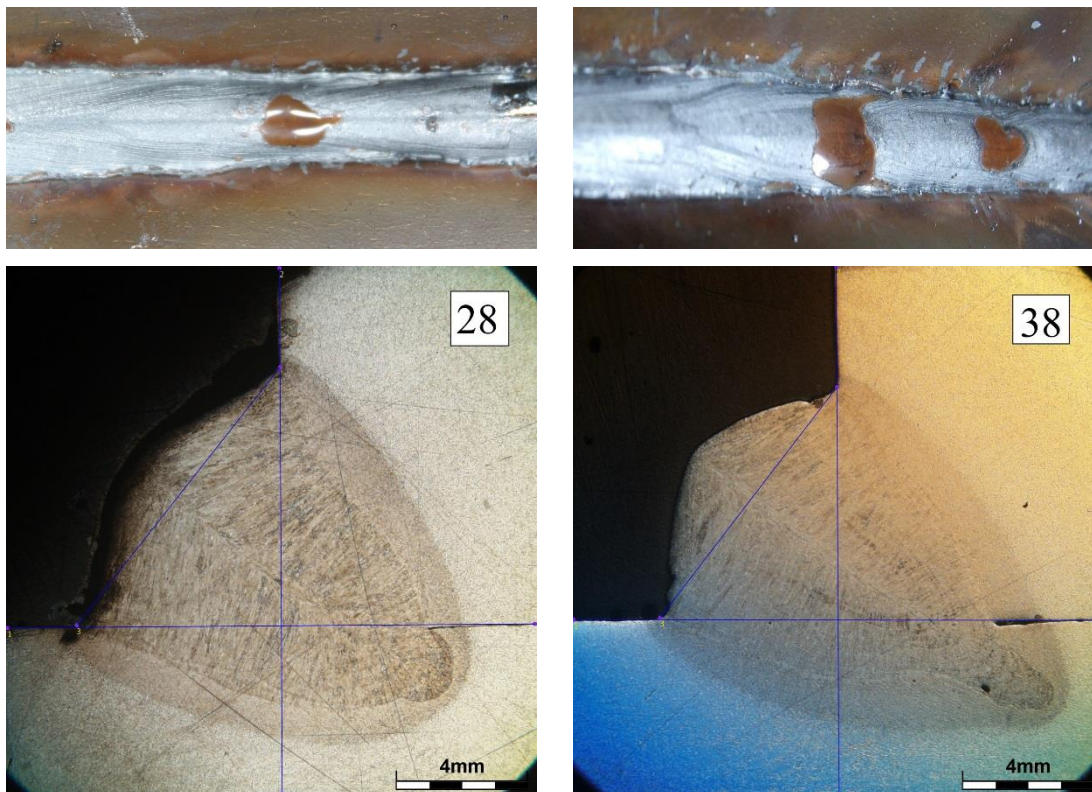
Obr. 27: Svar 38

Svar 38 je nejblíže optimu, má přijatelné převýšení do stupně kvality, ale se zúženým prstovým závarem v kořeni, který je zdrojem vad.

3.7 Zhodnocení výsledků

3.7.1 Posouzení vlivu hlavních parametrů - v_d a v_s na kvalitu svarů.

Kvalita svarů na úrovni max. efektivity $v_d = 13 \text{ m/min}$



Obr. 28: Svar 28

Obr. 29: Svar 38

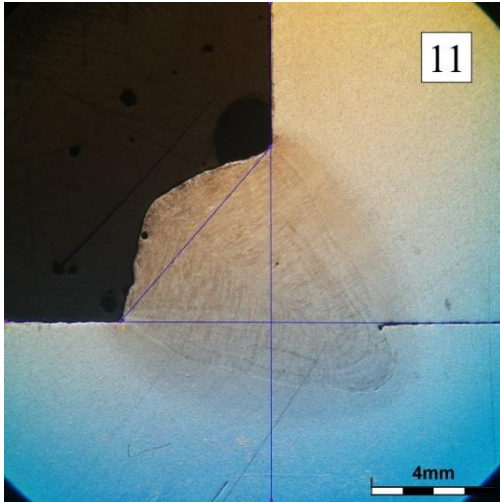
Zatímco svar 28 má přijatelný tvar a je na úrovni $FE = 0,5$ s osovým závarem max. $x = 5,6 \text{ mm}$ a max. nosnou výškou 10 mm , mírné zvýšení v_s u svaru 38 vede k vytvoření prstového závaru s rizikem tunelové porosity a trhliny za tepla. Vzrůst FE na $0,57$, při max. $x = 6,7$, což dává max. výšku $v = 11 \text{ mm}$ už je tak pro praxi nepoužitelný. Proud je těsně pod hranicí 500 A .

Z tohoto důvodů jsme provedli hodnocení kvality na všech použitých úrovních rychlosti drátu podle rychlosti svařování, napětí a vzdálenosti špičky.

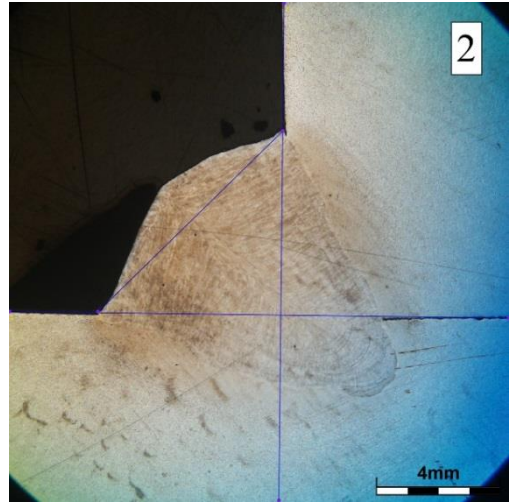
Tab. 10:

VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
28	0,65	32,3	19,0	29,6	5,6	10,1	1,6	0,50
38	0,69	33,1	19,2	27,8	6,7	11,1	2,2	0,57

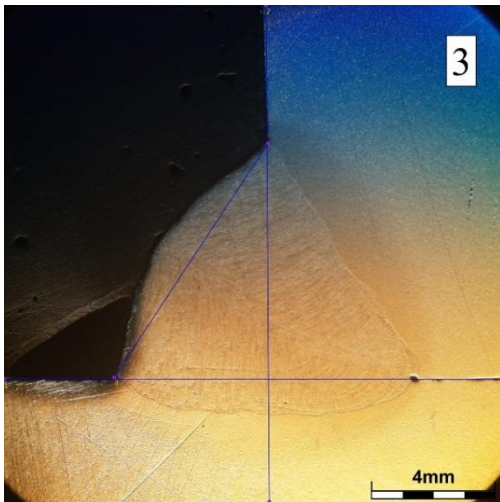
- $vd = 9,5 \text{ m/min}$



Obr. 30: Svar 11



Obr. 31: Svar 2



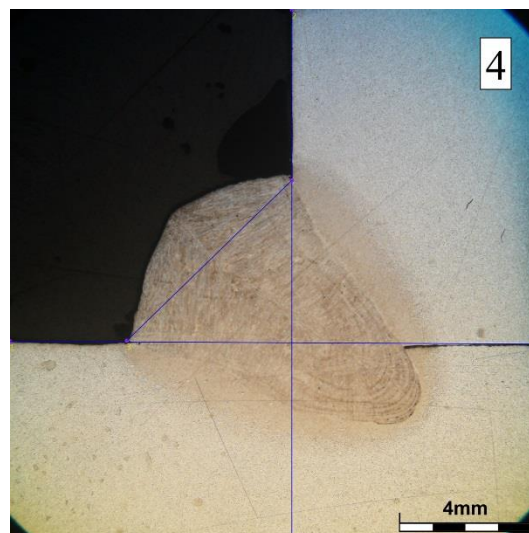
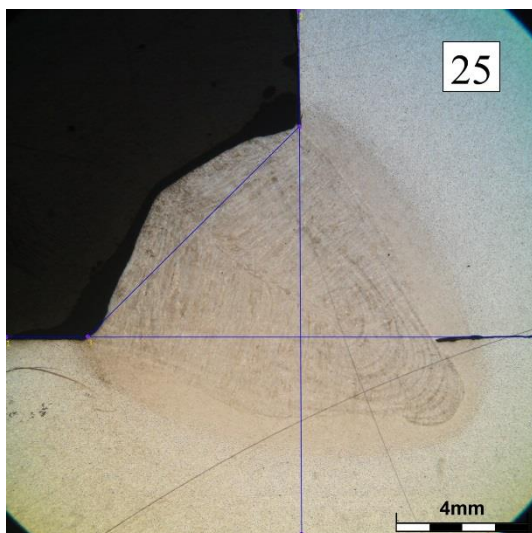
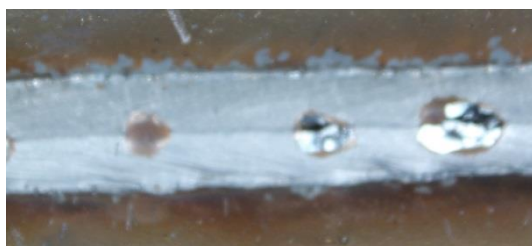
Obr. 32: Svar 3

Svary 2, 3 a 11 jsou bezvadné svary pěkného tvaru, závar 4 mm, výška 8 mm, pro praxi použitelné v rozsahu rychlostí svařování 0,6 - 0,7 m/min bez problému. Proud pod 400A. Vnesené teplo $Q = 8,5 - 10 \text{ kJ/cm}$.

Tab. 11

VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
2	0,61	30,6	17,3	23,0	3,8	8,5	1,5	0,47
3	0,58	31,0	18,2	24,2	4,9	8,3	1,2	0,45
11	0,69	30,5	17,3	20,3	4,0	7,9	1,7	0,47

- $v_d = 11 \text{ m/min}$



Obr. 33: Svar 25

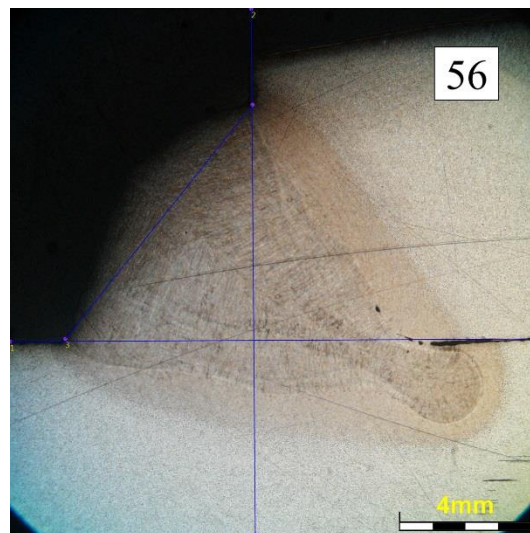
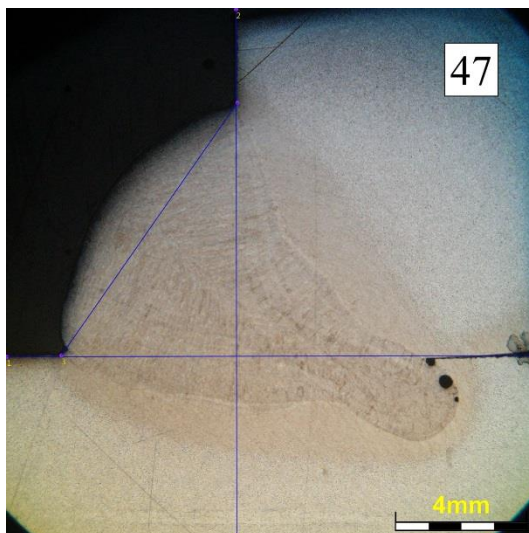
Obr. 34: Svar 4

Svary 25 a 4 jsou bezvadné svary pěkného tvaru, závar 4 - 5 mm, výška 8 - 10 mm, pro praxi použitelné v rozsahu rychlostí svařování 0,6 - 0,8 m/min bez problému. U některých svarů mírné zúžení kořene s náznakem defektu. Vnesené teplo $Q = 8,0 - 12 \text{ kJ/cm}$. Proud na úrovni 440 A.

Tab. 12

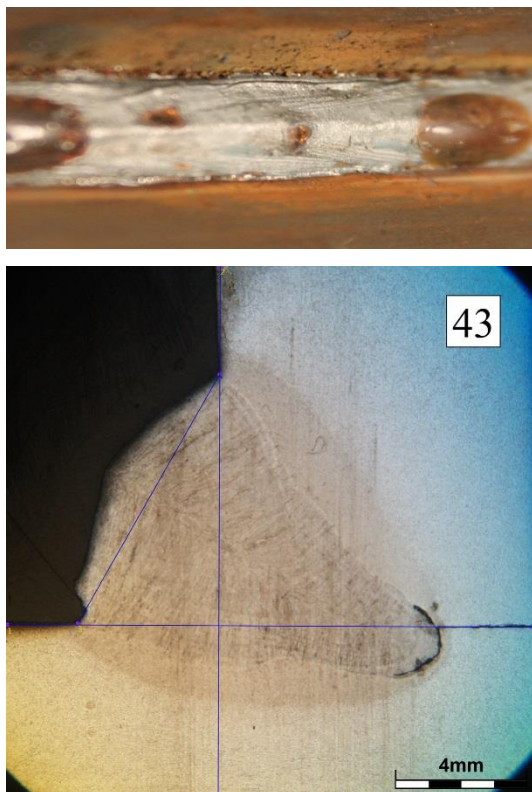
VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
4	0,80	30,0	18,9	20,3	3,8	7,8	1,7	0,46
25	0,61	32,5	19,0	26,7	5,1	9,8	1,5	0,51

- $vd = 11,5$ m/min



Obr. 35: Svar 47

Obr. 36: Svar 56



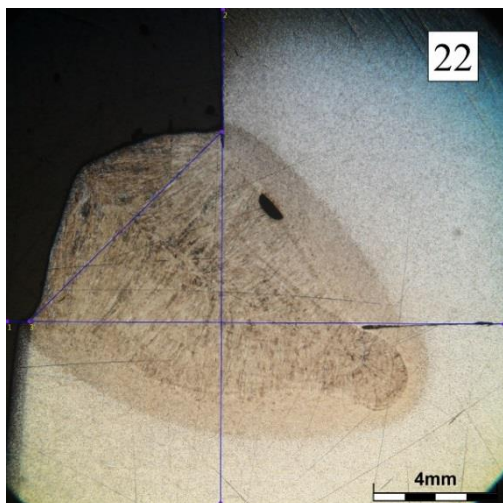
Obr. 37: Svar 43

Svary 47, 43 a 56 ještě přijatelného tvaru ale vady v kořeni - náznak tunelové porosity, závar až 7 mm, výška 10 - 11mm, v rozsahu rychlostí svařování 0,6 - 0,7 m/min. Vnesené teplo $Q = 10 - 12$ kJ/cm. Svar 56 má při započtení plného závaru jednu z max. hodnot efektivity provedení koutového svaru FE ale vzhledem k výrazně prstovému kořeni je pro praxi nepoužitelný.

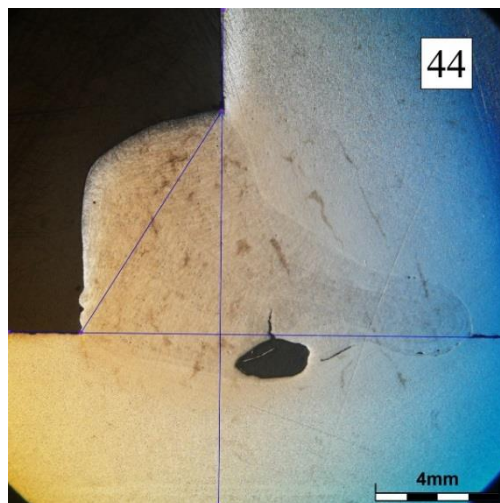
Tab. 13

VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
43	0,73	32,3	17,8	23,3	6,8	10,2	1,6	0,57
47	0,61	33,3	19,0	27,9	6,7	10,9	1,7	0,56
56	0,69	32,6	18,5	24,6	7,0	11,0	1,6	0,60

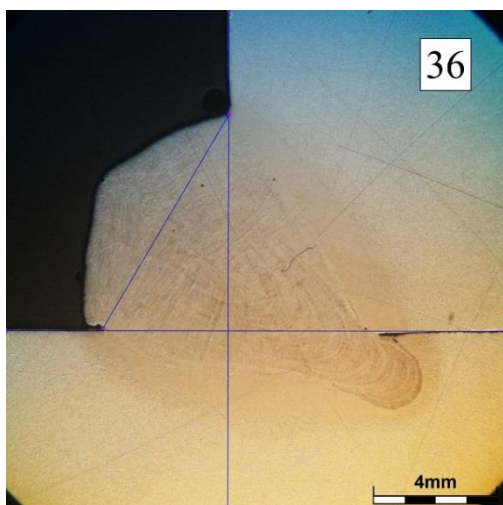
- $vd = 12 \text{ m/min}$



Obr. 38: Svar 22



Obr. 39: Svar 44



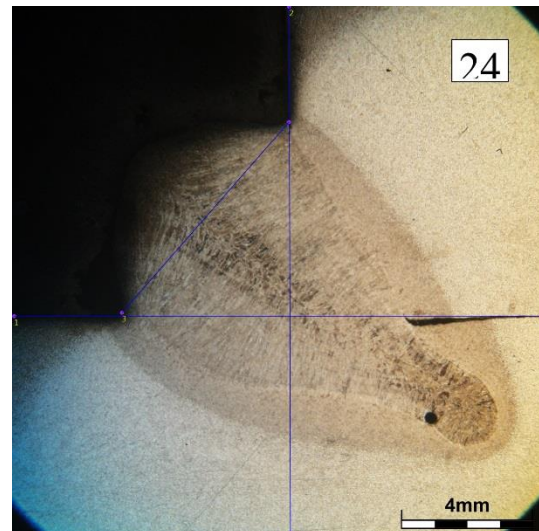
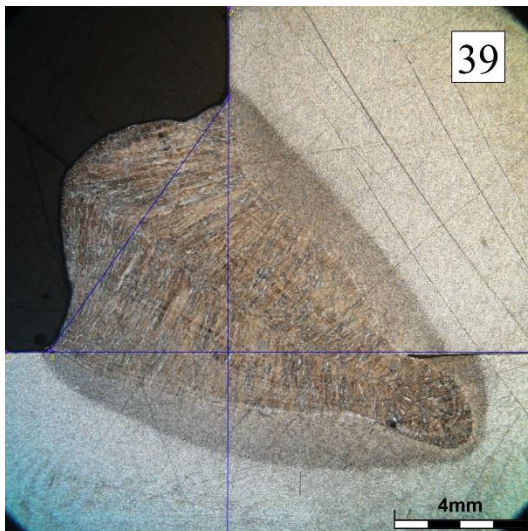
Obr. 40: Svar 36

Všechny svary už vykazují zúžení v kořeni a převýšení a většina i vady - tunelovou porositou i trhliny za tepla. Přijatelného tvaru závaru je možno ještě dosáhnout snížením rychlosti svařování a zvýšením napětí. Vnesené teplo 10 - 11,5 kJ/cm, závar 6 - 8 mm, výška až 11 mm.

Tab. 14

VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
22	0,61	30,7	19,0	29,1	6,1	10,5	2,3	0,53
36	0,73	32,2	19,0	24,3	6,5	10,4	2,1	0,57
44	0,69	32,0	17,8	25,7	8,2	10,9	2,6	0,58

- $vd = 14 \text{ m/min}$



Obr. 41: Svar 39

Obr. 42: Svar 24

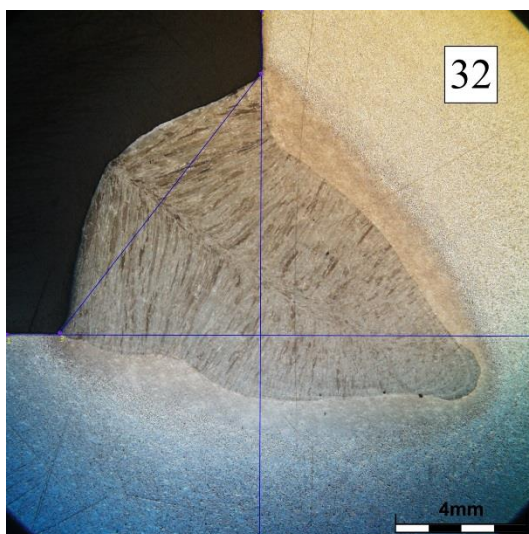
U svaru 39 je i přes výrazné převýšení přijatelný přechod. Prstový závar s výskytem vad se s nepatrným zvýšením rychlosti výrazně zhorší. Pro praxi je tento režim

vzhledem k výskytu vad už nepoužitelný a proud kolem 500 A je na hranici komerčně vyráběných zdrojů.

Tab. 15

VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
24	0,73	31,8	19,0	28,3	6,3	11,1	2,8	0,56
39	0,65	32,4	19,6	31,8	7,6	12,2	2,6	0,58

- $vd = 15 - 16$ m/min



Obr. 43: Svar 32



Obr. 44: Svar 33



Obr. 45: Svar 57

Již od $v_d = 12$ m/min svary vykazují rostoucí výskyt vad, převýšení a prstový závar, což omezuje oblast přijatelné geometrie svaru. Vzhledem k množství vneseného tepla a velikosti vzorku plechu tl. 10 mm se stále více objevovala na konci svaru porosita z přehřátí. Proto byly další experimenty s proudy až do 550 A provedeny na plechu tl. 16 mm. Výhoda tlustšího plechu je v lepším odvodu tepla, nevýhoda ve vyšší tuhosti a tedy intenzitě smršťujících sil, které způsobují trhliny za tepla.

Uvedené svary demonstrují vysokou náchylnost k výskytu vad na této úrovni intenzity procesu. Zatímco svar 32 má ještě přijatelnou geometrii, svar 33 s nepatrně vyššími hodnotami v_d a v_s je vypouklý s prstovým kořenem a zárodkem tunelové porosity a u svaru 57 s nepatrně vyšší hodnotou rychlosti svařování je ukázková trhlina za tepla.

Tab. 16

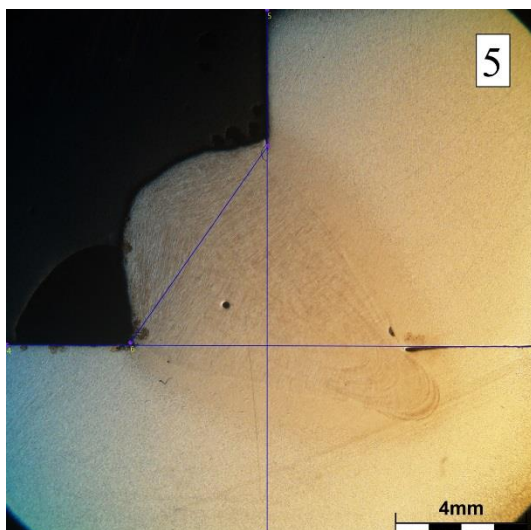
VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
32	0,69	33,5	19,3	33,2	6,7	11,1	2,0	0,52
33	0,73	33,0	19,3	32,4	8,9	12,2	3,1	0,57
57	0,73	33,2	19,2	31,0	7,9	11,0	2,8	0,53

3.7.2 Posouzení vlivu vedlejších parametrů napětí U a výšky kontaktní špičky CTWD na kvalitu svaru.

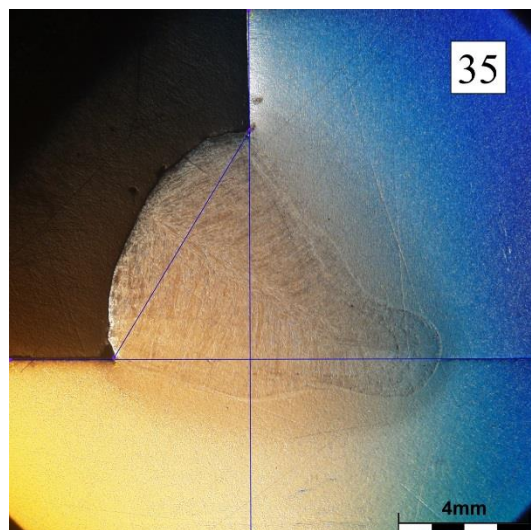
Vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem materiálu (výška špičky CTWD)

Jak již naznačily výsledky první (Taguchi) statistické metody, výška špičky nad povrchem má podstatný vliv na kvalitu svaru.

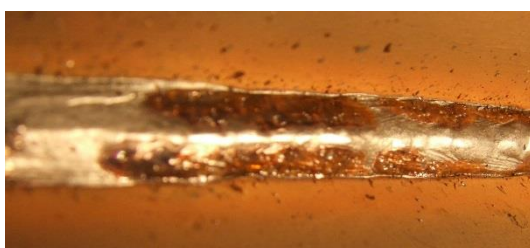
Již na úrovni $v_d = 11 \text{ m/min}$

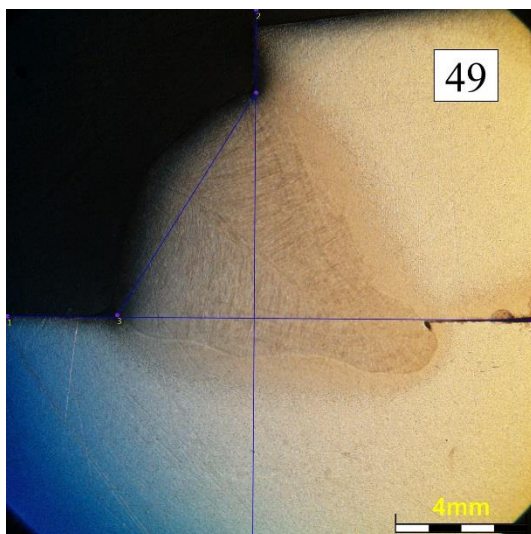


Obr. 46: Svar 5



Obr. 47: Svar 35





Obr. 48: Svar 49

Svary 5, 35 a 49 při stejných parametrech, CTWD 17,3, 18,5, 19 mm je patrný vliv výšky špičky na převýšení, tvar a hloubku závaru.

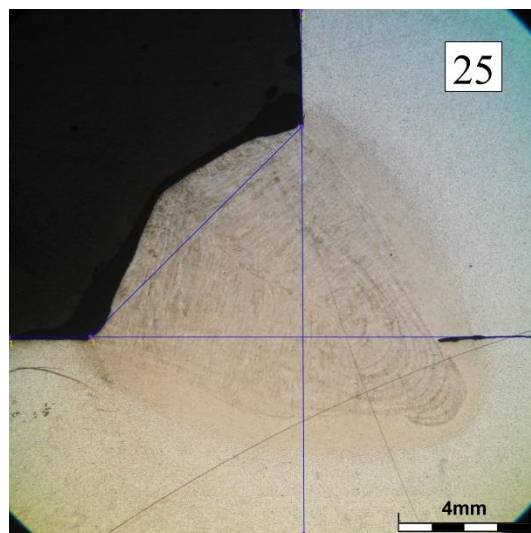
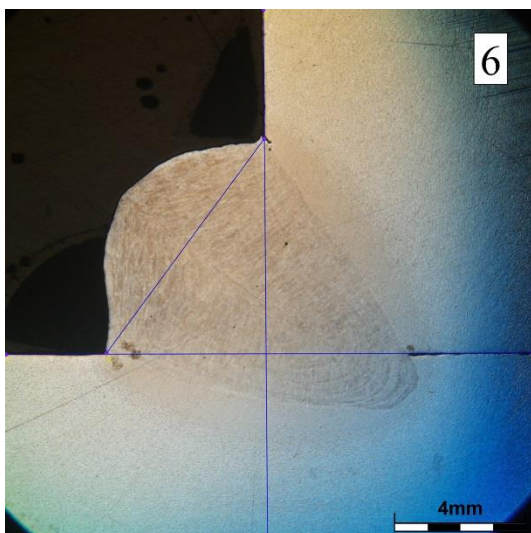
Tab. 17

VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
5	0,73	30,0	17,3	22,3	5,4	9,1	2,5	0,52
35	0,73	32,0	18,5	22,3	6,0	8,8	1,6	0,51
49	0,80	33,3	19,0	20,3	5,5	8,8	1,6	0,53

Napětí

Na stejné úrovni $v_d = 11$ m/min

Svary 6, 25, U 29,5 a 32,5



Obr. 49: Svar 6

Obr. 50: Svar 25

U svaru 25 je viditelné menší převýšení vlivem zvýšení napětí.

Tab. 18

VZ	v_s [m/min]	U [V]	CTWD [mm]	P [mm ²]	x_{max} [mm]	v_{max} [mm]	p [mm]	FE [-]
6	0,65	29,5	18,2	25,0	4,7	8,4	2,5	0,45
25	0,61	32,5	19,0	26,7	5,1	9,8	1,5	0,51

ZÁVĚR

V porovnání s optimálními parametrickými poli drátů 1 a 1,2 mm je u drátu pr. 1,4 mm patrné zúžení rozsahu rychlostí svařování, kde nad hodnotou 0,75 se téměř nevyskytuje kvalitní svar. Na rozdíl od tenčích drátů se u drátu 1,4 mm optimální efektivita provedení s rostoucím proudem obrací k nižší rychlosti svařování.

Rozsah rychlosti drátu a tedy i proudu je širší, ale je omezen výskytem vad již od hodnoty 12 m/min. Nicméně závisí to i na tloušťce materiálu a přesným nastavením ostatních hodnot, především výšky špičky a napětí, takže je proveditelný i přijatelný svar na úrovni $v_d = 15$ m/min. Napětí a výška špičky jsou parametry závislé na rychlosti drátu (proudu) a zejména výška špičky se musí doslova vyladit podle ostatních parametrů a geometrie hořáku. Drát 1,4 mm je v rozsahu zkratované sprchy (Příloha 2) použitelný pro plechy od min. tl. 10 mm bez problému cca do rychlosti drátu 11 m/min. a rychlosti svařování do 0,65 m/min při proudu do 450 A. Vyšší hodnoty rychlosti drátu a proudu jsou vhodné pro větší tloušťky plechu se zvyšujícím se rizikem vzniku vad. Příloha 1 uvádí celkový přehled provedených svarů včetně vstupních i výstupních parametrů, přehledně zpracovaný podle hlavních parametrů. Je zde patrná hranice tvarově přijatelných svarů a vliv parametrů na výskyt vad, který u tohoto drátu výrazně omezil použitelnost statistickou metodou zjištěného optimálního pole efektivy provedení svaru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 8085771810.
- [2] MORAVEC, J. *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*. Vyd. 1. Liberec: TU v Liberci, 2011. ISBN 9788073728052.
- [3] HRSTKA, D. *Monitorování svařovacích parametrů u metody svařování MAG jako prostředek zajištění kvality svaru*. Liberec, 2010. Disertační práce. TU v Liberci.
- [4] PEŠKA, R. *Vliv drátu na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu*. Liberec, 2011. Diplomová práce. TU v Liberci.
- [5] TOMÁŠEK, M. *Vliv ochranného plynu na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu*. Liberec, 2010. Diplomová práce. TU v Liberci.
- [6] HUDEC, Z. *Technologičnost návrhu svarů MAG pro ocelové konstrukce*. Liberec, 2012. Habilitační práce. TU v Liberci.
- [7] Technická dokumentace svařovacího stroje Omega 550. [online]. Dostupné z: http://www.migatron.com/~media/Brochures2/52253038_Omega.ashx
- [8] Technická dokumentace svařovacího stroje Speedtec 505SP [online]. Dostupné z: <http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K14116-2/SPEEDTEC405SP-505SP-ENG.pdf>
- [9] NOSEK, J. *Posouzení použitelnosti procesu zrychleného zkratu MAG pro svařování plechu 4 – 6 mm*. Liberec, 2015. Diplomová práce. TU v Liberci.
- [10] HUDEC, Z. 2010. *Optimization of Source-Wire-Gas Systems for Efficient Robot Welding*. IJSMDO, vol. 4, No. 3-4, July 2010, pp. 107-116, Paris.

PŘÍLOHA

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Tabulka parametrů, hodnot geometrické analýzy svaru a snímky makrovýbrusů

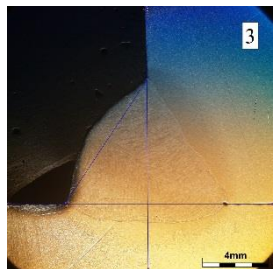
Příloha č. 2: Ukázka záznamu svařování systémem WeldMonitor

Příloha č. 1:

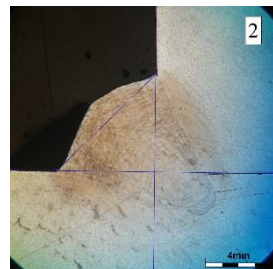
Tab. 19: Svařovací parametry a hodnoty geometrické analýzy svaru

v_d [m/min]	VZ	v_s [m/min]	I [A]	U [V]	CTWD [mm]	Q [kJ/cm]	P [mm ²]	c [mm]	x_{max} [mm]	a [mm]	b [mm]	z_{max} [mm]	v_{max} [mm]	w [mm]	β_1 [°]	β_2 [°]	p [mm]	P_N [mm ²]	P_s [mm ²]	FE [-]	v_t [mm]
9,5	3	0,58	373	31,0	18,2	10,0	24,2	5,1	4,9	4,3	7,9	4,0	8,3	9,5	105	122	1,2	26,8	56,6	0,45	8,63
	2	0,61	371	30,6	17,3	9,4	23,0	6,1	3,8	4,3	6,2	4,2	8,5	8,7	115	108	1,5	25,7	51,6	0,47	8,69
	1	0,69	386	29,7	17,3	8,4	20,3	4,5	4,6	3,6	6,0	4,7	8,3	7,5	96	107	1,6	21,2	45,2	0,50	8,85
	11	0,69	388	30,5	17,3	8,6	20,3	5,0	4,0	3,8	6,1	4,1	7,9	7,8	105	110	1,7	21,5	46,3	0,47	8,31
10,5	46	0,61	428	33,1	18,5	11,7	25,4	6,4	6,4	4,8	7,4	6,1	10,9	9,7	110	98	1,6	24,4	65,8	0,58	10,67
11	25	0,61	435	32,5	19,0	11,7	26,7	6,6	5,1	4,5	6,4	5,3	9,8	9,2	119	106	1,5	28,5	68,7	0,51	10,06
	6	0,65	404	29,5	18,2	9,2	25,0	5,1	4,7	4,1	6,7	4,3	8,4	8,4	95	100	2,5	31,0	57,1	0,45	8,99
	5	0,73	423	30,0	17,3	8,8	22,3	4,3	5,4	3,6	6,5	5,5	9,1	7,8	86	102	2,5	25,3	49,9	0,52	9,79
	35	0,73	443	32,0	18,5	9,8	22,3	4,2	6,0	3,6	7,1	5,2	8,8	8,1	78	100	1,6	23,6	54,2	0,51	9,52
	4	0,80	404	30,0	18,9	7,6	20,3	5,2	3,8	3,8	5,5	4,0	7,8	7,6	98	104	1,7	21,9	42,1	0,46	8,21
	49	0,80	448	33,3	19,0	9,4	20,3	4,3	5,5	3,7	6,8	5,1	8,8	8,1	98	118	1,6	21,8	48,4	0,53	9,21
11,5	47	0,61	440	33,3	19,0	12,1	27,9	5,4	6,7	4,4	7,7	6,5	10,9	9,2	91	110	1,7	30,7	62,7	0,56	11,27
	56	0,69	459	32,6	18,5	10,9	24,6	5,8	7,0	4,5	7,2	6,5	11,0	9,1	109	104	1,6	28,9	61,5	0,60	10,95
	43	0,73	474	32,3	17,8	10,6	23,3	4,2	6,8	3,7	7,7	6,5	10,2	8,8	92	124	1,6	24,4	61,1	0,57	10,81

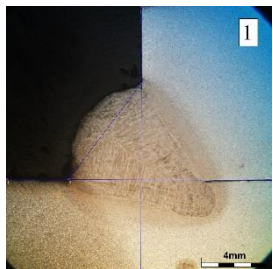
Snímky makrovýbrusů svarů:



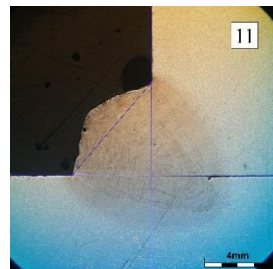
Svar 3



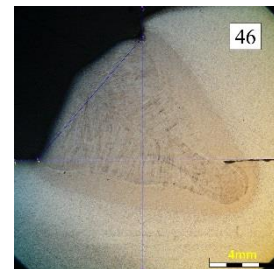
Svar 2



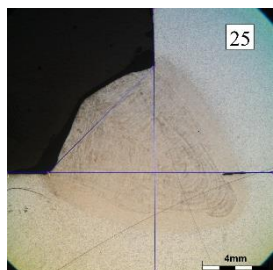
Svar 1



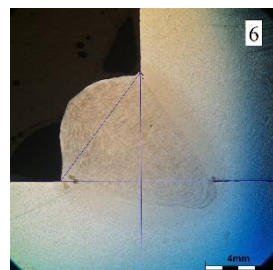
Svar 11



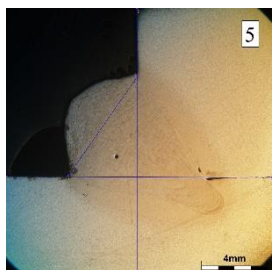
Svar 46



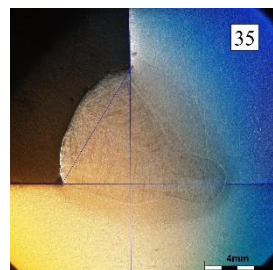
Svar 25



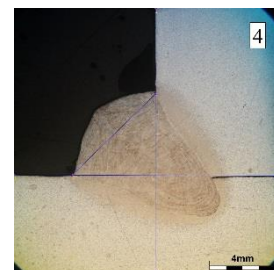
Svar 6



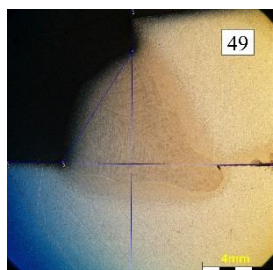
Svar 5



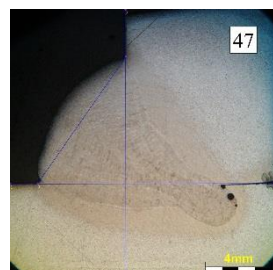
Svar 35



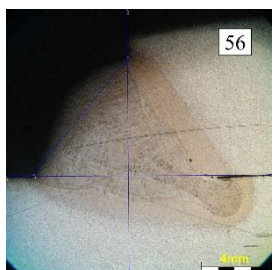
Svar 4



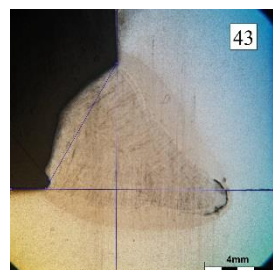
Svar 49



Svar 47



Svar 56

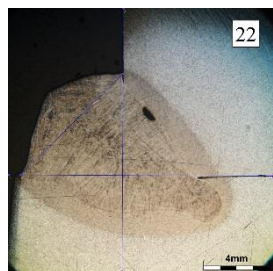


Svar 43

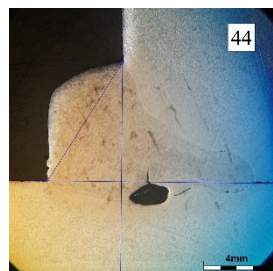
Tab. 20: Svařovací parametry a hodnoty geometrické analýzy svaru

v_d [m/min]	VZ	v_s [m/min]	I [A]	U [V]	CTWD [mm]	Q [kJ/cm]	P [mm ²]	c [mm]	x_{max} [mm]	a [mm]	b [mm]	z_{max} [mm]	v_{max} [mm]	w [mm]	β_1 [°]	β_2 [°]	p [mm]	P_N [mm ²]	P_S [mm ²]	FE [-]	v_t [mm]
12	22	0,61	453	30,7	19,0	11,5	29,1	6,4	6,1	4,4	6,3	6,1	10,5	9,0	108	99	2,3	30,1	68,4	0,53	11,02
	44	0,69	478	32,0	17,8	11,2	25,7	4,6	8,2	3,9	7,4	7,0	10,9	8,6	91	98	2,6	30,0	70,4	0,58	11,52
	54	0,69	473	33,5	19,0	11,6	25,7	5,4	6,5	4,3	6,7	6,8	11,1	8,6	98	95	1,9	28,3	62,0	0,59	11,33
	21	0,73	437	29,6	19,0	8,9	24,3	4,8	5,8	3,5	5,6	5,4	8,9	7,4	93	92	2,6	24,7	54,1	0,49	9,91
	36	0,73	454	32,2	19,0	10,1	24,3	4,7	6,5	3,9	7,1	6,5	10,4	8,5	89	108	2,1	27,4	63,7	0,57	10,92
	211	0,76	449	30,1	19,0	9,0	23,3	5,8	5,8	4,0	5,7	5,6	9,6	8,0	96	83	2,6	29,0	55,8	0,54	10,00
	52	0,80	484	33,5	19,0	10,2	22,2	4,4	6,1	3,7	6,6	6,1	9,8	7,8	98	104	1,9	23,0	52,6	0,56	10,33
12,5	42	0,69	483	32,0	17,8	11,3	26,8	4,8	8,2	4,0	7,2	7,7	11,7	8,6	88	109	2,4	29,0	68,5	0,60	12,27
	9	0,76	438	30,0	18,2	8,7	24,3	5,1	4,7	3,9	6,1	5,2	9,1	7,9	91	100	2,5	26,4	50,8	0,50	9,73
	8	0,84	438	30,5	18,9	8,0	22,0	3,9	5,0	3,2	5,8	4,6	7,8	7,0	75	80	3,8	27,2	47,8	0,45	8,94
	7	0,92	438	30,0	18,9	7,2	20,1	4,3	5,1	3,5	5,7	4,6	8,1	7,2	73	77	2,6	24,4	45,4	0,49	8,73
13	28	0,65	476	32,3	19,0	11,9	29,6	6,0	5,6	4,7	7,9	5,4	10,1	9,8	105	123	1,6	31,4	72,0	0,50	10,43
	38	0,69	471	33,1	19,2	11,4	27,8	5,5	6,7	4,3	7,1	6,8	11,1	9,0	97	109	2,2	30,4	69,8	0,57	11,54
	29	0,73	486	31,8	19,0	10,7	26,3	4,9	7,5	3,9	6,5	7,2	11,1	8,1	84	98	2,8	30,0	69,3	0,58	11,76
	27	0,80	477	32,3	19,0	9,7	24,0	4,8	6,2	3,8	6,1	5,9	9,7	7,7	88	104	2,1	24,7	59,2	0,54	10,34

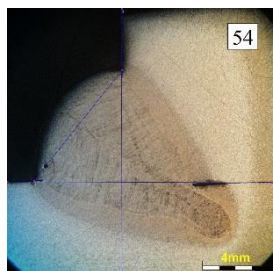
Snímky makrovýbrusů svarů:



Svar 22



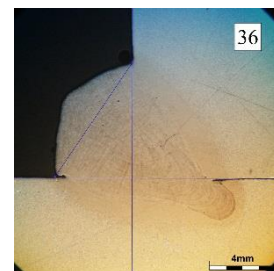
Svar 44



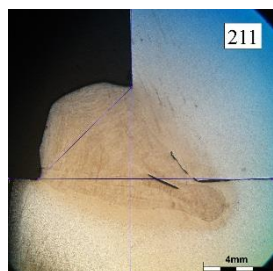
Svar 54



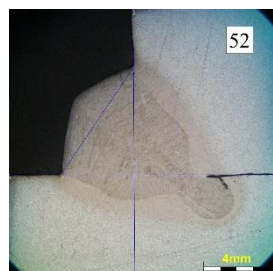
Svar 21



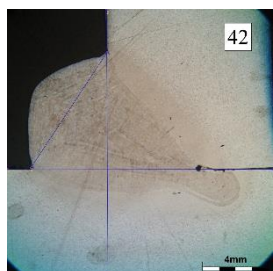
Svar 36



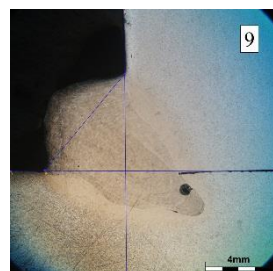
Svar 211



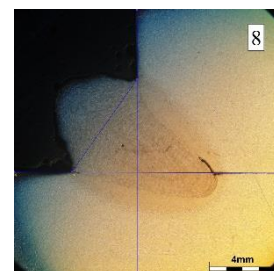
Svar 52



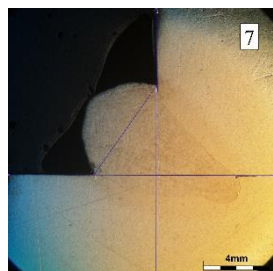
Svar 42



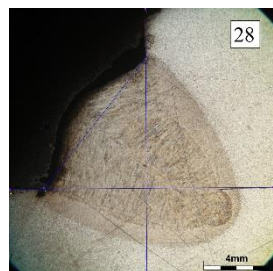
Svar 9



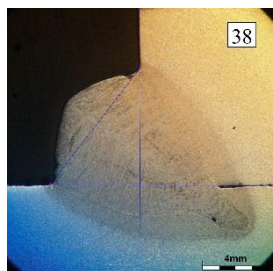
Svar 8



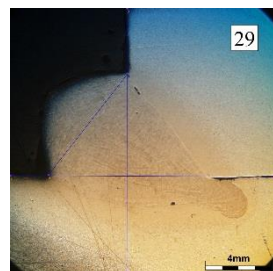
Svar 7



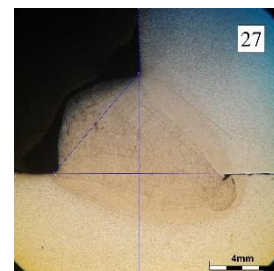
Svar 28



Svar 38



Svar 29



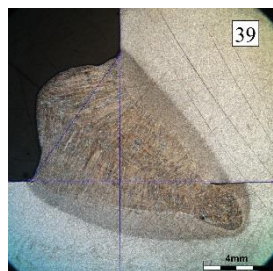
Svar 27

Tab. 21: Svařovací parametry a hodnoty geometrické analýzy svaru

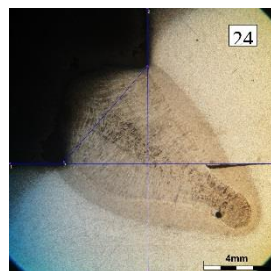
v_d [m/min]	VZ	v_s [m/min]	I [A]	U [V]	CTWD [mm]	Q [kJ/cm]	P [mm ²]	c [mm]	x_{max} [mm]	a [mm]	b [mm]	z_{max} [mm]	v_{max} [mm]	w [mm]	β_1 [°]	β_2 [°]	p [mm]	P_N [mm ²]	P_S [mm ²]	FE [-]	v_t [mm]
14	39	0,65	484	32,4	19,6	12,2	31,8	5,5	7,6	4,5	7,8	7,7	12,2	9,6	118	110	2,6	33,4	72,6	0,58	12,74
	24	0,73	504	31,8	19,0	11,1	28,3	5,3	6,3	4,1	6,1	7,0	11,1	7,9	80	94	2,8	29,8	64,7	0,56	11,77
	34	0,80	513	32,3	19,0	10,4	26,8	3,3	8,3	2,9	6,7	7,9	10,8	7,4	75	98	3,7	31,2	62,3	0,55	12,45
	23	0,84	498	30,0	19,0	9,0	24,6	4,7	6,4	3,5	5,5	6,9	10,4	7,3	80	79	3,2	27,8	54,9	0,56	11,32
	23TP	0,84	498	30,0	19,0	9,0	24,6	4,9	6,3	3,8	5,8	6,4	10,2	7,6	84	95	3,0	27,8	53,2	0,55	10,86
15	40	0,65	510	33,8	19,6	13,4	34,1	5,8	8,5	4,8	8,3	8,3	13,1	10,1	102	110	2,4	38,3	81,1	0,60	13,48
	31	0,69	514	33,7	19,2	12,8	32,0	6,2	5,4	4,7	7,6	4,9	9,6	9,6	106	103	2,5	35,4	75,6	0,45	10,21
	30	0,76	530	31,9	19,2	11,2	29,2	5,6	8,1	4,3	6,5	7,5	11,8	8,5	96	89	2,6	31,5	68,2	0,58	12,31
	27	0,80	477	32,3	19,0	9,7	24,0	4,8	6,2	3,8	6,1	5,9	9,7	7,7	88	104	2,1	24,7	59,2	0,54	10,34
	26	0,84	516	30,0	19,0	9,3	26,4	4,6	6,4	3,5	5,6	6,7	10,2	7,2	79	77	3,3	27,9	55,3	0,53	11,31
	261	0,84	532	31,6	19,0	10,1	26,4	6,0	7,5	4,4	6,4	7,1	11,5	8,7	101	94	2,7	31,5	66,0	0,60	11,68
15 - 16	32	0,69	519	33,5	19,3	12,9	33,0	6,2	6,7	4,9	8,0	6,2	11,1	10,0	106	118	2,0	35,6	74,4	0,52	11,49
	33	0,73	537	33,0	19,3	12,4	32,2	5,4	8,9	4,3	7,1	7,9	12,2	8,9	86	100	3,1	35,4	74,5	0,57	12,97
	57	0,73	520	33,2	19,2	12,1	31,0	5,5	7,9	4,5	7,4	6,5	11,0	9,2	98	101	2,8	36,4	69,8	0,53	11,56

Svary 32, 33, 57 byly svařované z plechu tl. 16 mm.

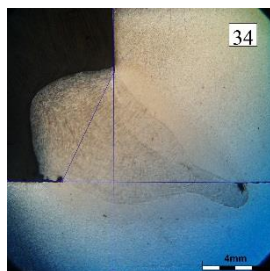
Snímky makrovýbrusů svarů:



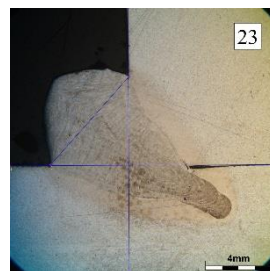
Svar 39



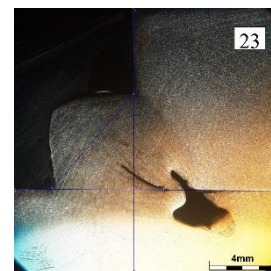
Svar 24



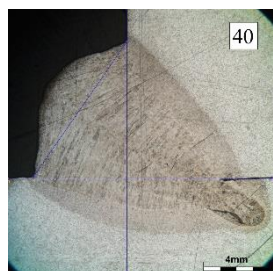
Svar 34



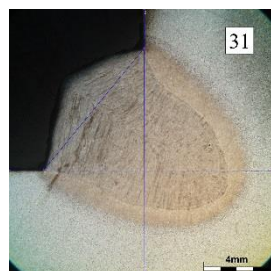
Svar 23



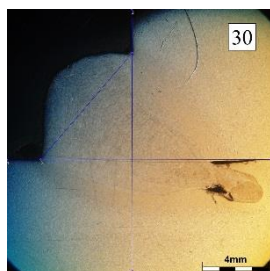
Svar 23TP



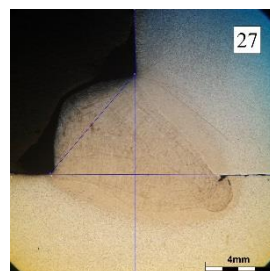
Svar 40



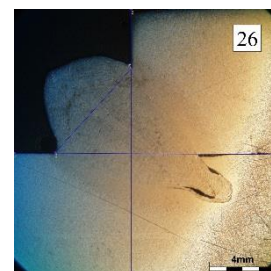
Svar 31



Svar 30



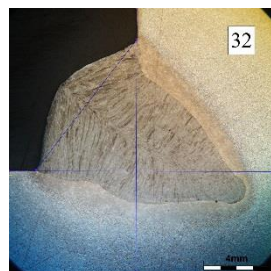
Svar 27



Svar 26



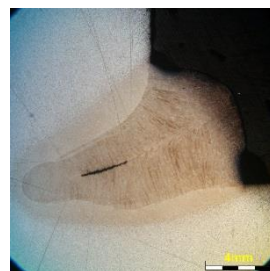
Svar 261



Svar 32



Svar 33



Svar 57

Příloha č. 2:

Ukázka záznamu svařování systémem WeldMonitor.

Svar 48 v intervalu 1 sekundy.

