

TECHNICKÁ UNEVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Vliv ochranného plynu na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu

Shielding gas effect on the welding quality and productivity of high power density MAG welding

Martin Tomášek

KSP – SM – 554

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. David Hrstka – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran

Počet tabulek

Počet příloh

Počet obrázků

Datum: 28.5.2010

originální zadání

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301-Strojní inženýrství

Diplomant: Martin Tomášek

Téma práce: Vliv ochranného plynu na kvalitu a produktivitu svařování
MAG s vysokou hustotou výkonu
Shielding gas effect on the welding quality and productivity
of high power density MAG welding

Číslo DP: KSP-SM-554

Vedoucí DP: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D. -TU v Liberci

Konzultant : Ing. David Hrstka – TU v Liberci

Abstrakt:

Diplomová práce navazuje na předchozí práce, ve kterých bylo pomocí matematického algoritmu výpočtu efektivity provedení koutového svaru optimalizováno několik soustav zdroj-drát-plyn. V této práci se jednak provedla optimalizace dvou soustav s dvěma směsnými plyny a dále byly provedeny optimalizace pomocí dvou dalších algoritmů, zaměřených více na praktické použití. Optimalizační diagramy dvou soustav provedené třemi algoritmy byly porovnány a posouzena jejich použitelnost pro další práce.

Abstract:

This graduation paper builds on previous work, which was using a mathematical algorithm for calculation of fillet weld efficiency optimization of several source-wire-gas systems. In this study, first conducted two optimizing systems with two mixed gases were performed using two other algorithms, focusing more on practical application. Optimization diagrams of two systems by the three algorithms were compared and assessed their applicability for further work.

Mistopřísežné prohlášení:

Mistopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 28. května 2010

.....

Martin Tomášek

Otradov 72

539 43 Krouna

Poděkování

Na úvod této diplomové práce bych rád poděkoval:

Ing. Zdeňku Hudcovi, Ph.D. za podnětné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval rodičům za trpělivost a za pomoc při studiu na vysoké škole.

obsah

1 Úvod	9
2 Teoretická část	10
2.1 Základní princip svařování MAG	10
2.1.1 Přenos kovu v oblouku	11
2.2 Ochranné plyny	12
2.2.1 Směsné plyny	16
2.3 MAG svařování koutového svaru	18
2.3.1 Měření efektivity provedení koutového svaru a její optimalizace	19
2.3.2 Metodika 1	20
2.3.3 Metodika 2	21
2.3.4 Metodika 3	22
2.4 Optimalizace procesu	23
2.4.1 Taguchiho metoda	23
2.4.2 Metoda středové kompozice	24
2.4.3 Heuristické metody	25
3 Praktická část	25
3.1 Cíl práce	25
3.2 Popis testovaných soustav zdroj-drát-plyn	26
3.2.1 Svařovací zdroj Migatronik 500 pulse	27
3.2.2 Přídavný materiál	28
3.2.3 Použité ochranné plyny	29
3.2.4 Materiál	29
3.3 Návrh parametru experimentu	29
3.4 Svařování vzorků	32
3.5 Vizuální kontrola a rozměrová analýza svaru	33
3.6 Vypočítané hodnoty	34
3.6.1 Metodika 1A (optimalizace pro první jakost)	34
3.6.1.1 Metodika 1A pro soustavu se směsí 1	35
3.6.1.2 Metodika 1A, směs 1 - diskuze	38
3.6.1.3 Metodika 1A pro soustavu se směsí 2	39
3.6.1.4 Metodika 1A, směs 2 – diskuze	42

3.6.2 Metodika 1B (optimalizace pro druhou jakost).....	42
3.6.2.1 Metodika 1B pro soustavu se směsí 1.....	42
3.6.2.2 Metodika 1B, směs 1 - diskuze.....	44
3.6.2.3 Metodika 1B pro soustavu se směsí 2.....	45
3.6.2.4 Metodika 1B, směs 2 - diskuze.....	48
3.6.3 Metodika 2.....	49
3.6.3.1 Metodika 2 pro soustavu se směsí 1.....	49
3.6.3.2 Metodika 2 pro soustavu se směsí 2.....	51
3.6.3.3 Metodika 2, směs 1 a 2 – diskuze.....	52
3.6.4 Metodika 3.....	53
3.6.4.1 Metodika 3 pro soustavu se směsí 1.....	53
3.6.4.2 Metodika 3, směs 1 – diskuze.....	56
3.6.4.3 Metodika 3 pro soustavu se směsí 2.....	57
3.6.4.4 Metodika 3, směs 1 – diskuze.....	59
4 Shrnutí a zhodnocení výsledků.....	59
4.1 Porovnání obou soustav (směs 1 a 2) z hlediska tří použitých algoritmů.....	59
4.2 Závěrečné porovnání vlivu směsi plynu na efektivitu provedení koutového svaru z hlediska tří použitých algoritmů.....	61
4.3 Porovnání algoritmů efektivity svaru.....	63
5 Seznam použité literatury.....	65
Příloha 1 až 8	

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

MIG (metoda 131),	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
MAG (metoda 135),	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
I	proud [A]
U	napětí [V]
v_d	rychlost drátu [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_s	rychlost svařování [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v	účinná výška koutového svaru [mm]
v_t	efektivní výška svaru [mm]
z	hloubka závaru [mm]
x	osový závar [mm]
a	jmenovitá velikost koutového svaru [mm]
b, c	strany koutového svaru [mm]
w	šířka housenky [mm]
p	převýšení svaru [mm]
e	excentricita [mm]
α	úhel [°]
P_M	výpočtová průřezová plocha návaru [mm^2]
P_N	plocha návaru změřená z makrosnímku [mm^2]
P_S	průřezová plocha svaru [mm^2]
D	zředění [-]
Q	vnesené teplo [kJ/cm]
f_2	účinnost svaru [%]
PE	efektivita závaru svaru [-]
DE	efektivita návaru svaru [-]
FE	celková efektivita provedení svaru [-]

1. ÚVOD

Zadání této diplomové práce navazuje na celou řadu diplomových prací, které byly zaměřeny na měření a optimalizaci efektivity provedení koutového svaru metodou MAG. Základní metodika, kterou byla efektivita koutového svaru měřena byla odvozena již před cca 10-ti lety a prezentována v práci [1]. Za tu dobu byla její spolehlivost prověřena při optimalizaci řady systémů zdroj-drát-plyn a též v kombinaci s dvojnásobnou tloušťkou materiálu a s mezerou v kořeni jako dalším faktorem. Byly zjištěny i některé nedostatky této metodiky, která vychází z porovnání ideálních tvarů koutových svarů. Proto byly v práci [2] navrženy další 2 algoritmy výpočtu efektivity provedení koutového svaru. Úkolem této práce je provést optimalizaci dalších 2 soustav zdroj-drát-plyn a provést výpočty efektivity podle staré metodiky (byly navrženy 2 varianty) a podle dalších 2 nových algoritmů – tedy celkem porovnání 4 + 4 optimalizace a vyvodit závěry, který z daných 4 algoritmů nejlépe vyhovuje praktické aplikaci. Kritéria hodnocení budou nejen statistická hodnocení spolehlivosti ale i hodnocení přípustnosti svaru z hlediska platných norem. K provedení experimentálního programu je k dispozici zapůjčený zdroj fy. MIGATRONIC SIGMA 500, směsné plyny fy. Air Products, plné, hlazené dráty fy. ESAB, lineární automat, monitorovací zařízení WeldMonitor, nově zařízená metalografická laboratoř a program pro grafickou analýzu vzorků NIS-elements.

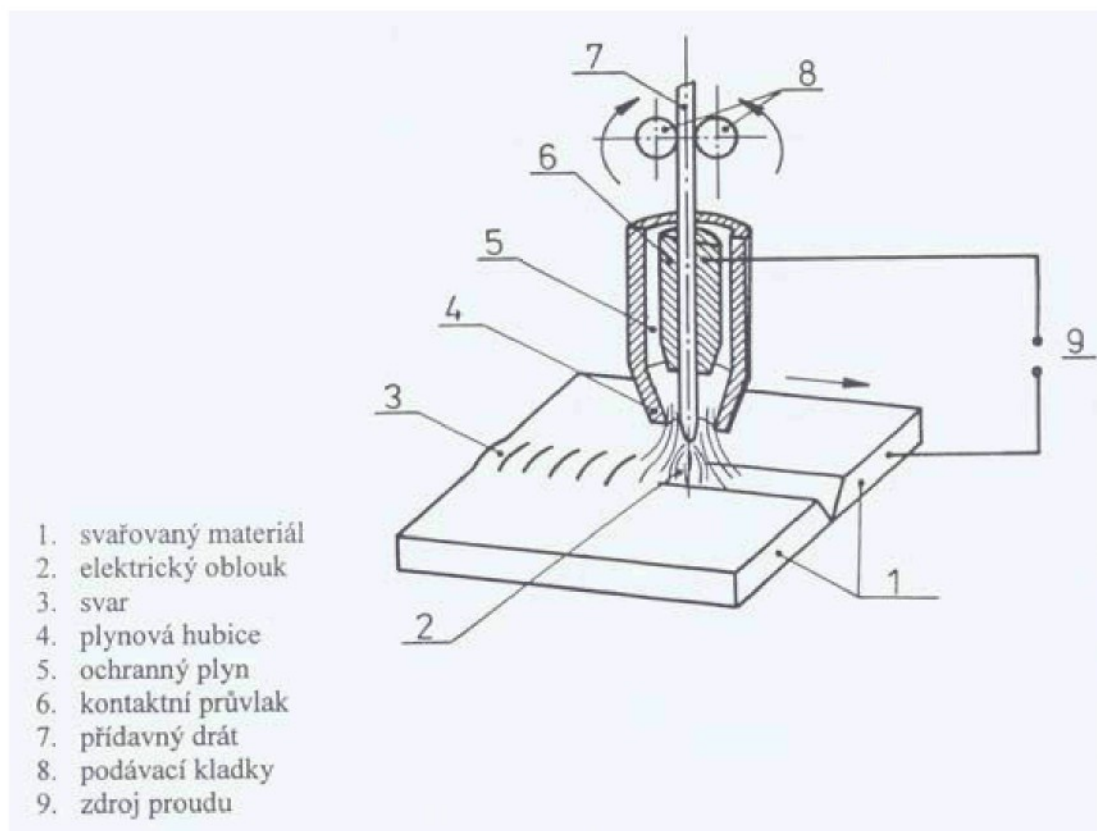
2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Základní princip svařování MAG

Svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG (Metal Active Gas) patří v celosvětovém měřítku k nejrozšířenějším metodám pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Hlavními důvody rozšíření metody MAG jsou: široký výběr přídatných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení a především významné výhody a charakteristiky uvedené metody svařování. [4]

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, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C. [4]

Díky vysokým proudům se svařovací rychlosti blíží hranici $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost kapek přenášených obloukem přesahuje $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ochranná atmosféra se volí podle druhu svařovaného materiálu, ovlivňuje však také přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku. [4]



Obr. 1: Princip svařování MAG [4]

2.1.1 Přenos kovu v oblouku

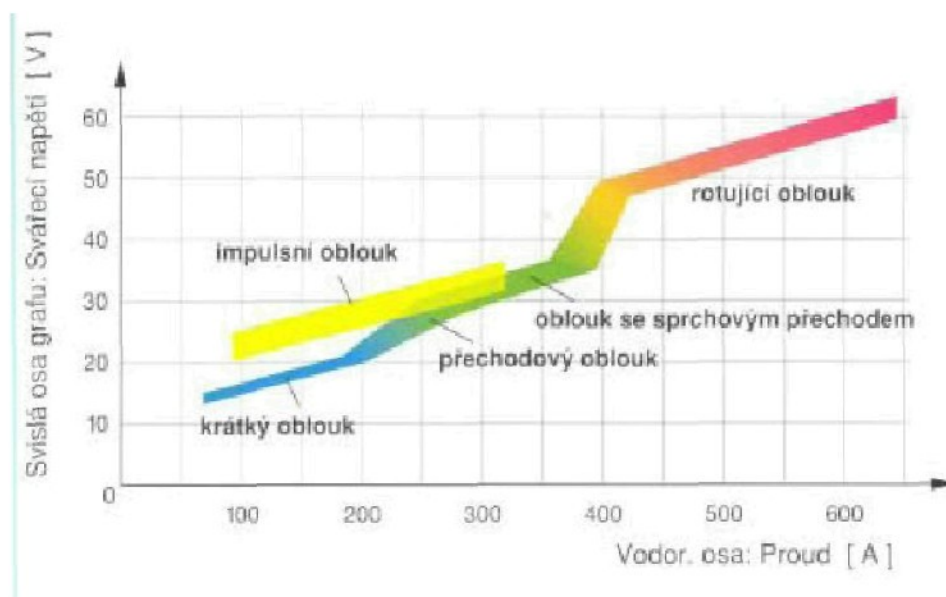
Přenos kovu v oblouku patří mezi základní charakteristiky metody svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou a závisí především na svařovacích parametrech tj. proudu a napětí. Významně však jeho charakter ovlivňuje složení ochranného plynu, druh přídavného materiálu a technika svařování. [4]

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

Sprchový přenos je typický pro hodnoty svařovacího proudu od 200 do 500A a napětí 28 až 40V. tento typ přenosu se dá realizovat ve směsích plynů Ar s CO_2 , případně O_2 , nebo čistém Ar u svařování neželezných kovů. Vzhledem k vysokým hodnotám povrchového napětí v CO_2 , nelze tento přenos realizovat, poněvadž nelze získat dostatečně drobné kapky. Charakteristické pro sprchový přenos v Ar a směsích bohatých argonem

(minimálně 80%) je, že díky snadné ionizaci plynu obklopuje plazma i konec tavicí se elektrody a tím se urychluje ohřev drátu, který tvoří ostrý hrot.

Svařování impulsním proudem je zvláštní formou bezzkratového přenosu kovu. Parametry svařování impulsním proudem překrývají oblast zkratového i sprchového přenosu. Impulsní forma přenosu kovu obloukem, jehož průběh 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. [4]



Obr. 2: Typy přenosu svarového kovu [5]

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 také významný vliv na: typ přenosu kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, chování tavné lázně, hloubku závaru, rychlost svařování a další parametry svařování.

Jako ochranné plyny pro metodu **MAG** se používá čistý plyn oxid uhličitý CO_2 , nebo v současnosti častěji používané vícesložkové směsné plyny se základem argonu – $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ a $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$. Čistota plynů a přesnost míchání směsí jsou stanovené normou ČSN EN 439. [4]

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. [4]

Argon

Je inertní (netečný) – nevytváří s žádným prvkem chemické sloučeniny. Je to jednoatomový vzácný plyn, bezbarvý, bez chuti a zápachu. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu (kde teplota varu argonu při atmosférickém tlaku je $-185,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ve vzduchu ho je obsaženo 0,934 %.

- Dobře ionizuje – (nízký ionizační potenciál 15,8 eV) = možnost vysokého proudového zatížení, dobře zapaluje el. oblouk, vyšší intenzita záření el. oblouku.
- Hůře vede teplo – (malá tepelná vodivost) = široký závar na povrchu, úzký v kořeni.
- Těžší než vzduch – (cca 1,4x, měrná hmotnost je $1,784\text{ kg/m}^3$) = dobrá ochrana svarové lázně (především v poloze PA).
- Malá citlivost na proudění vzduchu. [5]

Helium

Je inertní (netečný) - nevytváří s žádným prvkem chemické sloučeniny. Jednoatomový inertní plyn, bez barvy a zápachu. Vyrábí se separací z některých druhů zemního plynu, kde se **He** vyskytuje v množství kolem 1%. Ve vzduchu je helium obsaženo ve velmi malém množství.

- Hůře ionizuje – (vyšší ionizační potenciál 24,6 eV) = horší zapalování oblouku, nutné vyšší napětí na oblouku, oblouk je nestabilní při větší délce.
 - Dobře vede teplo – (velká tepelná vodivost) = vyšší teplota lázně, širší závar, vyšší rychlost svařování, lepší odplynění lázně.
 - Lehčí než vzduch – (cca 7x lehčí než vzduch a asi 10x lehčí než argon, měrná hmotnost je 0,178 kg/m³) = snižuje efektivitu plynové ochrany, nutný větší průtok plynu.
 - Nepoužívá se v takové míře jako samostatný plyn pro ruční a poloautomatické procesy svařování, ale spíše ve směsích s argonem.
- [5]

Oxid uhličitý

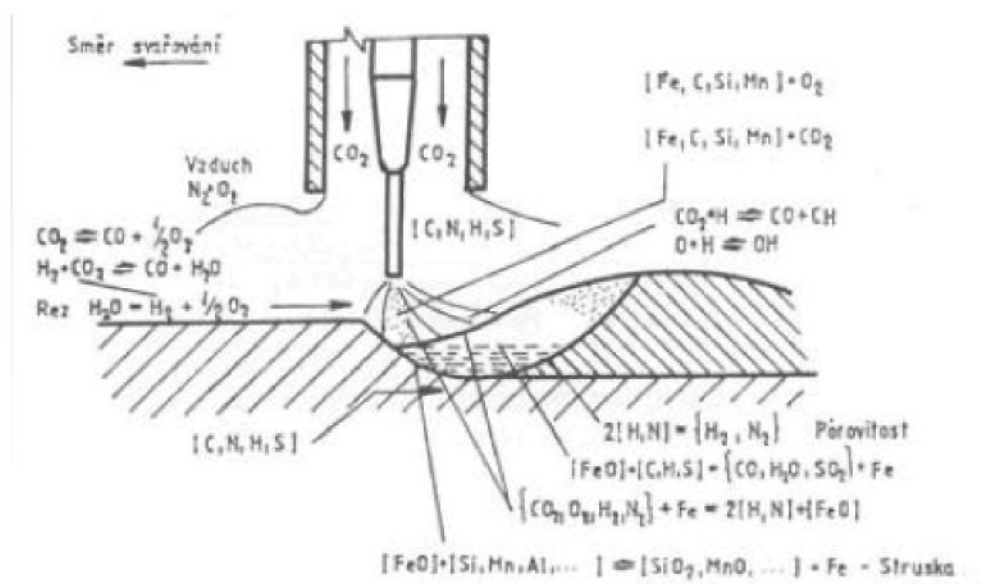
Je silně oxidační plyn – řadí se mezi tzv. aktivní plyny. Nehořlavý, nejedovatý a bezbarvý plyn, specifické kyselé chuti, jehož bod varu je $-78,5^{\circ}\text{C}$. V tuhém stavu je bílý a tvrdý (používá se pro výrobu suchého ledu např. na tryskání). Při pokojové teplotě se prudce odpařuje a vyvíjí se plynný **CO₂**. Není jedovatý, avšak při vyšší koncentraci ve vzduchu brání dýchání (15 %). [2]

Vzniká jako „odpadní produkt“ při výrobě ostatních plynů. Tlakem ho je možné zkapalnit (např. při 0°C tlakem 3,6 MPa). Až do teploty 700°C je **CO₂** stabilní a chová se jako inertní plyn (chemicky netečný). Při vyšších teplotách se však rozpadá na oxid uhelnatý (CO) a kyslík (O_2), takže působí oxidačně. Dá se říci, že 10 % **CO₂** má potom stejný účinek asi jako 1% O_2).

CO₂ se odebírá z lahve pomocí jednostupňového redukčního ventilu,

přičemž kapalný CO_2 mění skupenství a přechází do plynného stavu. Při odpařování a expanzi plynu se odebírá z okolí teplo, což může při intenzivním odběru způsobit snížení teploty, které vede k možnému zamrznutí ventilů. Proto se na redukční ventily na CO_2 používají proti zamrznutí elektrické ohřívače jako jejich součást a jsou připojené na zdroj svařovacího proudu. Velkou předností CO_2 jako ochranného plynu je především jeho nízká cena.

- Hůře ionizuje – (i přes nízký ionizační potenciál 14,4 eV) = nutné vyšší napětí.
- Dobře vede teplo = vysoký přenos tepla do svarové lázně + teplo získané exotermickými oxidačními reakcemi zajišťuje velmi dobré natavení svarových hran, hluboký průvar s oválným profilem svarové housenky a dobré odplynění svarové lázně.
- Těžší než vzduch – (asi 1,5 x , měrná hmotnost je 1,976 kg/m³) = dobrá ochrana lázně (především v běžných polohách PA, PB, PC). [5]



Obr. 3: Reakce ochranného plynu s povrchem svarové lázně [5]

2.2.1 Směsné plyny

Jednokomponentní ochranné plyny nezaručují při svařování některých kovů a slitin požadovaný stabilní svařovací proces a pravidelný přenos kovu v elektrickém oblouku, proto se v dnešní době často nahrazují směsmi plynů na bázi argonu. Do argonu se v zájmu zvýšení stability oblouku přidávají zejména plyny s oxidačním účinkem (aktivní – CO₂, O₂), nebo helium z důvodů zvýšení tepelného výkonu. [5]

Výhody použití směsných plynů

- Zvýšení stability procesu svařování
- Snížení rozstříku tekutého kovu
- Zlepšení formování svarové housenky
- Zvýšení produktivity svařování

Dusík – N₂

- Nereagující plyn
- Nosný plyn formovacích směsí, příp. příměs pro speciální účely (např. duplex)
- Riziko vzniku nitridů
- Mírně lehčí než vzduch [5]

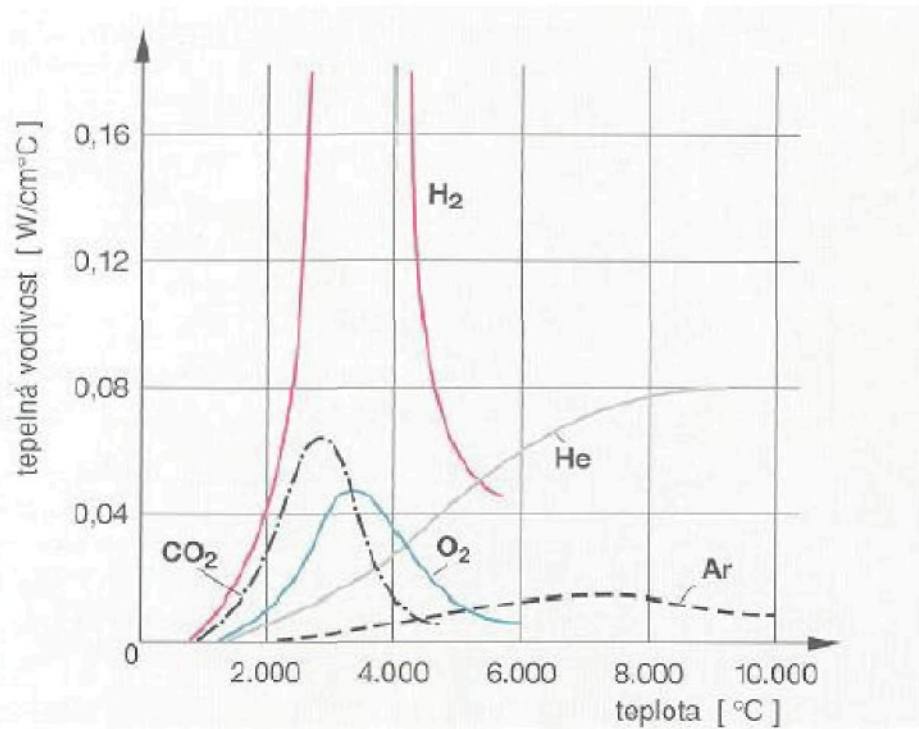
Vodík – H₂

- Redukční plyn
- Používá se pouze jako příměs (do směsných a formovacích plynů)
- Dobře vede teplo – vyšší teplota lázně, širší závar, vyšší rychlost svařování
- Riziko vodíkového praskání u citlivých materiálů (max. obsah do 10 %)
- Lehčí než vzduch [5]

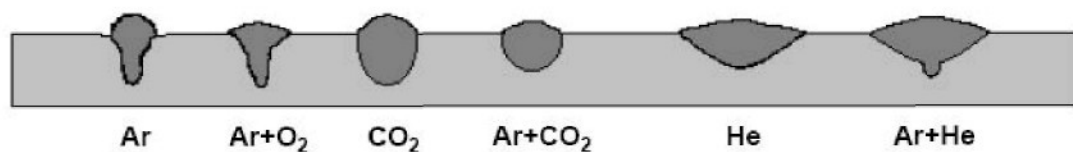
Kyslík – O₂

- Oxidační plyn
- Používá se pouze jako příměs, má silný oxidační účinek (cca dvojnásobek CO₂)
- Slabě ionizuje

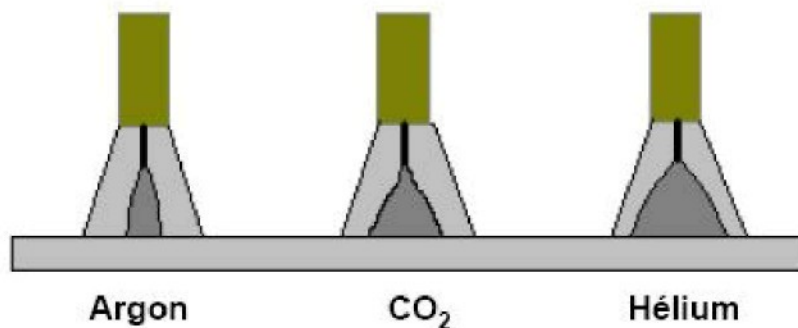
- Dobře vede teplo, vyšší teplota lázně, snižuje povrchové napětí svarové lázně, zlepšuje přechod do základního materiálu
- Vyšší náchylnost ke vzniku vad při zvyšování jeho obsahu ve směsi (max. 5 %) [5]



Obr. 4: Závislost tepelné vodivosti různých plynů na teplotě [6]



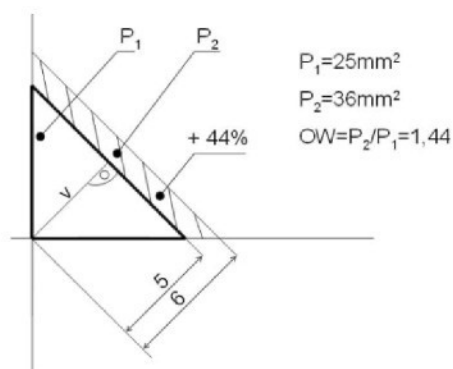
Obr. 5: Tvar závaru [6]



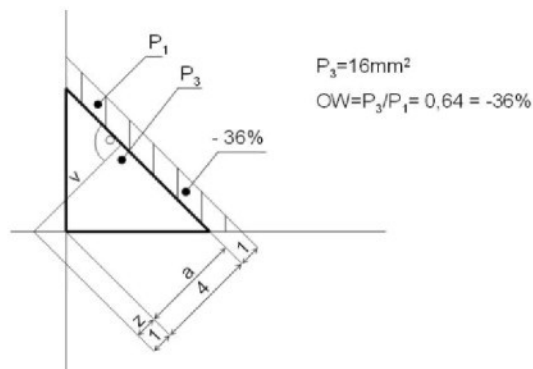
Obr.6: Tvar elektrického oblouku [6]

2.3 MAG svařování koutového svaru

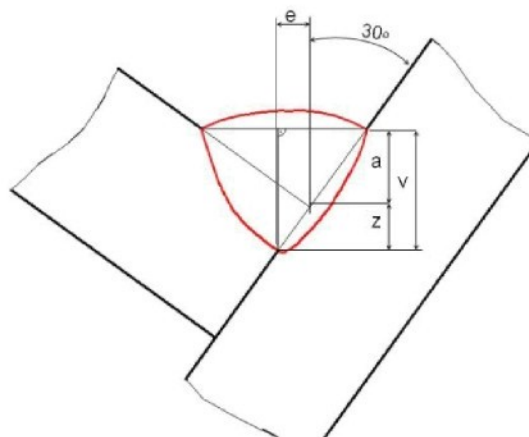
Koutový svar je nejpoužívanějším spojem ve svařovaných konstrukcích. Na rozdíl od tupého spoje není velikost koutového svaru omezena tloušťkou materiálu a tak má větší sklon k overwedingu (nadměrnému svařování). Jeho ideální výplňový (návarový) průřez je čtverec nosné velikosti a^2 a každý milimetr nad tuto vypočtenou hodnotu velkou měrou přispívá k nárůstu průřezové plochy a tím i výrobních nákladů a smršťující síly (napětí a deformací) (Obr.7). Totéž platí o převýšeném a nerovnoměrném svaru. Overwelding koutového-výplňového svaru se počítá jednoduše jako poměr čtverce velikosti měřeného a navrženého svaru, přesněji by to měl být poměr průřezové navařené a navržené plochy svaru.



Obr. 7



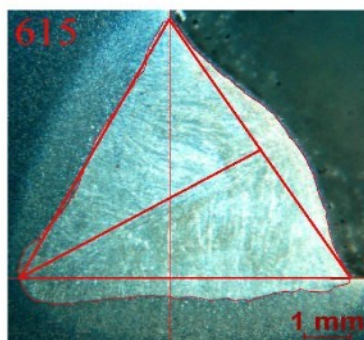
Obr. 8



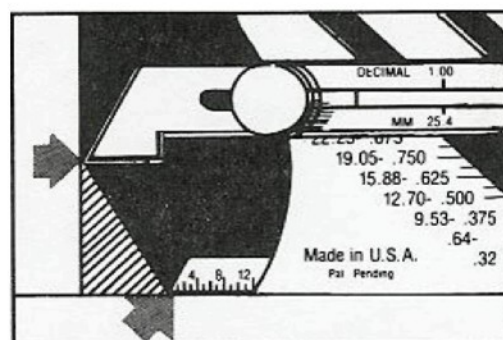
Obr. 9

Na druhou stranu potřebná plocha návaru výrazně klesne, pokud svařujeme automaticky v PA (ev. PG) pozici a započítáme závar do výpočtu nosné velikosti svaru (Obr. 8), zvláště pokud je závar směřován do mezery (Obr. 9), [1] a speciálně pokud použijeme režim s vysokou hustotou výkonu. Vnější tvar tohoto svaru je nerovnoměrný trojúhelník.

Tento tvar byl legalizován v posledním vydání normy ČSN EN 25817, kde je definována velikost koutového svaru jako výška největšího rovnoramenného trojúhelníka, vepsaného do příčného řezu svaru. (Obr. 10). Existují i měrky, které umožňují měřit tyto nerovnoměrné svary [7], (Obr. 11).



Obr. 10 Efektivní tvar koutového-závarového svaru



Obr. 11 Měrka pro nerovnoměrné svary [4]

2.3.1 Měření efektivity provedení koutového svaru a její optimalizace

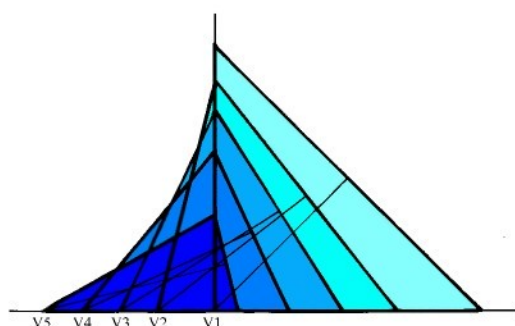
Na katedře KSP byl řešen problém stanovit efektivitu provedení koutového svaru a metodiku jejího měření a dále navrhnout metodu

optimalizace efektivity pro danou soustavu zdroj-drát-plyn tak, aby bylo zřejmé, při které kombinaci svařovacích parametrů má daná soustava nejvyšší efektivitu svařování koutových svarů.

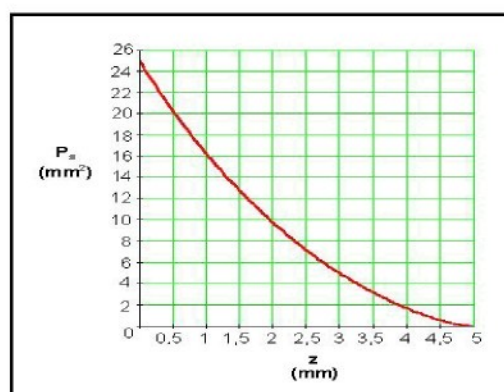
Pro měření efektivity provedení koutového svaru jsou základní 2 faktory – hloubka závaru a vnější tvar svaru. Postupně byly odvozeny 3 matematické modely výpočtu efektivního tvaru a rozměru svaru z geometrických parametrů skutečného svaru.

2.3.2 Metodika 1

První model "geometrie koutového svaru, řízené hloubkou závaru" je založen na skutečné maximální hloubce závaru z [3], jako části skutečné účinné výšky, která je v základním materiálu. Z hodnoty z se vypočte efektivní účinná výška svaru v_t pro danou průřezovou plochu návaru P . Dosažená hloubka závaru z určuje pro danou plochu jen jednu velikost maximální účinné výšky v_t . Schéma na (Obr. 12) a graf na (Obr. 13) ukazují, jak křivka závislosti $P = f(v_t, z)$ začíná plně výplňovým svarem bez závaru a končí plně závarovým svarem bez přídavného materiálu. Objektivně se takto dají porovnat jen svary s ideálně směřovaným závarem a ideální geometrií návaru. Závar se bere maximální, bez ohledu na to, jestli je směřován do stykové plochy nebo pásnice. Pokud je směřován do stojny, svar se vyřadí, protože ve stejné je nižší koef. odvodu tepla. Geometrie návaru se zohlední v koeficientu efektivity návaru. [3]



Obr. 12: Plocha návaru jako funkce závaru pro $v_t = \text{konst.} = 5 \text{ mm}$



Obr. 13: Diagram $P = f(z)$ konst. účinnou výšku v_t

Byl vytvořen počítačový program výpočtu v_t pro dané hodnoty z a P a efektivita provedení koutového svaru byla rozdělena na **efektivitu závaru**

$PE = z/v_t$ a efektivitu návaru, která se počítala ve dvou variantách:

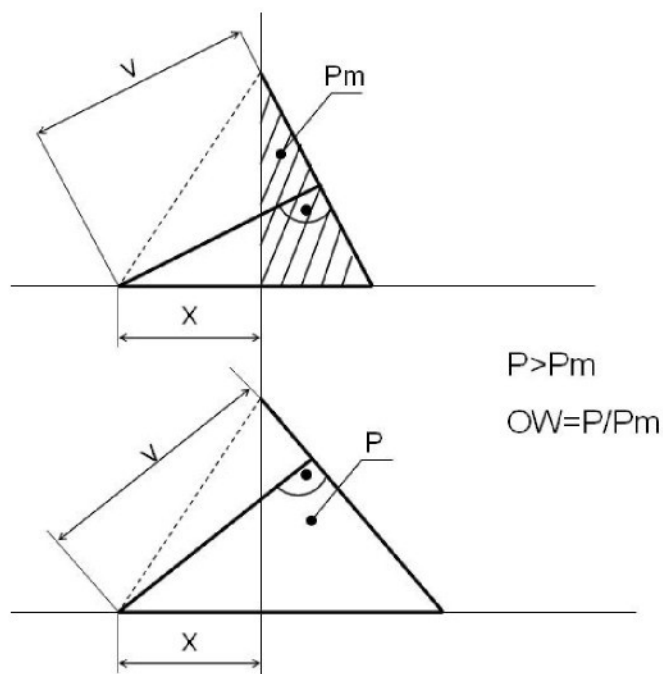
- a) $DE = (v - z)/(v_t - z)$, kdy je vliv návaru zcela oddělen od působení závaru,
- b) $DE = v/v_t$, která jen koriguje vliv závaru.

Výsledná efektivita koutového svaru je násobkem obou hodnot:

$FE = PE \cdot DE$ a je charakteristickou hodnotou pro každý optimalizovaný systém zdroj-drát-plyn, určující parametrické pole, včetně efektivní plochy průřezu a velikosti svaru, kde je daný systém nejefektivněji použitelný. Experimentálně bylo zjištěno, že při použití varianty a) má převýšení a stečení velký vliv na výslednou efektivitu a optimální svary snesou jakostní stupeň 1 (malé převýšení a přechodové úhly přes 110° , zatímco varianta b) připouští efektivní svary převýšené až do přechodového úhlu 90° , zejména u pásnice. Tyto svary jsou užší, mají hlubší závar a tím i vyšší hodnotu efektivity. I když spadají do 2. stupně kvality, mohou být ideální kořenovou vrstvou pro vícevrstvý svar.

2.3.3 Metodika 2

Druhý model (porovnávací) vychází z potřeby vyjádřit u koutových závarových svarů hodnotu overweldingu, podobně jako u výplňového svaru. Skutečný a efektivní svar mají stejnou osovou hloubku závaru x a skutečně naměřenou účinnou výšku v . Matematicky vyjádříme minimální plochu P_t návaru $P_t = f(x, v)$. Efektivita závaru vychází ze skutečně naměřených stabilních hodnot: $PE = x/v$ a efektivita návaru je podílem ideální a skutečné plochy: $DE = P_t/P$, kde overwelding je obrácenou hodnotou této efektivity.

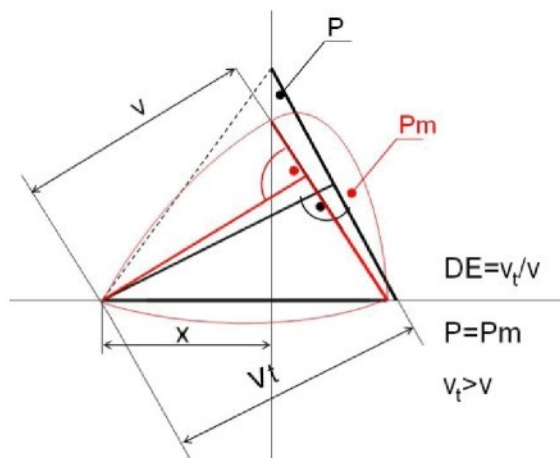


Obr. 14, 15: obrázky pro metodiku 2

2.3.4 Metodika 3

Třetí model (technologický) vychází z faktu, že plocha návaru, stejně jako hloubka závaru je závislá na velikosti proudu. S nižší hodnotou proudu při nižší rychlosti drátu, kterou nastavíme pro požadovanou menší plochu návaru, nedosáhneme stejné hloubky závaru. Plocha musí být při přepočtu konstantní. To znamená, že ideální nosná výška, která odpovídá ideální ploše, bude větší než skutečná – jako u modelu 1. Rozdíl je v tom, že tento model započítává nepřesnost vyosení hořáku.

(Obr. 16).



Obr. 16: Obrázek pro metodiku 3

PE je poměr skutečného osového závaru a ideální výšky: $PE = x/v_t$. **DE** je opět poměr skutečné výšky svaru k ideální v/v_t a zahrnuje ztráty převýšením a nerovnoměrností trojúhelníka. Tento algoritmus, i když je podobný prvnímu algoritmu, je matematicky nejsložitější, protože vede k řešení kvartické rovnice. Proti první metodice neřeší maximální závar ideálního svaru, ale vychází z konstrukčně i technologicky reálných podmínek a reálné je i zobrazení ideálního tvaru koutového svaru, který závarem i plochou odpovídá skutečnému a jehož rozměry můžeme spočítat a nakreslit. Na druhou stranu vyžaduje větší přesnost provedení svaru, zejména míru vyosení hořáku. Svary, jejichž maximální závar nejde do mezery, ale do pásnice silně zkreslují výsledky.

2.4 Optimalizace procesu

Experimentální optimalizace procesu je s výhodou prováděna formou statisticky navrženého programu experimentů DOE [10]. Nejpoužívanější postupy plánování experimentů, které jsou zpravidla aplikovány na optimalizaci obloukového svařování lze rozdělit na 3 kategorie:

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 [1]
3. Heuristické metody optimalizace parametrů, např. založené na tolerančních polích.

2.4.1 Taguchiho metoda [8,9]

Je zaměřena na vytvoření "robustního návrhu" výběru a seřazení procesních faktorů založená na zhodnocení síly působení jednotlivých proměnných – tedy výběr faktorů a kombinaci jejich hladin, které vykazují největší odstup od šumu (S/N faktor) 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. Méně se hodí pro přesné určení jejich optimálního nastavení, zvláště pokud jeden nebo více faktorů vykazuje nelineární průběh.

Při aplikaci na svařování MAG může sloužit pro hrubý výběr rámcových vstupních podmínek svařování a ostatních vstupních parametrů – např. výběr, zahmující 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 s dvěmi nebo třemi hladinami parametrů není dostačující k vyladění optimální kombinace parametrů.

2.4.2 Metoda středové kompozice

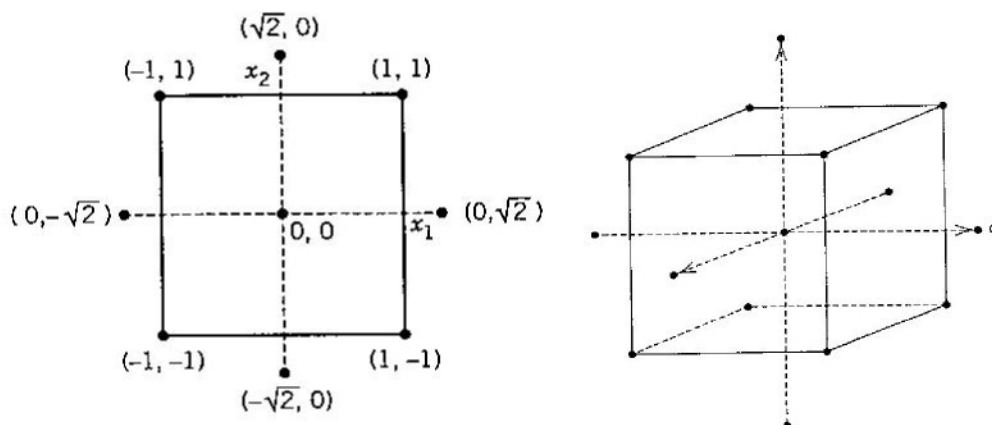
Tato metoda nabízí proti uvedenému ortogonálnímu uspořádání, vhodnější **sférické uspořádání** parametrického prostoru.

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 $2 \cdot k$ rovnic

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

Body návrhu tak vymezí v parametrickém prostoru vícerozměrný sférický tvar (kruh pro 2 parametry, kouli pro 3 parametry, atd. viz obr. 17 a 18), doplněné o několik středových bodů, poskytujících odhad rozptylu.



Obr. 17: Uspořádání hodnot parametrů pro 2 proměnné

Obr. 18: Uspořádání hodnot parametrů pro 3 proměnné

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

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

(0.9)

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. [1]

2.4.3 Heuristické metody

Byly vytvořeny pro řešení kombinačních optimalizačních problémů, příliš složitých pro řešení stávajícími statistickými metodami. Spočívají v návržení, testování a implementaci algoritmů. Standardní soubory problémů lze nalézt i na internetu. Některé jsou založeny na skutečných aplikacích, jiné jsou umělé, generované. Vhodně zvolený algoritmus umožňuje výzkumníkovi lépe porozumět zdrojům rozptýlů a vlivu korelační struktury problému na průběh algoritmu. [1]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Cíl práce

Cílem a úkolem praktické části mé diplomové práce bylo provést a vyhodnotit experimentální program dvou soustav zdroj-drát-plyn, kde zdroj a drát je stejný a testujeme 2 druhy plynů. K posouzení vlivu ochranného plynu při MAG svařování na produktivitu a efektivitu provedení koutového svaru (dále jen "efektivitu svaru") použijeme již ověřenou metodiku s použitím dosud používaného algoritmu [1] a dále budeme testovat 2 nové algoritmy výpočtu efektivitu provedení koutového svaru [3].

Prvním krokem uvedené metodiky je zjištění blízko-optimálních podmínek pomocí buďto Taguchiho metody nebo průřezovým parametrickým testem několika experimentů. Tato fáze byla provedena již v práci [3], kde byly provedeny experimenty svařování shodnými parametry při použití 3 ochranných plynů. Tyto experimenty budou zahrnuty do této práce pro zvýšení statistické přesnosti výsledků. Z uvedených experimentů jsou patrná i parametrická pole, ve kterých se pravděpodobně budou nalézat optima efektivit svaru pro oba plyny.

Praktická část práce začíná druhým krokem dle metodiky – navržením souboru experimentů podle statistické metody centrální kompozice. Po jejich vyhodnocení bude provedena optimalizace efektivit svaru podle stávající metodiky (dále jen “metodika 1”) a dále podle dvou nových algoritmů, popsanych v teoretické části (dále jen “metodika 2” a “metodika 3”). Závěrem bude porovnán vliv 2 ochranných plynů na efektivitu svaru podle všech uvedených algoritmů.

3.2 Popis testovaných soustav zdroj-drát-plyn

3.2.1 Svařovací zdroj Migatronik Sigma 500 pulse

Svařovací zdroj Sigma je určený pro technologii svařování MIG/MAG, MIG impuls i MMA. Zdroj je postaven na invertorové technologii, která svou pružností a rychlostí odezvy parametrů předbíhá standardní skokově řízené zdroje. Snímatelný podávací systém zvyšuje akční rádius v závislosti na délce mezikabelu. Rozšířený Puls panel umožňuje nastavení primárních a sekundárních svařovacích parametrů. Možnost volby specifického programu v závislosti na daném typu materiálu, ochranného plynu a průměru svařovacího drátu a volbu svařování impulsním přenosem. Mimo jiné Puls verze umožňuje stehování, nastavení 9 sekvencí, svařování funkcí DUO Plus. Volbu nastavení parametrů podle tloušťky svařovaného materiálu a deklaraci aktuálních parametrů během svařování. Zdroj je primárně určen pro oblast těžkého průmyslu. [6]

Tab.1: Technická data svařovacího zdroje [6]

Technická data	
Napájecí napětí	3 x 400V ±15%
Pojistky	32 A
Příkon naprázdno	40 VA
Proud činný	25,8 A
Příkon maximální	31 kVa
Napětí naprázdno	83 A
Proudový rozsah	15 - 500 A
Zatěžovatel 20°C 100%	475 A
Zatěžovatel 20°C 70%	500 (80%) A
Zatěžovatel 40°C 100%	420 A
Zatěžovatel 40°C 60%	450 A
Zatěžovatel 40°C 40%	500 (55%) A
Rychlost podávání	0,5 - 24 m/min
Průměr drátu	0,6 - 2,4 mm
Max. průměr cívky	300 mm
Vodní chlazení	True
Třída ochrany	IP23
Hmotnost	88 kg
Rozměry d x š x v	119 x 54,5 x 120 cm



Obr. 19: Migatron Sigma 500 pulse[6]

3.2.2 Přídavný materiál

Drát plný, hlazený **ESAB OK Aristorod 12.50**, Ø 1,2 mm, nepoměděný svařovací drát nové generace je určený pro svařování většiny běžných nelegovaných konstrukčních ocelí především tam, kde jsou vyžadovány vysoké svařovací parametry a nejvyšší podávací rychlosti drátu, tj. na mechanizovaných a robotizovaných pracovištích. [6]

Technické parametry :

doporučený svařovací proud : 120 - 380 A

chemické složení drátu :C 0,1;Si 0,9 ;Mn1,5

mez kluzu 470 MPa

pevnost 560 MPa

tažnost 26%

rychlost podávání 2,5 -15 m/min

výkon navaření kg svar. kovu/hod hoření oblouku 1,3-8

3.2.3. Použité ochranné plyny

Ferromaxx 7

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

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

Díky nízkému rozstříku se zkracuje doba čištění po svařování. Vynikající charakteristiky pulzního oblouku. [6]

Ferromaxx Plus

Je tříložková směs plynu od stejného výrobce jako předchozí plyn. Plyny jsou v poměru 68% Ar, 12% CO₂, 20% He. Směs je určena pro svařování konstrukční uhlíkové oceli.

Zlepšuje kvalitu svaru a omezuje riziko vzniku vad, zajišťuje hluboký průvar a není příliš citlivý na nastavení parametrů při svařování. Má až o 19% vyšší rychlost ručního svařování v porovnání s běžnými směsnými plyny Ar/CO₂.

Hladký a plochý povrch svaru díky sníženému rozstříku. Použitelnost pro všechny tloušťky základního materiálu a druhy přídatných svařovacích materiálů (plné i trubičkové dráty). [6]

3.2.4 Materiál

Pro všechny prováděné experimenty byl použit nejzákladnější materiál – ocel 11373, i přes to že v současné době normy doporučují pro svařování mikrolegované oceli (S 235). Z hlediska námi sledovaných parametrů není v těchto materiálech zásadní rozdíl.

3.3 Návrh parametrů experimentů

Návrh experimentů byl směřován do oblasti zkratované sprchy [1] a dle zavedené metodiky [1] byl pro plyn Ferromaxx 7 (dále “směs 1”) a pro Ferromaxx Plus (dále “směs 2”) proveden metodou středové kompozice, kde

středový bod byl navržen na základě předběžných výsledků [3].

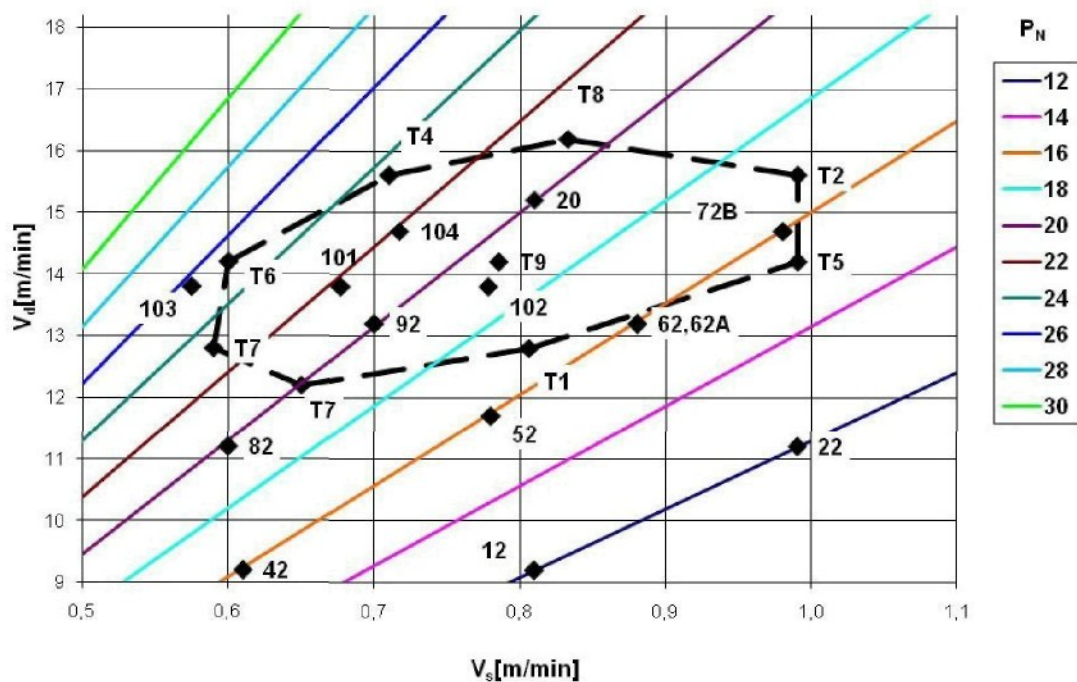
V tabulce 2 je vymezeno parametrické pole - stejné pro obě směsi plynů u 2 zvolených proměnných rychlosti podávání drátu v_d a plochy průřezu návaru P_N . Pomocí této tabulky je vytvořena tabulka experimentů Tab. 3, s doplněnou třetí – dopočítanou hodnotou – rychlosti svařování v_s pro svařované vzorky T1 až T9 pro směs 1 a T11 až T19 pro směs 2.

Tab. 2

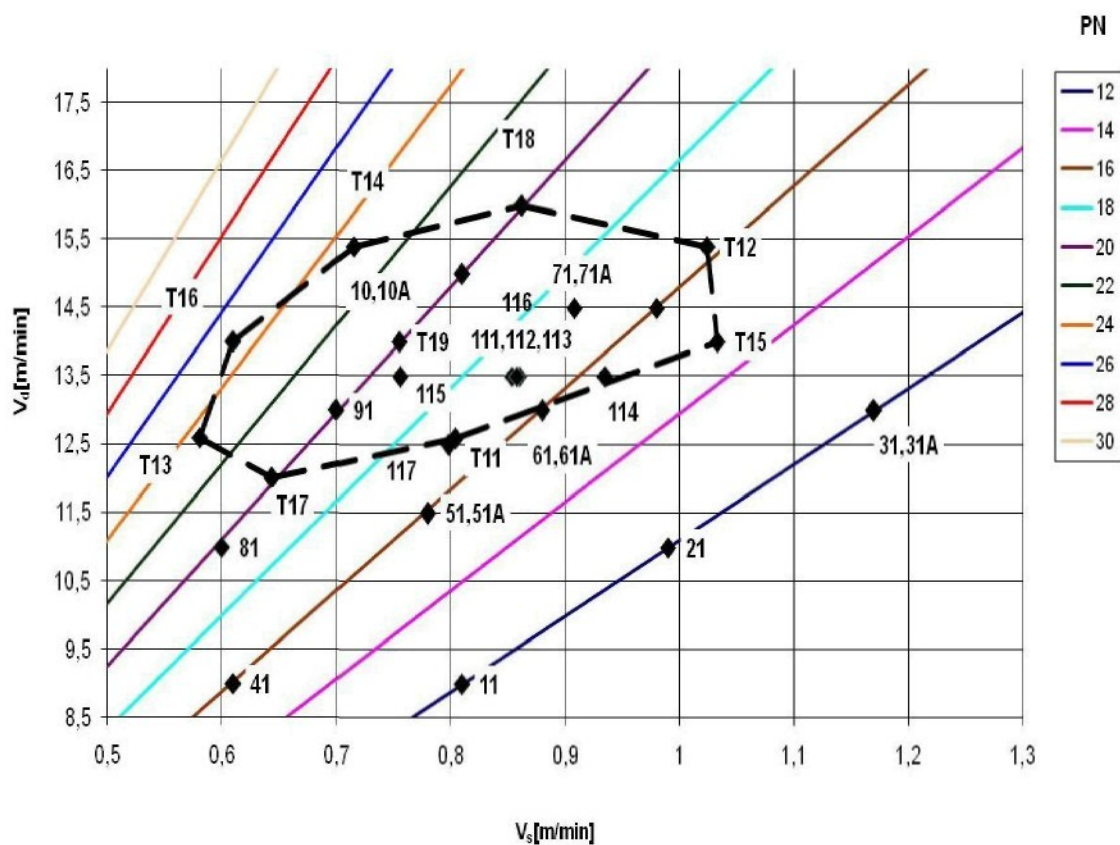
	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$
V_d	11	12,6	14	15,4	16
P_N	14,4	16	20	24	25,6

Tab. 3

rozpis			navržené		
VZ	V_d	P_N	V_d	P_N	V_s
T1(T11)	-1	-1	12,6	16	0,851
T2(T12)	-1	+1	12,6	24	0,567
T3(T13)	+1	-1	15,4	16	1,04
T4(T14)	+1	+1	15,4	24	0,693
T5(T15)	0	$-\sqrt{2}$	14	14,4	1,05
T6(T16)	0	$+\sqrt{2}$	14	25,6	0,591
T7(T17)	$-\sqrt{2}$	0	11	20	0,594
T8(T18)	$+\sqrt{2}$	0	16	20	0,854
T9(T19)	0	0	14	20	0,756



obr.20: Graf závislosti rychlosti svařování na rychlosti drátu pro Ferromaxx 7



Obr. 21: Graf závislosti rychlosti svařování na rychlosti drátu pro Ferromaxx Plus

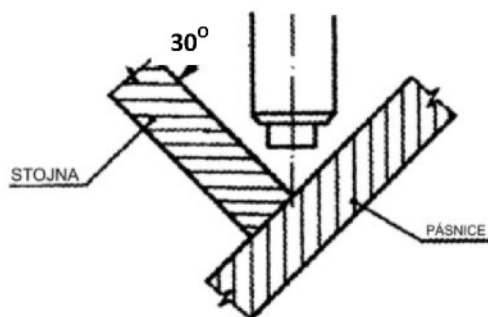
Na grafu na obr. 20 je patrné experimentální pole, navržené podle centrální kompozice pro směs 1, doplněné o již provedené experimenty [3]. Dále tam jsou čtyři potvrzující svary 101 až 104, seskupené kolem předpokládaného optimálního bodu pro zvýšení statistické pravděpodobnosti řešení.

Na grafu na obr. 21 je patrné experimentální pole, navržené podle centrální kompozice pro směs 2, doplněné o již provedené experimenty [3]. Dále tam jsou potvrzující svary 111 až 117, seskupené kolem předpokládaného optimálního bodu (111 až 113 přímo centrální bod) pro zvýšení statistické pravděpodobnosti řešení.

3.4 Svařování vzorků

Svařování bylo provedeno na automatu zvaném pracovišti, sestávajícím z lineárního automatu a pracovního stolu s polohovacím přípravkem.

Vzorek byl polohován 60° (nikoliv 45°) tak, aby maximální závar směřoval do styčné plochy mezi hranou stojny a pásnicí viz obr. 22



Obr. 22: Polohování vzorku

Hořák byl vyosen o excentricitu e dle předchozích experimentů a nastaven 10° dopředu. Úhel a vzdálenost kontaktní špičky byla nastavena měrkou.

Průběh svařování byl monitorován monitorovacím zařízením WeldMonitor, které sestává z průběžného měření proudu, napětí, rychlosti

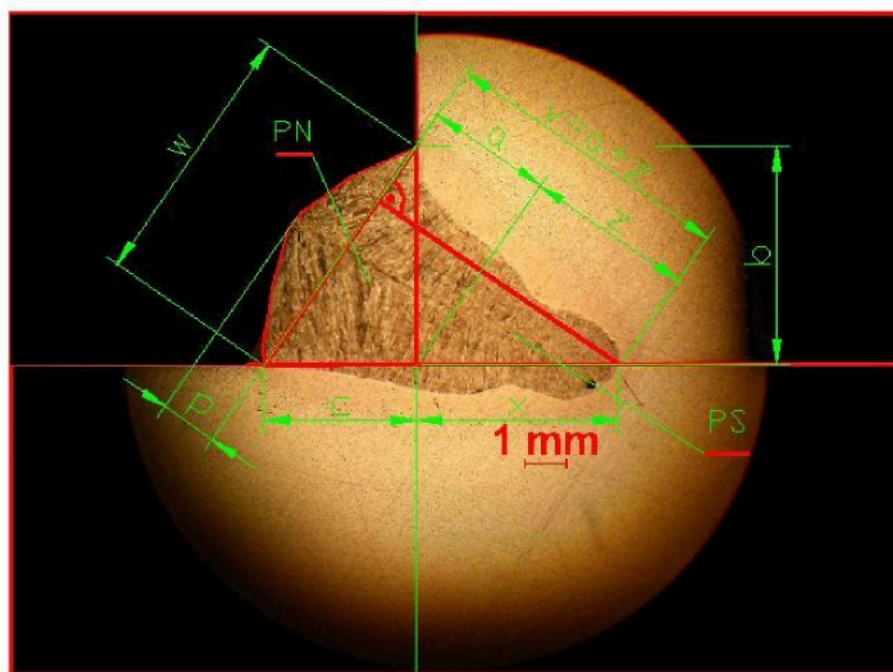
drátu, rychlosti svařování a průtočného množství plynu, které jsme vyřadili, protože jsme použili kalibrovaný nastavitelný ventil.

Příklady záznamů parametrů jsou v příloze.

3.5 Vizuální kontrola a rozměrová analýza svaru

Jednotlivé zkušební vzorky byly získány podélným odříznutím plechu kyslíkem a příčnými řezy na metalografické pile v centrální části, v místě typickém pro celý svar.

Poté byl vzorek zalit do dentakrylu a po jeho vytvrzení byl proveden makrovýbrus na metalografické brusce brusným papírem o velikosti zrn 120, 220, 400 a 600. Konečná mechanická úprava zahrnovala leštění. Vzorky se naleptaly 3% Nital. Snímky makrostruktur svarů, příklad je na obr. 23, byly zhotoveny na metalografickém mikroskopu Neophot 21 digitálním fotoaparátem Nikon Coolpix 995. Snímky se přenesly pomocí paměťové karty do počítače a dále zpracovaly v softwaru NIS-elements.



Obr. 23: Základní rozměry svaru

Pomocí softwaru NIS-Elements se zjistily rozměry svaru a (výška svaru), b a c (odvěsny svaru), v (nosná velikost svaru $v = a + z$), z (max. závar), p (převýšení svaru), w (šířka housenky), velikosti ploch P_s (celková plocha svaru), P_N (plocha návarové části svaru), - viz. obr. 23. Všechny rozměry svaru jsou uvedeny v tabulkách v příloze. Pro plyn Ferromaxx 7 příloha 3 a pro plyn Ferromaxx Plus příloha 4.

Z hlediska platné normy ČSN EN ISO 5817 je limitující hodnotou jakosti svaru z hlediska tvaru – mezních hodnot vad jakosti svaru B, C a D (vysoký, střední a nízký) dle:

- vrubů: $h \leq 0,5 \text{ mm} (1 \text{ mm})$
- převýšení: $r \leq 1 \text{ mm} + 0,1w (1 \text{ mm} + 0,15 w)$
- úhly: $\alpha \geq 90^\circ$ pro nízkou jakost svaru nebo $\alpha \geq 110^\circ$ pro střední a vysokou jakost

Hodnota w je přeponou pravoúhlého trojúhelníku měřených stran b a c .

Svar byl nejdříve vyhodnocen vizuálně s cílem posoudit povrch, kresbu, tvar a pravidelnost svarové housenky po celé délce a plynulost přechodu do základního materiálu.

3.6 Vypočítané hodnoty

Součástí tabulky parametrických údajů měření jsou výpočty měrného vneseného tepla Q_1 , vypočtené plochy návaru P_M a hodnot, které jsou běžně používány pro zhodnocení intenzity procesu – zředění D a účinnosti tavení f_2 .

3.6.1 Metodika 1A(optimalizace pro dosažení první jakosti)

Dle lit. [1] bylo vytvořeno nové kritérium intenzity procesu při dodržení kvality svaru - efektivita provedení koutového svaru FE.

První model "geometrie koutového svaru, řízené hloubkou závaru" je založen na maximální hloubce závaru z [1], jako části účinné výšky, která je v základním materiálu, bez ohledu na skutečnou nosnost svaru (maximální závar nesmí směřovat do stojny). Z hodnoty z se vypočte efektivní účinná

výška svaru v_t pro danou průřezovou plochu návaru P_N . Dosažená hloubka závaru z určuje pro danou plochu jen jednu velikost maximální účinné výšky v_t . Byl vytvořen počítačový program výpočtu v_t pro dané hodnoty z a P_N

$$P_t = V_t \cdot (V_t - z_{1,11}) \cdot \frac{1,111,111}{1,111,111} \quad (1.0)$$

a efektivita provedení koutového svaru byla rozdělena na **efektivitu závaru**

$$PE = z/v_t \quad (1.1)$$

a **efektivitu návaru**, která se počítá pro metodiku 1A

$$DE = (v - z)/(v_t - z), \quad (1.2)$$

kdy je vliv návaru zcela oddělen od působení závaru.

Výpočet **efektivity svaru FE** podle vztahu (1.1, 1.2) a (1.3)

$$FE = PE \cdot DE \quad (1.3)$$

kde je: P_N ... skutečná plocha návaru [mm^2]

V_t ... teoretická výška svaru [mm]

$z_{\max}$... závar [mm]

$v_{\max}$... výška svaru [mm]

PE ... efektivita závaru [-]

DE ... efektivita návaru [-]

FE ... celková efektivita [-]

3.6.1.1 Metodika 1A pro soustavu se směsí 1

Tab. 4: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx 7

	V_d	V_s	$z_{\max}$	$v_{\max}$	P_N	V_t	PE	DE	FE
T2	15,40	0,990	5,12	7,31	18,6	9,04	0,567	0,559	0,317
T3	12,60	0,590	4,64	9,36	27,5	9,54	0,486	0,963	0,468
T4	15,40	0,710	5,41	9,37	28,0	10,29	0,526	0,812	0,427
T5	14,00	0,990	4,29	7,18	16,7	8,05	0,533	0,769	0,410
T6	14,00	0,600	5,00	9,35	28,7	9,98	0,501	0,873	0,437
T9	14,00	0,785	4,63	8,38	23,4	9,12	0,508	0,835	0,424
12	9,00	0,81	2,09	5,4	12,2	5,41	0,386	0,998	0,386
22	11,00	0,99	2,54	5,64	11,6	5,69	0,446	0,982	0,438
42	9,00	0,61	2,38	6,38	16,4	6,38	0,373	0,999	0,372

52	11,50	0,78	2,92	6,77	15,2	6,78	0,431	0,998	0,430
62	13,00	0,88	3,87	7,31	15,9	7,48	0,517	0,952	0,492
72B	14,50	0,98	4,22	7,54	16,7	7,99	0,528	0,881	0,466
82	11,00	0,60	3,66	7,80	19,5	7,80	0,469	0,999	0,469
92	13,00	0,70	4,83	8,83	19,8	8,91	0,542	0,981	0,532
20	15,00	0,81	5,34	8,90	20,5	9,29	0,575	0,901	0,517
32A	13,0	1,17	2,83	5,61	12,5	6,16	0,459	0,834	0,383
62A	13,0	0,88	3,82	7,34	16,1	7,55	0,506	0,944	0,478
101	13,6	0,677	5,33	9,5	24,9	9,91	0,538	0,910	0,489
102	13,6	0,778	4,83	8,77	21,9	9,14	0,528	0,913	0,482
103	13,6	0,575	5,09	9,23	27,3	9,93	0,513	0,855	0,438
104	14,5	0,717	5,78	9,72	25,3	10,36	0,558	0,859	0,479

Každý experimentální svar byl vyhodnocen dle postupu, uvedeného v odst. 3.3.1. Po provedení rozměrové analýzy byla výpočtová část realizována pomocí matematického programu R Gui. Tímto programem byl též proveden výpočet regresních koeficientů metodou nejmenších čtverců, úprava matematických modelů a první derivace regresních funkcí dle jednotlivých parametrů, kterými získáme přesné umístění optimálních bodů, pokud se nacházejí v parametricky vymezeném prostoru.

Výpis hodnot vypočtených koeficientů v programu R-Gui včetně statistických údajů pro posouzení jejich statistické významnosti:

Vypočítané hodnoty z programu R – Gui verze 2.3.0 pro Ferromaxx 7 (první jakost)

```
lm(formula = Ef ~ x1+x2+x12+x22+x1x2
Residuals:   Min     1Q   Median     3Q    Max
              -0,060654 -0,013305 -0,002113  0,013166  0,061954
Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0,503969  0,015824  31,848 3,44e-15***
x1           0,012734  0,015234   0,836 0,41631
x2           0,002614  0,013928   0,188 0,85366
x12          -0,061237  0,015116  -4,051 0,00104**
x22          -0,048764  0,015546  -3,137 0,00679**
x1x2         0,051396  0,023951   2,146 0,048865*
```

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

Residual standard error: 0,03393 on 15 degrees of freedom

Multiple R- Squared: 0,6474, Adjusted R-squared: 0,5299

F- statistic: 5,508 on 5 and 15 DF , p-value: 0,004479

Redukovaný model má velmi jednoduchý tvar a byl testován F-testem, který vykazuje přes 99 % významnosti .

$E = 0,5039688 - 0,06123659 v_d^2 - 0,04876369 P_N^2 + 0,05139634 v_d P_N$

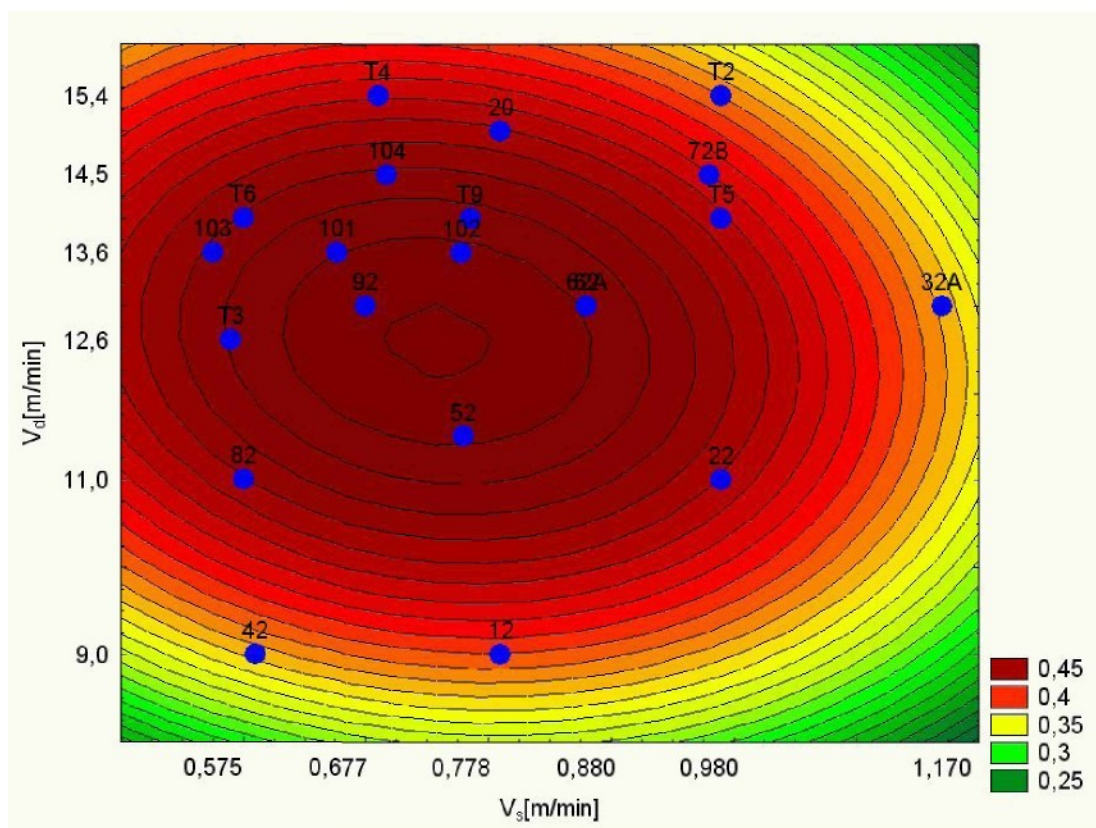
Optimální řešení:

$E = 0,5050476$

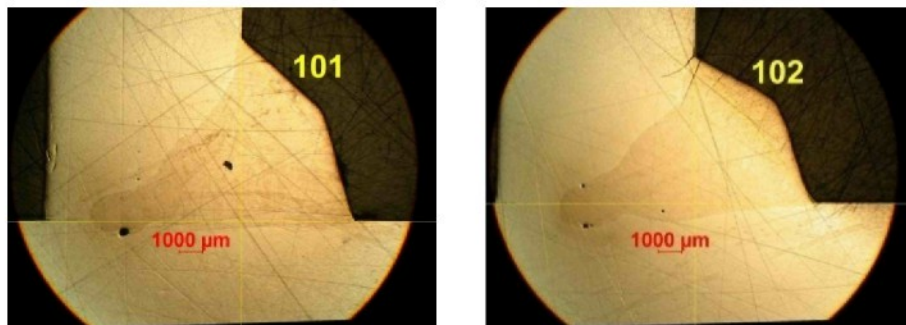
$V_d = 12,53475$

$P_N = 20,78338$

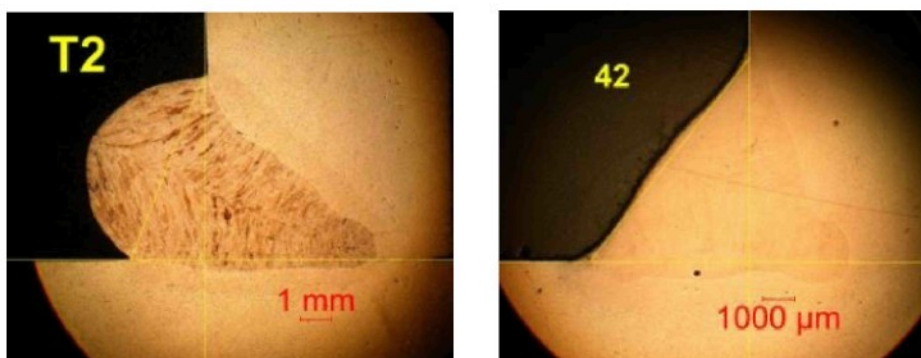
$V_s = 0,6272389$



Obr. 24: Výsledný graf efektivity pro metodiku 1A a pro plyn Ferromaxx 7



Obr. 25: Ukázky svarů, nejbližších optimu



Obr. 26: Ukázky svarů, vzdálených optimu

3.6.1.2 Metodika 1A , směs 1 - diskuze:

Při použití tohoto algoritmu má na výslednou efektivitu velký vliv vnější tvar koutového svaru. To znamená, že svary stečené k pásnici a svary s velkým převýšením jsou vytlačeny na okraj pole efektivy i když mají hluboký závar. Důsledkem je i nižší stabilita pole. Svary 101 a 102 jsou potvrzující svary této série a tak vykazují nejvyšší hodnoty efektivy. Jejich tvar je blízko optimálnímu a napojení svaru na plech je pod větším úhlem než 110° . Naopak svar T2 je kombinací extrémních rychlostí podávání drátu a již při vizuální kontrole je nevyhovující. Svar 42 [3] je velmi pěkný a navíc dobře polohovaný svar z oblasti komerční sprchy ale ve srovnání se svary, zhotovenými zkratovanou sprchou má o 30 % nižší efektivitu.

3.6.1.3 Metodika 1A pro soustavu se směsí 2

Tab. 5: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx Plus

VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _I	PE	DE	FE
T11	12,6	0,804	4,05	7,02	17,9	7,98	0,508	0,756	0,384
T12	15,4	1,024	4,09	7,34	18,6	8,10	0,505	0,811	0,410
T13	12,6	0,581	4,07	8,47	26,0	8,88	0,458	0,915	0,420
T14	15,4	0,716	4,77	8,63	26,3	9,54	0,500	0,809	0,404
T15	14	1,033	4,04	7,1	15,7	7,70	0,525	0,837	0,439
T16	14	0,61	4	8,18	27,9	9,00	0,444	0,836	0,372
T17	12	0,644	3,77	7,83	21,9	8,18	0,461	0,921	0,425
T18	16	0,862	4,86	8,04	22,7	9,26	0,525	0,723	0,380
T19	14	0,76	4,01	7,69	23,1	8,53	0,470	0,815	0,383
11	9	0,81	2,36	5,66	12,0	5,66	0,417	0,999	0,416
21	11	0,99	2,93	6,08	12,3	6,20	0,473	0,963	0,455
31	13	1,17	3,16	5,98	12,2	6,43	0,492	0,863	0,424
41	9	0,61	2,78	6,59	16,4	6,60	0,421	0,998	0,421
51	11,5	0,78	3,54	7,4	16,5	7,41	0,478	0,998	0,477
61	13	0,88	4,16	7,73	16,4	7,83	0,531	0,972	0,517
71	14,5	0,98	4,6	7,88	16,2	8,29	0,555	0,890	0,494
81	11	0,6	3,59	7,95	20,8	7,96	0,451	0,999	0,451
91	13	0,7	4,13	7,94	20,8	8,28	0,499	0,917	0,457
31A	13	1,17	3,03	5,69	12,0	6,27	0,483	0,820	0,396
51A	11,5	0,78	3,52	7,36	16,1	7,37	0,478	0,998	0,477
61A	13	0,88	4,34	7,2	13,8	7,72	0,562	0,847	0,476
71A	14,5	0,98	4,64	7	13,8	7,99	0,581	0,704	0,409
10	15	0,81	4,88	8,37	21,8	9,00	0,542	0,848	0,460
10A	15	0,81	4,18	7,14	16,8	7,96	0,525	0,782	0,411
111	13,5	0,854	5,12	8,02	19,1	9,09	0,563	0,730	0,411
112	13,5	0,86	4,6	7,74	18,0	8,19	0,562	0,875	0,491
113	13,5	0,858	4,97	8,28	19,7	9,02	0,551	0,817	0,450
114	13,5	0,935	4,03	7,48	17,9	7,96	0,506	0,878	0,445
115	13,5	0,756	5,07	8,46	21,2	9,28	0,55	0,80	0,44
116	14,5	0,908	5,18	8,64	18,6	9,09	0,57	0,89	0,50
117	12,5	0,798	4,12	7,42	19,2	8,19	0,50	0,81	0,41

Dále je opět uveden výpis hodnot vypočtených koeficientů v programu R-Gui včetně statistických údajů pro posouzení jejich statistické významnosti.

**Vypočítané hodnoty z programu R – Gui verze 2.3.0 pro Ferromaxx Plus
(první jakost)**

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

Residuals: Min 1Q Median 3Q Max
 -0,074317 -0,016181 -0,005499 0,019618 0,072499

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

(Intercept) 0,451500 0,011963 37,740 2e-16***

x1 -0,002998 0,014924 -0,201 0,8424

x2 -0,027016 0,013052 -2,070 0,0489*

x12 -0,021529 0,015399 -1,398 0,1744

x22 -0,020548 0,012334 -1,666 0,1082

x1x2 0,012618 0,021912 0,576 0,5699

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

Residual standard error: 0,03797 on 25 degrees of freedom

Multiple R- Squared: 0,2999, Adjusted R-squared: 0,1599

F- statistic: 2,142 on 5 and 25 DF, p-value: 0,09338

Redukovaný model má velmi jednoduchý tvar a byl testován F -testem, který vykazuje cca 91 % významnosti.

E= 0,4515000 -0,02701599 P_N

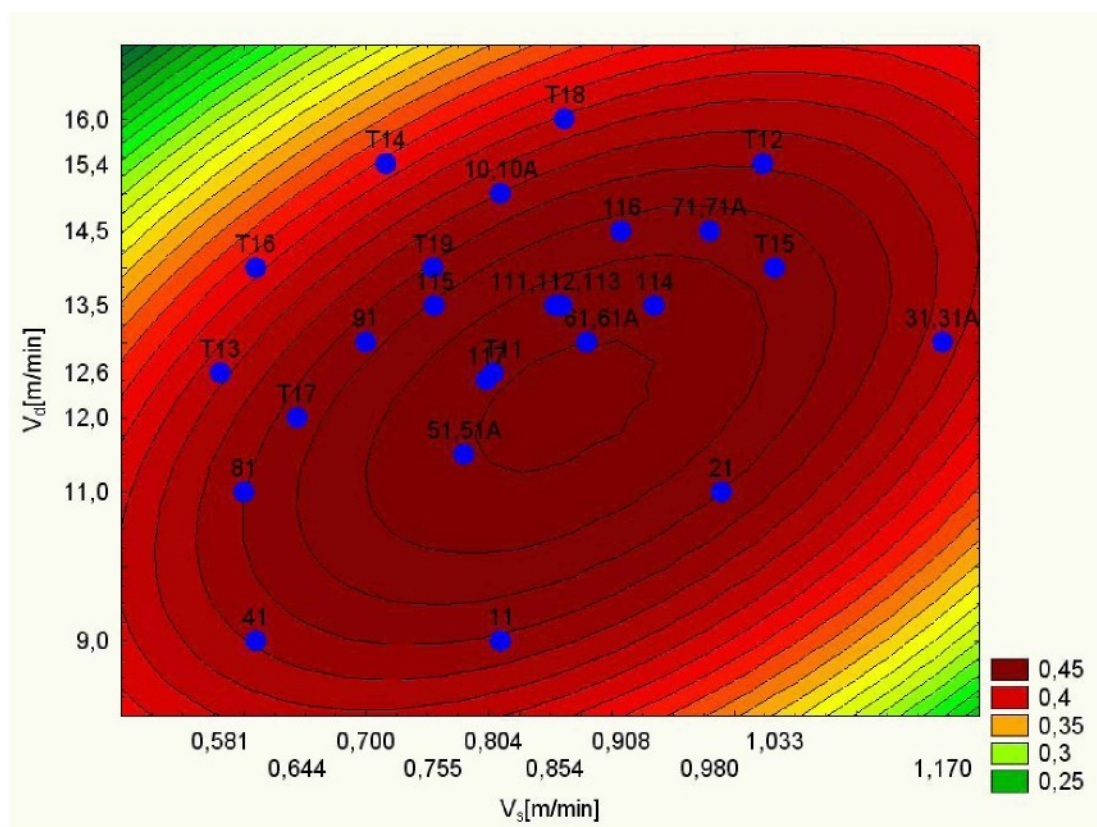
Optimální řešení:

E= 0,4620078

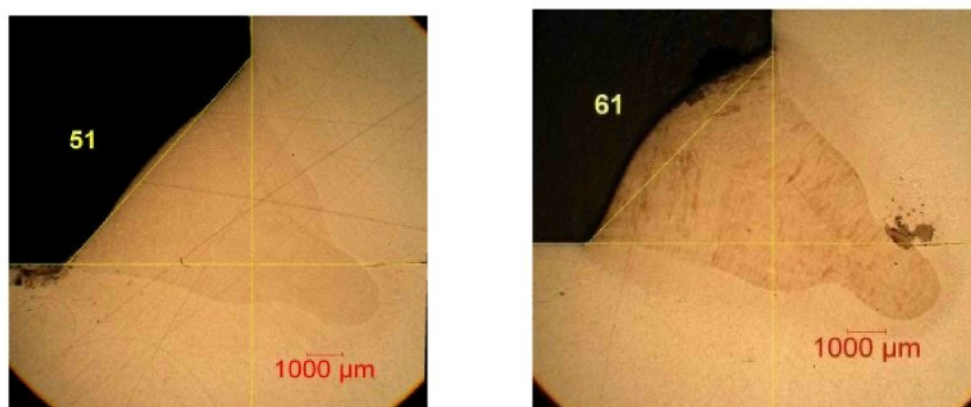
V_d = 11,78668

P_N = 15,75693

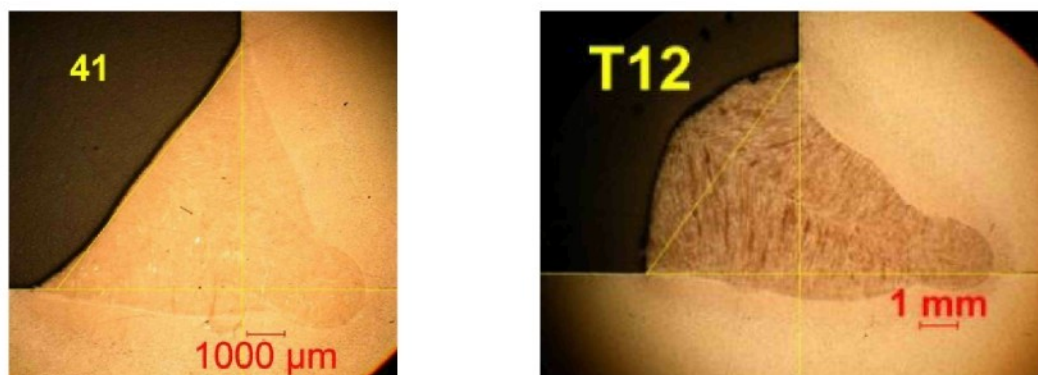
V_s = 0,777953



Obr. 27: Výsledný graf efektivity pro metodiku 1A a pro plyn Ferromaxx Plus



Obr. 28: Ukázky svarů, nejbližších optimu



Obr. 29: Ukázky svarů, vzdálených optimu

3.6.1.4 Metodika 1A , směs 2 - diskuze:

I v tomto případě je patrný velký vliv tvaru svaru. Pole s nejvyšší efektivitou je roztaženo od hodnot, srovnatelných se směsí 1 až po hodnoty o 10 % vyšší rychlosti drátu a dokonce o 40 % vyšší rychlosti svařování, tam už ale úhel napojení svaru na pásnici nedosahuje hranice 110° .

Stejně jako v předchozím případě má svar T12 s hlubokým závarem, ale velkým převýšením, nicméně ještě přípustným, stejnou efektivitu provedení jako ukázkový svar, zhotovený konvenční sprchou 41 [3]. Ten však má o 11 % menší nosnost a dokonce o 68 % nižší produktivitu (rychlost svařování).

3.6.2 Metodika 1B (optimalizace pro druhou jakost)

Algoritmus výpočtu efektivity provedení koutového svaru se liší jen výpočtem DE (1.4), která jen koriguje vliv závaru při nadměrném převýšení nebo nepravdelnosti tvaru svaru.

$$DE = \frac{l_{1111}}{l_1} \quad (1.4)$$

3.6.2.1 Metodika 1B pro soustavu se směsí 1

Tab. 6: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx 7

VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
T2	15,4	0,99	5,12	7,31	18,6	9,04	0,567	0,809	0,458
T3	12,6	0,59	4,64	9,36	27,5	9,54	0,486	0,981	0,477
T4	15,4	0,71	5,41	9,37	28,0	10,29	0,526	0,911	0,479
T5	14	0,99	4,29	7,18	16,7	8,05	0,533	0,892	0,476
T6	14	0,6	5	9,35	28,7	9,98	0,501	0,937	0,469
T9	14	0,785	4,63	8,38	23,4	9,12	0,508	0,919	0,466
12	9	0,81	2,09	5,4	12,2	5,41	0,387	0,999	0,386
22	11	0,99	2,54	5,64	11,6	5,69	0,446	0,990	0,442
42	9	0,61	2,38	6,38	16,4	6,38	0,373	0,999	0,373
52	11,5	0,78	2,92	6,77	15,2	6,78	0,431	0,999	0,430
62	13	0,88	3,87	7,31	15,9	7,48	0,517	0,977	0,505

72B	14,5	0,98	4,22	7,54	16,7	7,99	0,528	0,944	0,499
82	11	0,6	3,66	7,8	19,5	7,80	0,469	1,000	0,469
92	13	0,7	4,83	8,83	19,8	8,91	0,542	0,991	0,537
20	15	0,81	5,34	8,9	20,5	9,29	0,575	0,958	0,550
32A	13	1,17	2,83	5,61	12,5	6,16	0,459	0,910	0,418
62A	13	0,88	3,82	7,34	16,1	7,55	0,506	0,973	0,492
101	13,6	0,677	5,33	9,5	24,9	9,91	0,538	0,959	0,516
102	13,6	0,778	4,83	8,77	21,9	9,14	0,528	0,959	0,507
103	13,6	0,575	5,09	9,23	27,3	9,93	0,513	0,929	0,476
104	14,5	0,717	5,78	9,72	25,3	10,36	0,558	0,938	0,523

Dále je opět uveden výpis hodnot vypočtených koeficientů v programu R-Gui včetně statistických údajů pro posouzení jejich statistické významnosti.

Vypočítané hodnoty z programu R – Gui verze 2.3.0 pro Ferromaxx 7 (druhá jakost)

```
lm(formula = Ef ~ x1+x2+x12+x22+x1x2
Residuals:  Min    1Q  Median    3Q   Max
          -0,047531 -0,009022 -0,003056  0,012790  0,026547
```

```
Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0,503055   0,009222  54,548 2e-16***
```

```
x1      0,036157   0,008878   4,073 0,001000**
```

```
x2      0,002231   0,008117   0,275 0,787222
```

```
x12     -0,032908   0,008809  -3,736 0,001989**
```

```
x22     -0,037711   0,009060  -4,162 0,000834***
```

```
x1x2     0,029709   0,013959   2,128 0,050291
```

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

```
Residual standard error: 0,01977 on 15 degrees of freedom
```

```
Multiple R- Squared: 0,835, Adjusted R-squared: 0,78
```

```
F- statistic: 15,18 on 5 and 15 DF, p-value: 2,078e-05
```

```
Redukovaný model i při zjednodušeném tvaru má vysoké hodnoty F-testu – téměř 100 % pravděpodobnosti.
```

```
E= 0,5030549 +0,03615726 v_d -0,03290831 v_d^2 -0,03771147 P_N^2
```

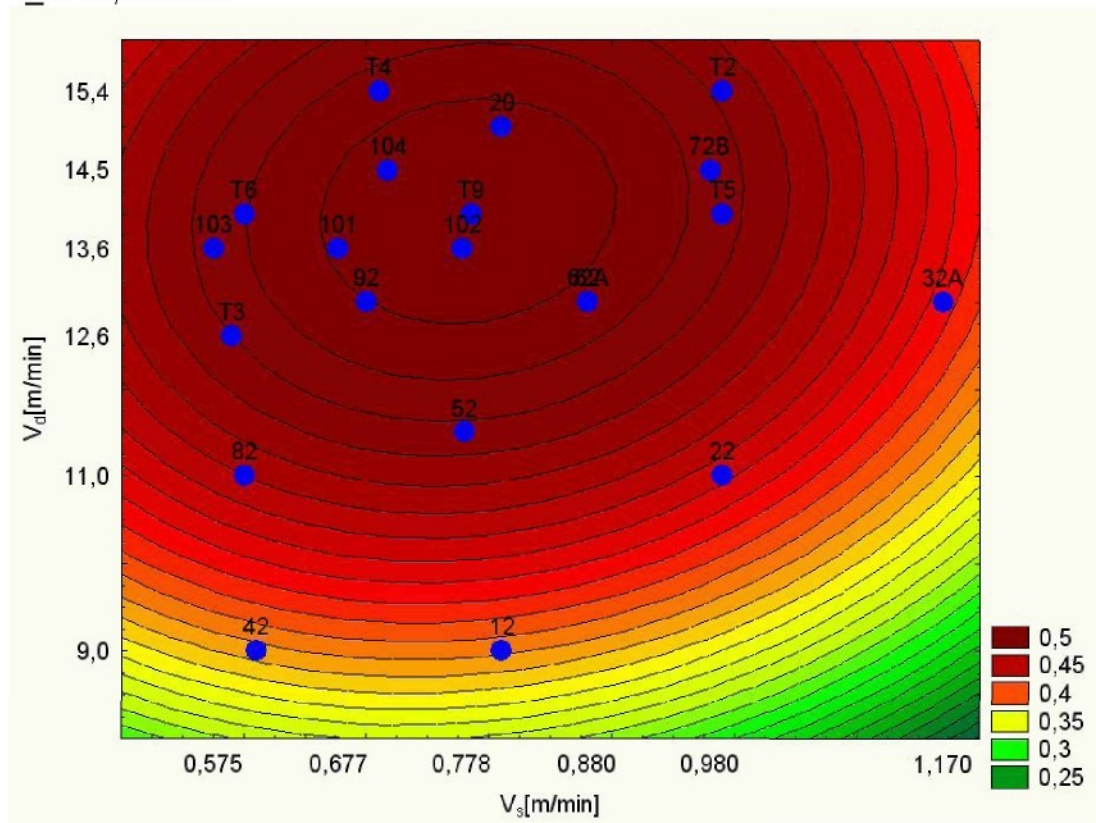
Optimální řešení:

$E = 0,5157615$

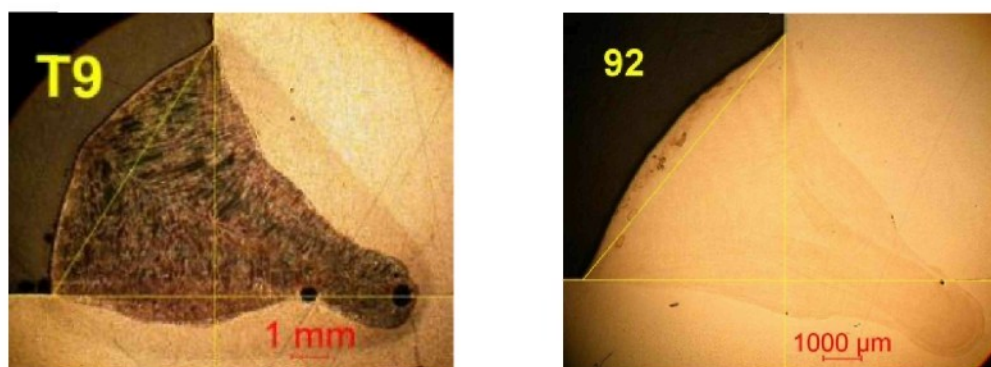
$V_d = 13,74862$

$P_N = 21,95865$

$V_s = 0,651159$



Obr. 30: Výsledný graf efektivity pro metodiku 1B a pro plyn Ferromaxx 7



Obr. 31: Ukázky svarů poblíž maxima efektivity

3.6.2.2 Metodika 1B , směs 1 - diskuze:

V tomto případě je vliv tvaru svaru evidentně potlačen. Pole s nejvyšší efektivitou je posazeno na hodnoty o kousek vyšší rychlosti drátu a zahrnuje i svary na hranici tvarové přijatelnosti. Kromě již zobrazených svarů 101, 102,

104 se tu objevují svary, jejichž napojení na pásnici se blíží 90°. Konvenční svary s mělkým závarem jsou evidentně znevýhodněny.

Maximální efektivita provedení svaru se tak reálně blíží maximální použitelné produktivitě svařování. Důležitým faktorem je zde statistická pravděpodobnost, která se blíží 100 % a celková stabilita statistických hodnot, která je podstatně vyšší než v předchozím případě a není problém uzavřít pole efektivit při menším počtu provedených experimentů.

3.6.2.3 Metodika 1B pro soustavu se směsí 2

Tab. 7: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx Plus

VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
T11	12,6	0,804	4,05	7,02	17,9	7,98	0,508	0,880	0,447
T12	15,4	1,024	4,09	7,34	18,6	8,10	0,505	0,907	0,458
T13	12,6	0,581	4,07	8,47	26,0	8,88	0,458	0,954	0,437
T14	15,4	0,716	4,77	8,63	26,3	9,54	0,500	0,905	0,452
T15	14	1,033	4,04	7,1	15,7	7,70	0,525	0,922	0,484
T16	14	0,61	4	8,18	27,9	9,00	0,444	0,909	0,404
T17	12	0,644	3,77	7,83	21,9	8,18	0,461	0,957	0,441
T18	16	0,862	4,86	8,04	22,7	9,26	0,525	0,869	0,456
T19	14	0,76	4,01	7,69	23,1	8,53	0,470	0,902	0,424
11	9	0,81	2,36	5,66	12,0	5,66	0,417	1,000	0,417
21	11	0,99	2,93	6,08	12,3	6,20	0,473	0,981	0,463
31	13	1,17	3,16	5,98	12,2	6,43	0,492	0,930	0,457
41	9	0,61	2,78	6,59	16,4	6,60	0,421	0,999	0,421
51	11,5	0,78	3,54	7,4	16,5	7,41	0,478	0,999	0,478
61	13	0,88	4,16	7,73	16,4	7,83	0,531	0,987	0,524
71	14,5	0,98	4,6	7,88	16,2	8,29	0,555	0,951	0,528
81	11	0,6	3,59	7,95	20,8	7,96	0,451	0,999	0,451
91	13	0,7	4,13	7,94	20,8	8,28	0,499	0,959	0,478
31A	13	1,17	3,03	5,69	12,0	6,27	0,483	0,907	0,438
51A	11,5	0,78	3,52	7,36	16,1	7,37	0,478	0,999	0,478
61A	13	0,88	4,34	7,2	13,8	7,72	0,562	0,933	0,525
71A	14,5	0,98	4,64	7	13,8	7,99	0,581	0,876	0,509
10	15	0,81	4,88	8,37	21,8	9,00	0,542	0,930	0,505
10A	15	0,81	4,18	7,14	16,8	7,96	0,525	0,897	0,471
111	13,5	0,854	5,12	8,02	19,1	9,09	0,563	0,882	0,496
112	13,5	0,86	4,6	7,74	18,0	8,19	0,562	0,945	0,531

113	13,5	0,858	4,97	8,28	19,7	9,02	0,551	0,918	0,505
114	13,5	0,935	4,03	7,48	17,9	7,96	0,506	0,940	0,476
115	13,5	0,756	5,07	8,46	21,2	9,28	0,546	0,911	0,498
116	14,5	0,908	5,18	8,64	18,6	9,09	0,570	0,951	0,542
117	12,5	0,798	4,12	7,42	19,2	8,19	0,503	0,906	0,455

Dále je opět uveden výpis hodnot vypočtených koeficientů v programu R-Gui včetně statistických údajů pro posouzení jejich statistické významnosti.

Vypočítané hodnoty z programu R – Gui verze 2.3.0 pro Ferromaxx Plus (druhá jakost)

```
lm(formula = Ef ~ x1+x2+x12+x22+x1x2
Residuals:  Min    1Q   Median     3Q    Max
          -0,043800 -0,019163 -0,001382  0,018861  0,047886
```

```
Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0,480938  0,008751  54,955 2e-16***
```

```
x1    -0,026819  0,010917  2,457 0,02131*
```

```
x2    -0,032550  0,009548 -3,409 0,00222**
```

```
x12   -0,020242  0,011264 -1,797 0,08442
```

```
x22   -0,023471  0,009023 -2,601 0,01538*
```

```
x1x2   0,010477  0,016029  0,654 0,51930
```

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

```
Residual standard error: 0,02778 on 25 degrees of freedom
```

```
Multiple R- Squared: 0,5218, Adjusted R-squared: 0,4261
```

```
F- statistic: 5,455 on 5 and 25 DF , p-value: 0,001580
```

```
Opět dostáváme jen mírně zjednodušený tvar modelu, jehož hladina
```

významnosti F-testem dosahuje téměř 100 %.

```
E= 0,480938 +0,02681903 v_d -0,03255043 P_N -0,02347079 P_N^2
```

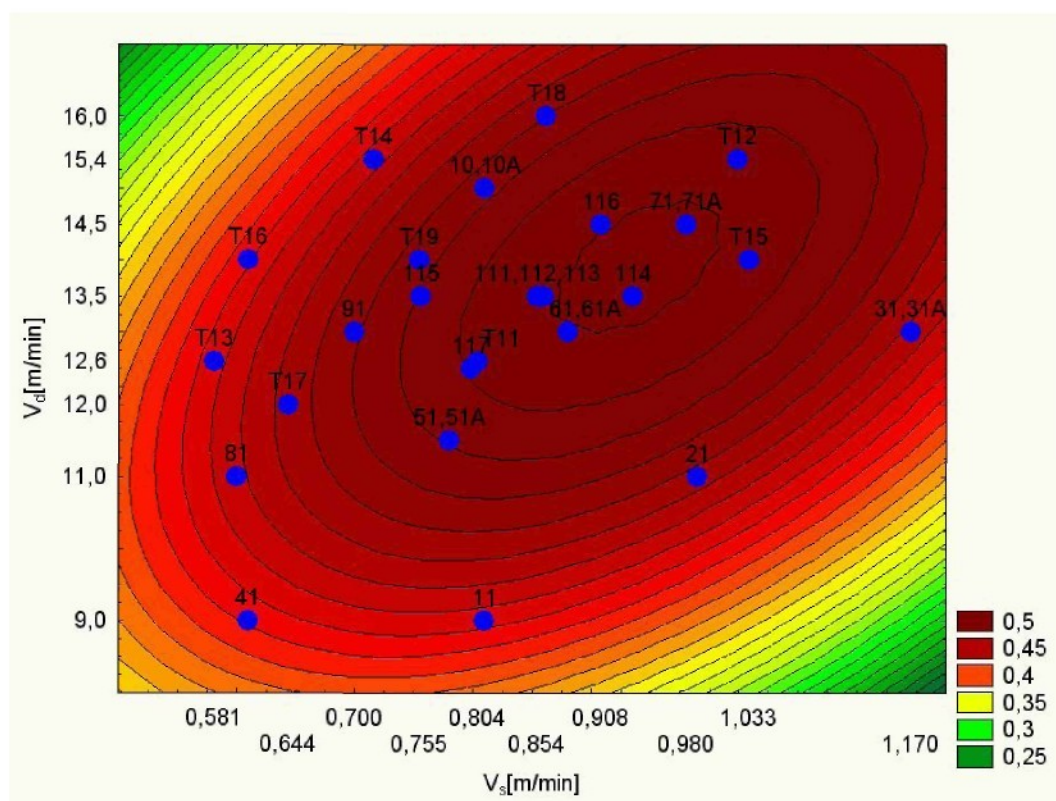
```
Optimální řešení:
```

```
E= 0,4972352
```

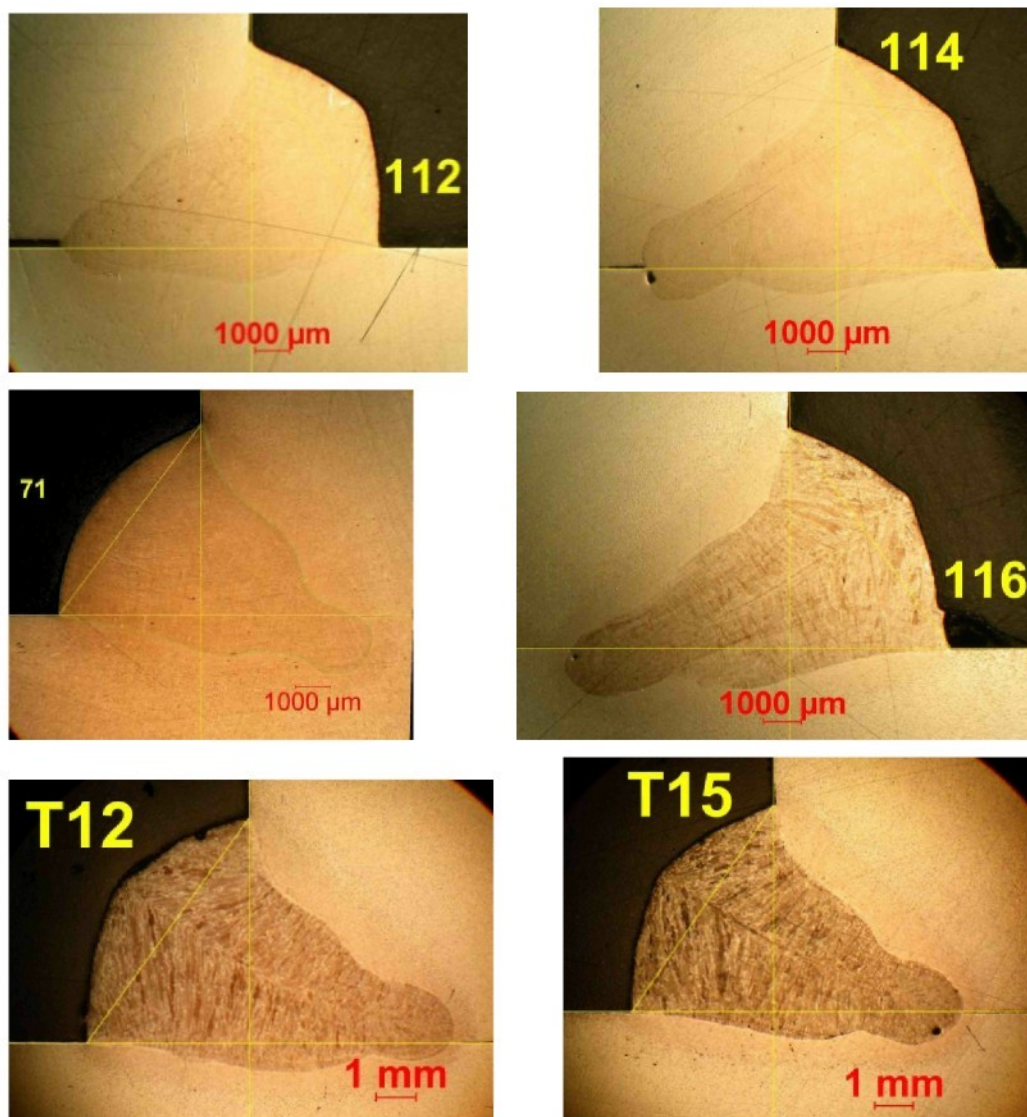
```
V_d = 13,76861
```

```
P_N = 16,69507
```

```
V_s = 0,8576996
```



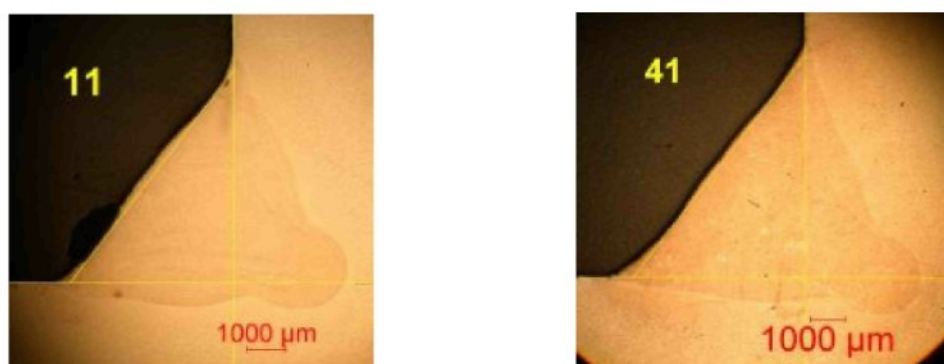
Obr. 32: Výsledný graf efektivity pro metodiku 1B a pro plyn Ferromaxx Plus



Obr. 33: Ukázky svarů blízko optima

3.6.2.4 Metodika 1B , směs 2 - diskuze:

Snížení vlivu DE na celkovou efektivitu se projevilo v podstatném rozšíření počtu efektivních svarů, z nichž část má napojení na pásnici téměř 90° . Mezi svary s nejnižší efektivitou opět patří svary, provedené konvenční sprchou.



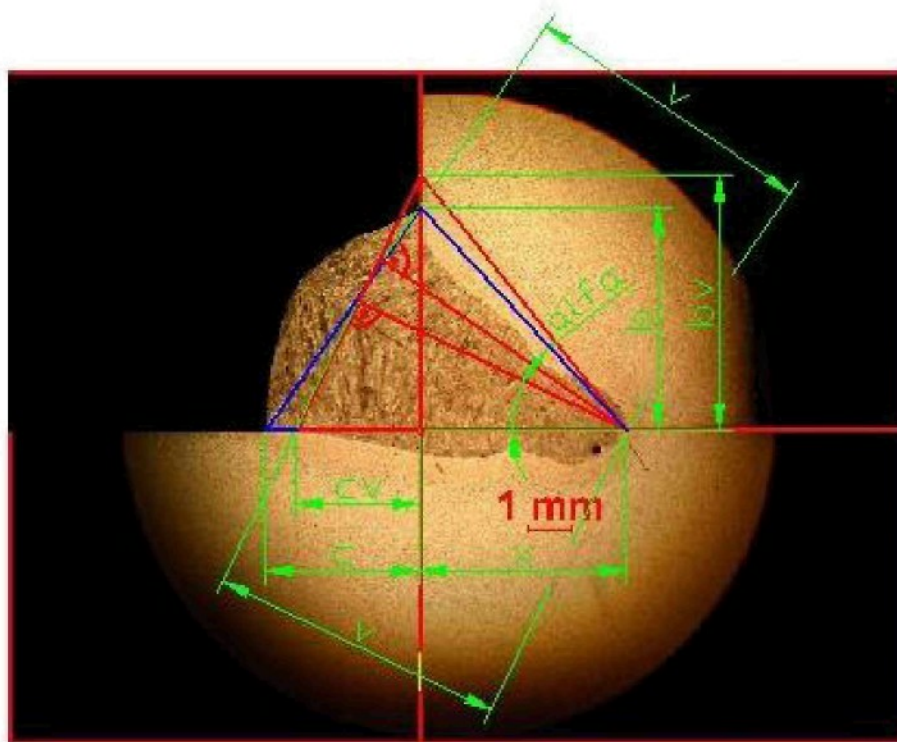
Obr. 34: Ukázky svarů, zhotovených konvenční sprchou [3].

I zde platí, že maximální efektivita provedení svaru se blíží maximální použitelné produktivitě svařování. Důležitým faktorem je zde statistická pravděpodobnost, která je téměř 100 % a celková stabilita statistických hodnot, která je podstatně vyšší než v předchozím případě a není problém uzavřít pole efektivity při menším počtu provedených experimentů.

3.6.3 Metodika 2

3.6.3.1 Metodika 2 pro soustavu se směsí 1

Druhý model (porovnávací) vychází z pokusu vyjádřit u koutových závarových svarů hodnotu overweldingu, podobně jako u výplňového svaru. Skutečný a efektivní svar mají stejnou osovou hloubku závaru x a skutečně naměřenou účinnou výšku v . Matematicky vyjádříme minimální plochu P_t návaru $P_t = f(x, v)$ tak, aby tvořila rovnoramenný trojúhelník se stejnou účinnou výškou. Efektivita závaru vychází ze skutečně naměřených hodnot osového závaru a účinné výšky: $PE = x/v$ a efektivita návaru je obrácenou hodnotou overweldingu - podílem ideální a skutečné plochy: $DE = P_t/P_N$.



Obr. 35: Náskres svaru pro metodiku 2

$$PE = \frac{1}{1} \quad DE = \frac{1}{1} \quad (2.1, 2.2)$$

Výpočet efektivity FE podle vztahu (2.5, 2.6) a (2.7)

$$FE = PE \cdot DE \quad (2.3)$$

kde je:

P_N ... skutečná plocha návaru [mm^2]

c_v ... vypočítaná hodnota trojúhelníku [mm]

b_v ... vypočítaná hodnota trojúhelníku [mm]

x ... osový závar ve směru osy x [mm]

v ... výška svaru [mm]

α ... úhel [°]

c ... [mm]

P_t ... teoretická plocha [mm^2]

PE ... efektivita závaru [-]

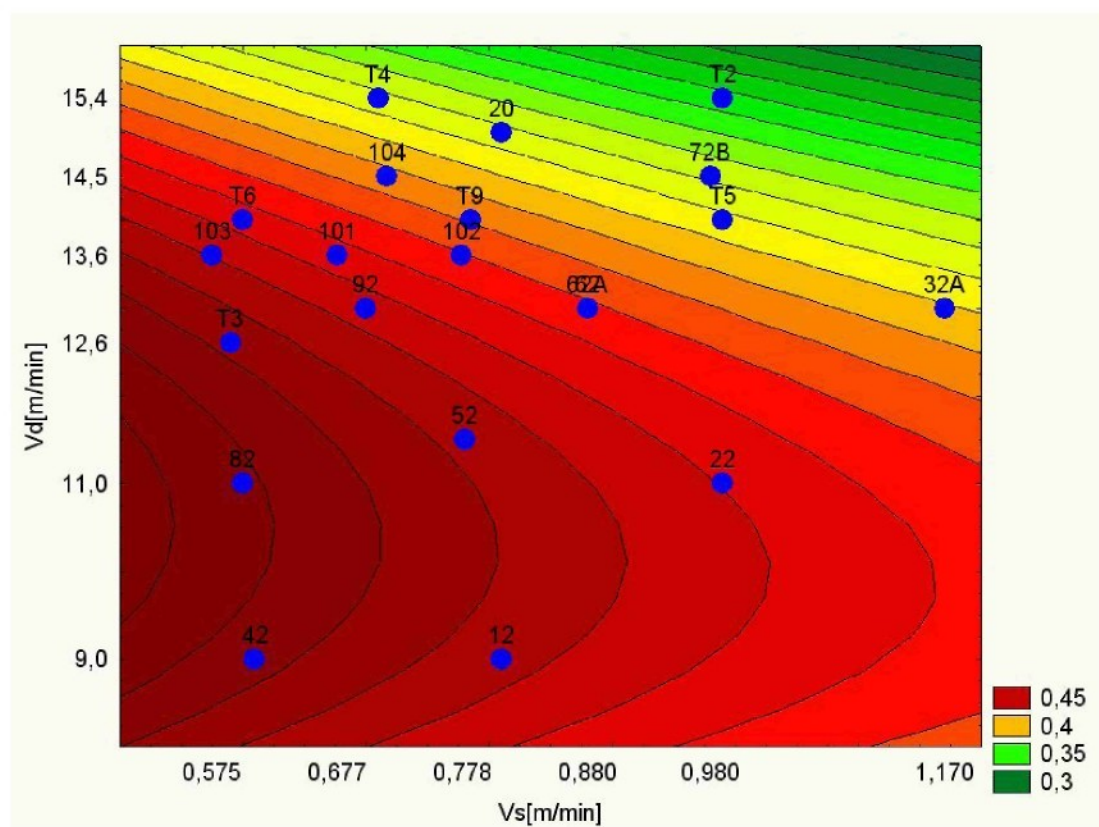
DE ... efektivita návaru [-]

FE ... celková efektivita [-]

Tab. 8: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx 7

VZ	Vd	Vs	x	v	P_N	c_v	b_v	alfa	P_t	PE	DE	FE
T2	15,4	0,99	5,59	7,31	18,6	2,32	5,60	22,5	6,5	0,765	0,35	0,268
T3	12,6	0,59	5,76	9,36	27,5	4,91	8,98	28,7	22,0	0,615	0,802	0,493
T4	15,4	0,71	5,7	8,6	28,0	3,94	7,78	26,9	15,3	0,663	0,547	0,363
T5	14	0,99	4,86	7,18	16,7	3,15	6,37	26,3	10,0	0,677	0,601	0,407
T6	14	0,6	5,74	8,94	28,7	4,36	8,30	27,7	18,1	0,642	0,631	0,405
T9	14	0,785	5,49	8,38	23,4	3,93	7,66	27,2	15,0	0,655	0,643	0,421
12	9	0,81	2,52	5,4	12,2	3,96	5,97	33,6	11,8	0,467	0,973	0,454
22	11	0,99	2,97	5,52	11,6	3,49	5,74	31,3	10,0	0,538	0,864	0,465
42	9	0,61	3,05	6,38	16,4	4,58	6,99	33,2	16,0	0,478	0,976	0,466
52	11,5	0,78	2,6	5,59	15,2	4,11	6,19	33,6	12,7	0,465	0,837	0,389
62	13	0,88	2,77	5,43	15,9	3,65	5,79	32,2	10,6	0,51	0,664	0,339
72B	14,5	0,98	4,48	6,88	16,7	3,26	6,32	27,3	10,3	0,651	0,617	0,402
82	11	0,6	4,39	7,8	19,5	4,66	7,92	30,5	18,5	0,563	0,946	0,533
92	13	0,7	4,28	7,3	19,8	4,12	7,23	29,7	14,9	0,586	0,753	0,441
20	15	0,81	5,65	8,32	20,5	3,63	7,36	26,2	13,3	0,679	0,651	0,442
32A	13	1,17	3,42	5,61	12,5	2,99	5,42	28,9	8,1	0,61	0,647	0,394
62A	13	0,88	4,54	7,06	16,1	3,43	6,55	27,6	11,2	0,643	0,697	0,449

101	13,6	0,677	6,45	9,5	24,9	4,14	8,40	26,2	17,4	0,679	0,699	0,474
102	13,6	0,778	5,77	8,41	21,9	3,58	7,36	26,0	13,2	0,686	0,602	0,413
103	13,6	0,575	5,81	8,81	27,3	4,08	8,00	27,0	16,3	0,659	0,598	0,394
104	14,5	0,717	6,47	9,32	25,3	3,87	8,06	25,6	15,6	0,694	0,617	0,428



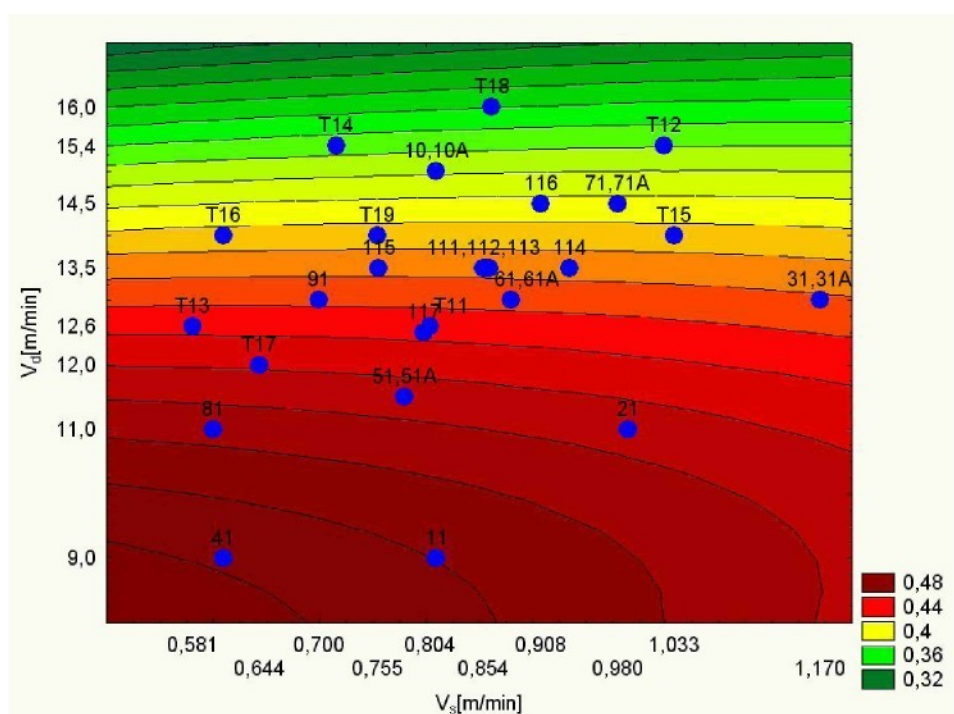
Obr. 36: Výsledný graf efektivity pro metodiku 2 a pro plyn Ferromaxx 7

3.6.3.2 Metodika 2 pro soustavu se směsí 2

Tab. 9: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx Plus

VZ	V _d	V _s	x	v	P _N	c _v	b _v	alfa	P _t	PE	DE	FE
T11	12,6	0,804	4,52	7,02	17,9	3,40	6,51	27,6	11,1	0,644	0,618	0,398
T12	15,4	1,024	5,05	7,34	18,6	3,11	6,41	25,9	10,0	0,688	0,535	0,368
T13	12,6	0,581	5,08	8,47	26,0	4,63	8,27	29,2	19,1	0,6	0,735	0,441
T14	15,4	0,716	5,28	8,19	26,3	3,96	7,58	27,6	15,0	0,645	0,571	0,368
T15	14	1,033	4,92	7,1	15,7	2,96	6,15	25,7	9,1	0,693	0,58	0,402
T16	14	0,61	4,77	8,18	27,9	4,66	8,13	29,8	18,9	0,583	0,679	0,396
T17	12	0,644	4,62	7,83	21,9	4,38	7,73	29,6	16,9	0,59	0,773	0,456
T18	16	0,862	5,5	7,76	22,7	3,06	6,56	25,0	10,1	0,709	0,443	0,314
T19	14	0,76	4,47	7,23	23,1	3,76	6,91	28,6	13,0	0,618	0,563	0,348
11	9	0,81	2,9	5,66	12,0	3,79	6,02	32,1	11,4	0,512	0,95	0,487

21	11	0,99	3,37	5,9	12,3	3,46	5,94	30,2	10,3	0,571	0,834	0,477
31	13	1,17	3,72	5,98	12,2	3,08	5,69	28,4	8,8	0,622	0,718	0,447
41	9	0,61	3,26	6,46	16,4	4,39	6,92	32,4	15,2	0,505	0,926	0,467
51	11,5	0,78	3,4	6,3	16,5	3,97	6,54	31,3	13,0	0,54	0,787	0,425
61	13	0,88	3,71	6,17	16,4	3,36	6,01	29,2	10,1	0,601	0,615	0,37
71	14,5	0,98	4,42	7	16,2	3,51	6,59	28,1	11,6	0,631	0,714	0,451
81	11	0,6	4,8	8	20,8	4,37	7,81	29,2	17,0	0,6	0,819	0,492
91	13	0,7	4,72	7,74	20,8	4,12	7,47	28,9	15,4	0,61	0,738	0,45
31A	13	1,17	3,67	5,64	12,0	2,68	5,18	27,4	6,9	0,651	0,578	0,376
51A	11,5	0,78	4,39	7,28	16,1	3,94	7,08	29,1	14,0	0,603	0,867	0,523
61A	13	0,88	4,92	7,2	13,8	3,10	6,33	26,1	9,8	0,683	0,71	0,485



Obr. 37: Výsledný graf efektivity pro metodiku 2 a pro plyn Ferromaxx Plus

3.6.3.3 Metodika 2 , směs 1 a 2 - diskuze:

U této metodiky se pole neuzavřelo (Obr 36 a37) ani pro výběrové skupiny svarů u směsi 1 i 2. Jednoznačným závěrem je, že tento výpočtový algoritmus se k optimalizaci nehodí.

3.6.4 Metodika 3

3.6.4.1 Metodika 3 pro soustavu se směsí 1

Třetí model (technologický) vychází z faktu, že plocha návaru, stejně jako hloubka závaru je závislá na velikosti proudu. S nižší hodnotou proudu při nižší rychlosti drátu, kterou nastavíme pro požadovanou menší plochu návaru, nedosáhneme stejné hloubky závaru. Plocha musí být při přepočtu konstantní. To znamená, že ideální nosná výška, která odpovídá ideální ploše, bude větší než skutečná – jako u modelu 1. Rozdíl je v tom, že tento model započítává nepřesnost vyosení hořáku.

PE je poměr skutečného osového závaru a ideální výšky: $PE = x/v_t$. **DE** je opět poměr skutečné výšky svaru k ideální v/v_t jako u metodiky 1B a zahrnuje ztráty převýšením a nerovnoměrností trojúhelníka. Tento algoritmus, i když je podobný prvnímu algoritmu, je matematicky nejsložitější, protože vede k řešení kvartické rovnice. Proti první metodice neřeší jen maximální závar ideálního svaru, ale vychází z konstrukčně i technologicky reálných podmínek a reálné je i zobrazení ideálního tvaru koutového svaru, který závarem i plochou odpovídá skutečnému a jehož rozměry můžeme spočítat a nakreslit. Na druhou stranu vyžaduje větší přesnost provedení svaru, zejména míru vyosení hořáku. Svary, jejichž maximální závar nejde do mezery, ale do pásnice silně zkreslují výsledky.



Výpočet efektivity FE:

kde je:

P_N ... skutečná plocha návaru [mm²]

c_v ... vypočítaný rozměr trojúhelníku [mm]

b_v ... vypočítaný rozměr trojúhelníku [mm]

x ...osový závar ve směru osy x [mm]

v ...výška svaru [mm]

v_t ... teoretická výška svaru [mm]

c ...rozměr trojúhelníku[mm]

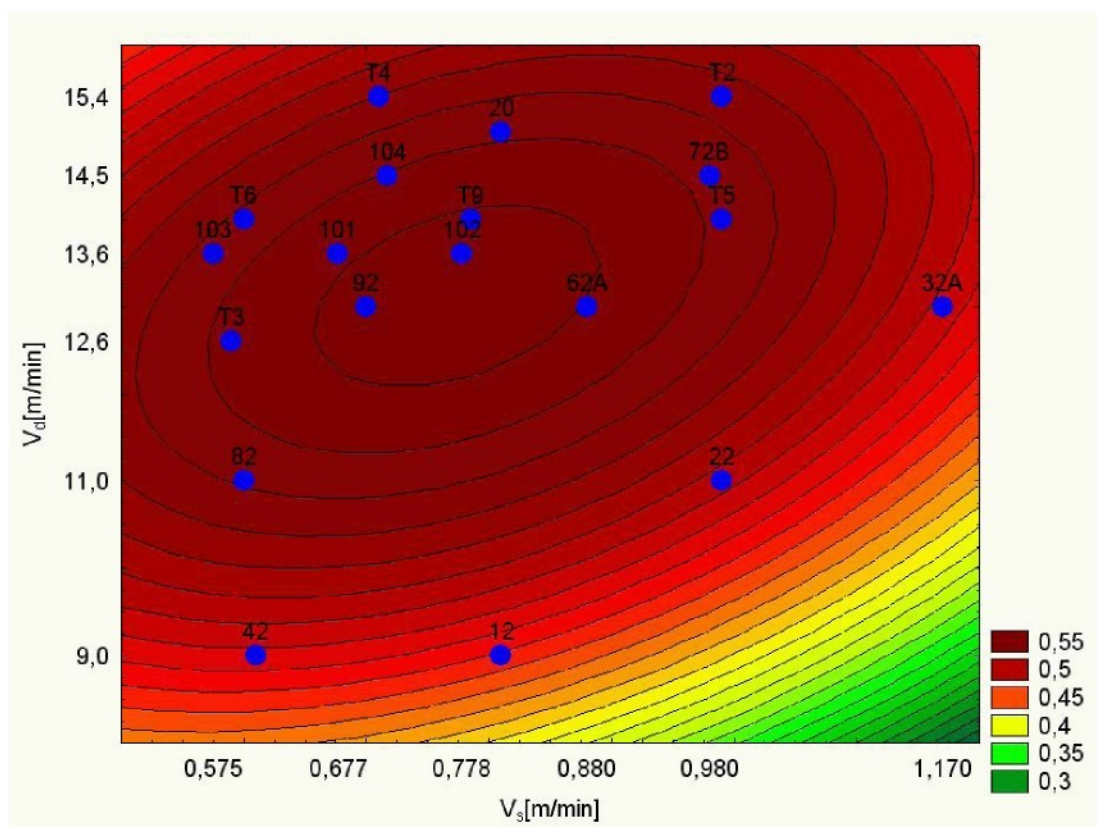
PE... efektivita závaru [-]

DE ... efektivita návaru [-]

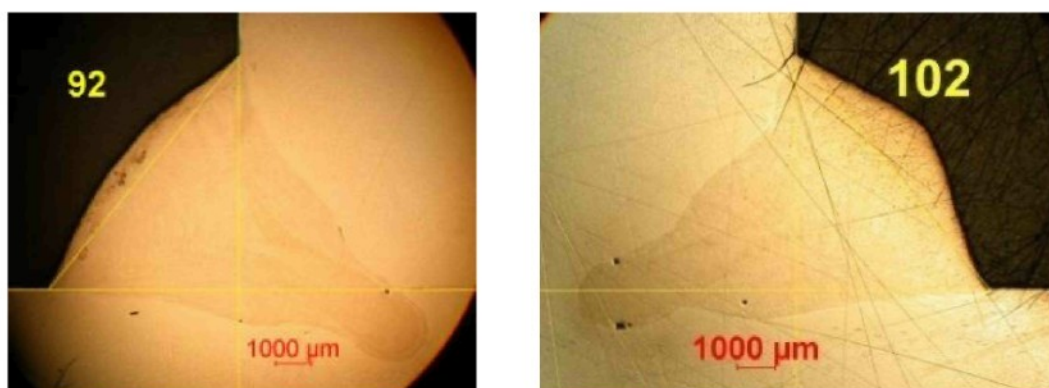
FE ... celková efektivita [-]

Tab. 10: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx 7

VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	PE	DE	FE
T2	15,40	0,990	5,59	7,31	18,6	4,45	8,35	8,86	33,8	0,631	0,825	0,521
T3	12,60	0,590	5,76	9,36	27,5	5,61	9,79	9,87	37,0	0,584	0,948	0,554
T4	15,40	0,710	5,70	8,60	28,0	5,68	9,86	9,86	37,2	0,578	0,872	0,504
T5	14,00	0,990	4,86	7,18	16,7	4,3	7,77	8,01	35,4	0,606	0,896	0,543
T6	14,00	0,600	5,74	8,94	28,7	5,75	9,97	9,95	37,3	0,577	0,899	0,518
T9	14,00	0,785	5,49	8,38	23,4	5,14	9,11	9,26	36,3	0,593	0,905	0,537
12	9,00	0,81	2,52	5,40	12,2	4,024	6,04	5,45	45,1	0,463	0,992	0,459
22	11,00	0,99	2,97	5,52	11,6	3,81	6,09	5,75	41,4	0,517	0,960	0,496
42	9,00	0,61	3,05	6,38	16,4	4,64	7,06	6,43	44,2	0,475	0,993	0,471
52	11,50	0,78	2,60	5,59	15,2	4,56	6,67	5,91	46,7	0,440	0,946	0,416
62	13,00	0,88	2,77	5,43	15,9	4,63	6,87	6,13	45,8	0,452	0,885	0,400
72B	14,50	0,98	4,48	6,88	16,7	4,37	7,64	7,68	36,9	0,583	0,896	0,523
82	11,00	0,60	4,39	7,80	19,5	4,82	8,09	7,91	38,8	0,555	0,986	0,547
92	13,00	0,70	4,28	7,30	19,8	4,89	8,10	7,85	39,5	0,545	0,930	0,507
20	15,00	0,81	5,65	8,32	20,5	4,72	8,69	9,11	34,6	0,620	0,913	0,566
32A	13,0	1,17	3,42	5,61	12,5	3,88	6,44	6,26	39,4	0,547	0,897	0,490
62A	13,0	0,88	4,54	7,06	16,1	4,25	7,58	7,65	36,0	0,593	0,922	0,547
101	13,6	0,677	6,45	9,5	24,9	5,16	9,65	10,24	33,9	0,630	0,928	0,584
102	13,6	0,778	5,77	8,41	21,9	4,89	8,96	9,36	34,8	0,617	0,899	0,554
103	13,6	0,575	5,81	8,81	27,3	5,58	9,78	9,90	36,7	0,587	0,890	0,523
104	14,5	0,717	6,47	9,32	25,3	5,2	9,71	10,29	34,0	0,629	0,906	0,570



Obr. 39: Výsledný graf efektivity pro metodiku 3 a pro plyn Ferromaxx 7



Obr. 40: Ukázky optimálních svarů pro metodiku 3 – směs 1

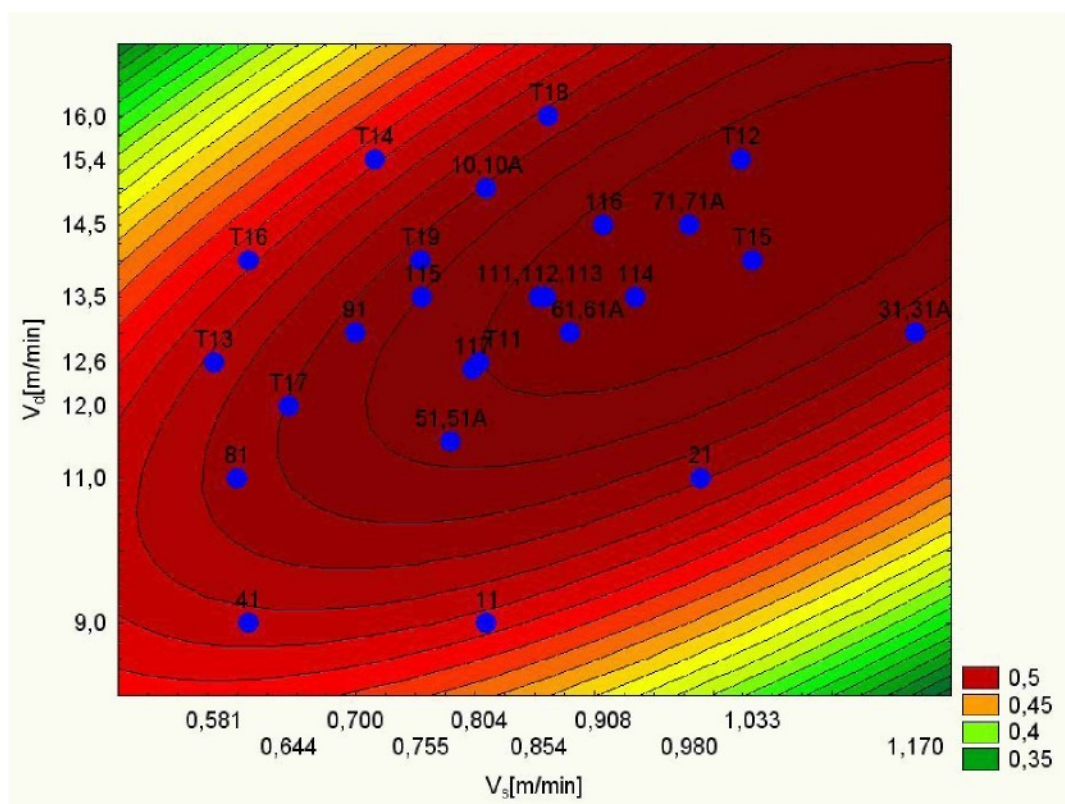
3.6.4.2 Metodika 3 pro soustavu se směsí 1 - diskuze

Již na první pohled vychází optimum tohoto algoritmu mezi optimum metodiky 1A a optimum metodiky 1B. Oba nejbližší svary 92 a 102 mají velmi hluboký závar a přitom přijatelný tvar návaru i úhel přechodu do základního materiálu. Pole je uzavřené a stabilní.

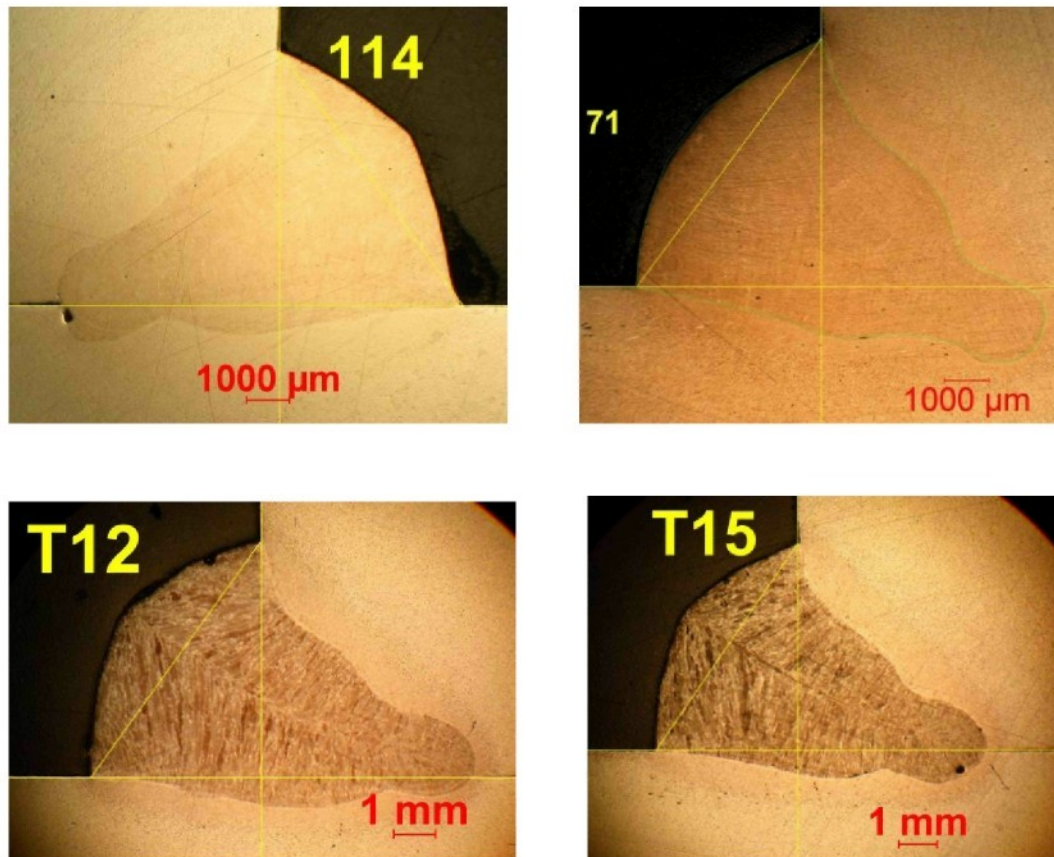
3.6.4.3 Metodika 3 pro soustavu se směsí 2

Tab. 11: Naměřené a vypočítané hodnoty pro Ferromaxx Plus

VZ	V _d	V _s	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	PE	DE	FE
T11	12,60	0,804	4,52	7,02	17,9	4,55	7,87	7,85	37,4	0,576	0,894	0,515
T12	15,40	1,024	5,05	7,34	18,6	4,55	8,18	8,39	35,6	0,602	0,875	0,527
T13	12,60	0,581	5,08	8,47	26,0	5,56	9,35	9,14	38,7	0,555	0,926	0,514
T14	15,40	0,716	5,28	8,19	26,3	5,56	9,46	9,35	38,2	0,565	0,876	0,495
T15	14,00	1,033	4,92	7,10	15,7	4,13	7,60	7,95	34,6	0,619	0,893	0,553
T16	14,00	0,610	4,77	8,18	27,9	5,87	9,51	9,05	40,7	0,527	0,903	0,476
T17	12,00	0,644	4,62	7,83	21,9	5,11	8,57	8,36	38,9	0,553	0,937	0,518
T18	16,00	0,862	5,50	7,76	22,7	5,05	8,99	9,20	36,1	0,598	0,843	0,504
T19	14,00	0,76	4,47	7,23	23,1	5,31	8,70	8,35	40,1	0,535	0,866	0,464
11	9,00	0,81	2,90	5,66	12,0	3,9	6,15	5,74	42,1	0,505	0,986	0,498
21	11,00	0,99	3,37	5,90	12,3	3,85	6,39	6,18	39,4	0,545	0,954	0,520
31	13,00	1,17	3,72	5,98	12,2	3,76	6,49	6,47	37,5	0,575	0,924	0,531
41	9,00	0,61	3,26	6,46	16,4	4,59	7,15	6,60	42,9	0,494	0,978	0,483
51	11,50	0,78	3,40	6,30	16,5	4,59	7,19	6,75	42,5	0,504	0,934	0,471
61	13,00	0,88	3,71	6,17	16,4	4,49	7,31	6,99	40,4	0,531	0,883	0,469
71	14,50	0,98	4,42	7,00	16,2	4,31	7,52	7,58	37,0	0,583	0,924	0,539
81	11,00	0,60	4,80	8,00	20,8	4,92	8,46	8,40	37,7	0,571	0,952	0,544
91	13,00	0,70	4,72	7,74	20,8	4,94	8,43	8,33	38,0	0,566	0,929	0,526
31A	13,0	1,17	3,67	5,64	12,0	3,73	6,43	6,40	37,5	0,573	0,881	0,505
51A	11,5	0,78	4,39	7,28	16,1	4,3	7,49	7,54	37,1	0,582	0,966	0,562
61A	13,0	0,88	4,92	7,2	13,8	3,82	7,23	7,73	33,5	0,637	0,932	0,593
71A	14,5	0,98	5,1	7,00	13,8	3,79	7,28	7,89	32,8	0,647	0,888	0,574
10	15,00	0,81	5,05	7,74	21,8	5,01	8,69	8,72	37,3	0,579	0,888	0,514
10A	15,0	0,81	4,7	7,14	16,8	4,35	7,72	7,89	36,2	0,596	0,905	0,539
111	13,5	0,854	5,85	8,02	19,1	4,48	8,52	9,14	33,3	0,640	0,877	0,561
112	13,5	0,86	5,45	7,74	18,0	4,4	8,20	8,68	34,1	0,628	0,892	0,560
113	13,5	0,858	5,58	8,28	19,7	4,61	8,53	8,96	34,4	0,623	0,924	0,575
114	13,5	0,935	5,02	7,48	17,9	4,46	8,04	8,29	35,5	0,606	0,902	0,546
115	13,5	0,756	5,62	8,46	21,2	4,82	8,79	9,16	35,0	0,614	0,924	0,567
116	14,5	0,908	5,75	8,04	18,6	4,43	8,39	9,00	33,4	0,639	0,893	0,570
117	12,5	0,798	5,19	7,42	19,2	4,62	8,32	8,58	35,5	0,605	0,865	0,523



Obr. 41: Výsledný graf efektivity pro metodiku 3 a pro plyn Ferromaxx Plus



Obr. 42: Ukázky optimálních svarů pro metodiku 3 – směs 2

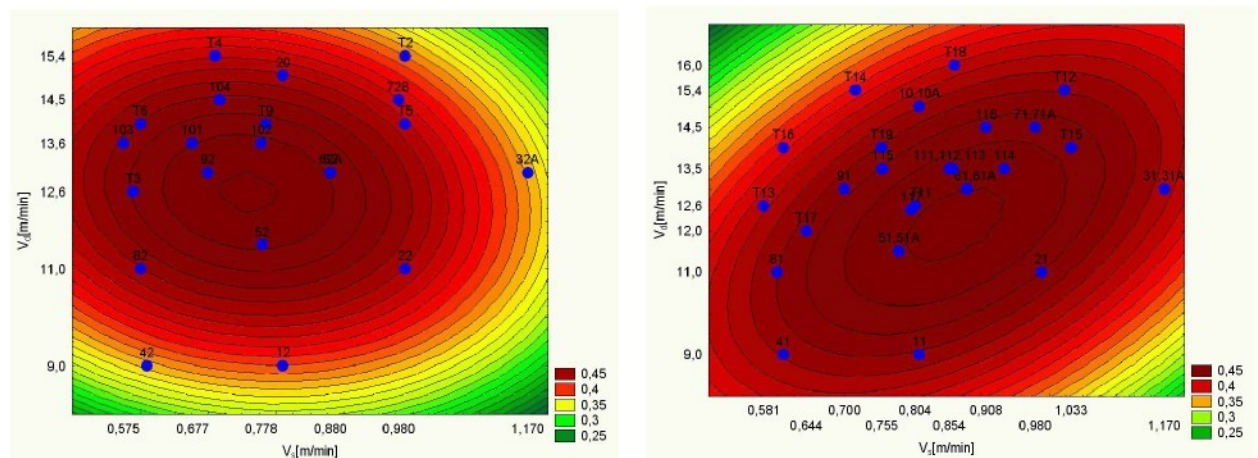
3.6.4.4 Metodika 3 pro soustavu se směsí 2 - diskuze

Pole maximální efektivity směsi 2 podle metodiky 3 vychází zhruba ve stejném parametrickém prostoru jako u metodiky 1B, je ale větší a je protažené směrem k vyšším rychlostem drátu a svařování. Pole je uzavřené a stabilní, svary poblíž optima mají hluboký závar, přijatelnou geometrii, i když úhel napojení svaru na pásnici se blíží 90° .

4 Shrnutí a zhodnocení výsledků

4.1 Porovnání obou soustav (směs 1 a 2) z hlediska tří použitých algoritmů

Metodika 1A

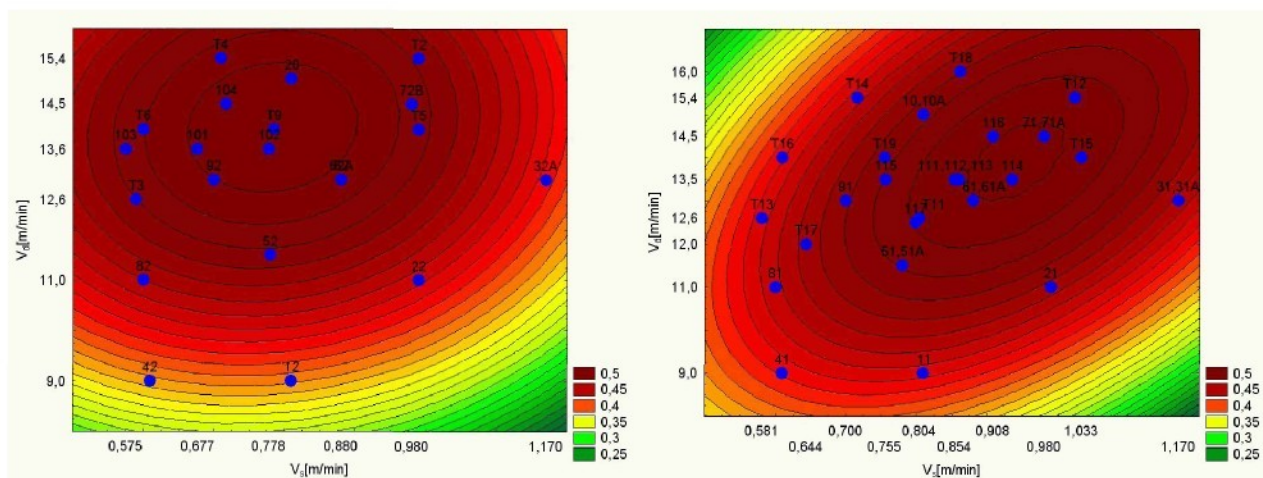


Obr. 43: Shrnutí výsledků pro metodiku 1A pro plyny Ferromaxx 7 a Ferromaxx Plus

Tab. 12: Vypočítané optimum pro metodiku 1A

	V_d [m/min]	V_s [m/min]	E [-]	P_N [mm ²]
Ferromaxx 7	12,5	0,627	0,505	20,8
Ferromaxx Plus	11,79	0,778	0,462	15,8

Metodika 1B

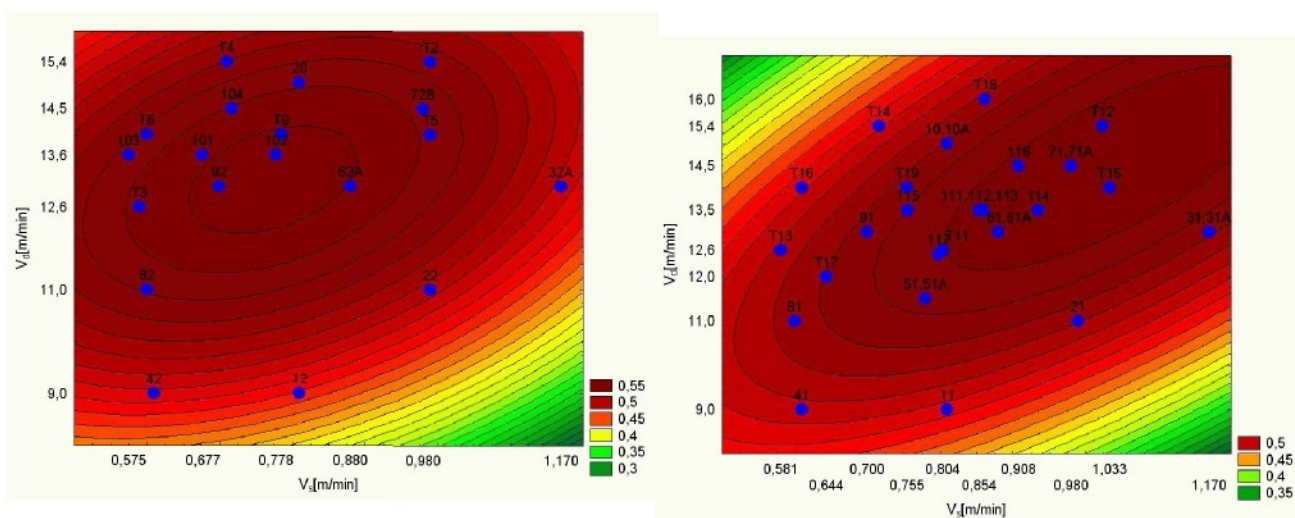


Obr. 44: Shrnutí výsledků pro metodiku 1B pro plyny Ferromaxx 7 a Ferromaxx Plus

Tab. 13: Vypočítané optimum pro metodiku 1B

	V_d [m/min]	V_s [m/min]	E [-]	P_N [mm ²]
Ferromaxx 7	13,7	0,651	0,516	21,9
Ferromaxx Plus	13,8	0,858	0,497	16,7

Metodika 3



Obr. 45: Shrnutí výsledků pro metodiku 1B pro plyny Ferromaxx 7 a Ferromaxx Plus

Tab. 14: Odečtené optimální hodnoty z grafu hodnoty z grafu

	V_d [m/min]	V_s [m/min]	E [-]
Ferromaxx 7	13	0,778	0,52
Ferromaxx Plus	13,6	0,98	0,5

4.2 Závěrečné porovnání vlivu směsi plynů na efektivitu provedení koutového svaru z hlediska tří použitých algoritmů

Porovnáme-li efektivitu směsi 1 ($\text{Ar}, \text{CO}_2, \text{O}_2$) podle všech 3 algoritmů, vychází optimální hodnoty rychlosti drátu v_D kolem 13 m/min a rychlosti svařování kolem 0,78 m/min.

Porovnáme-li efektivitu směsi 2 ($\text{Ar}, \text{He}, \text{CO}_2$) podle všech 3 algoritmů, vychází optimální hodnoty rychlosti drátu v_D kolem 13,6 m/min a rychlosti svařování kolem 0,9 m/min.

Z toho vyplývá, že bez ohledu na použitý algoritmus je optimální oblast FE směsi 1 v diagramu $v_D - v_s$ při o cca 0,5 – 1m nižší rychlosti podávání drátu a cca 10 – 15 cm/min nižší rychlosti svařování než směs 2, obsahující He.

U plynu Ferromaxx 7 je patrné, že mají větší prstovitý závar, ale zase mají větší převýšení svaru a horší konturu povrchu svařované housenky. U plynu Ferromaxx Plus je převýšení svaru malé nebo skoro nulové.

Závar není tak velký jako v předchozím případě, ale za to kontura povrchu svařované housenky je evidentně lepší.

Tab. 15: Souhrnná tabulka nejlépe vyhodnocených svarů

VZ	V_d	V_s	P_N	v	Q	D	f_2	FE1A	FE1B	FE3
101	13,6	0,677	24,9	9,5	8,79	0,54	30,5	0,490	0,516	0,584
102	13,6	0,778	21,9	8,41	7,6	0,564	33,7	0,482	0,507	0,554
T9	14,00	0,785	23,4	8,38	7,41	0,557	34,3	0,424	0,466	0,537
92	13,00	0,70	19,8	7,30	8,15	0,505	25,7	0,532	0,537	0,507
51	11,50	0,78	16,5	6,30	6,57	0,509	28,4	0,477	0,478	0,471

61	13,00	0,88	16,4	6,17	6,47	0,515	29	0,517	0,524	0,469
71	14,50	0,98	16,2	7,00	6,26	0,538	32,1	0,494	0,528	0,539
112	13,5	0,86	18	7,74	6,44	0,556	34,6	0,491	0,531	0,560
114	13,5	0,935	17,9	7,48	6,22	0,562	33,8	0,445	0,476	0,546
116	14,5	0,908	18,6	8,04	6,74	0,515	32,9	0,504	0,542	0,570
T12	15,40	1,024	18,6	7,34	6,22	0,528	30,7	0,410	0,458	0,527
T15	14,00	1,033	15,7	7,10	5,58	0,533	31,4	0,439	0,484	0,553

Tab. 16 Tabulka svarů s nejnižší efektivitou

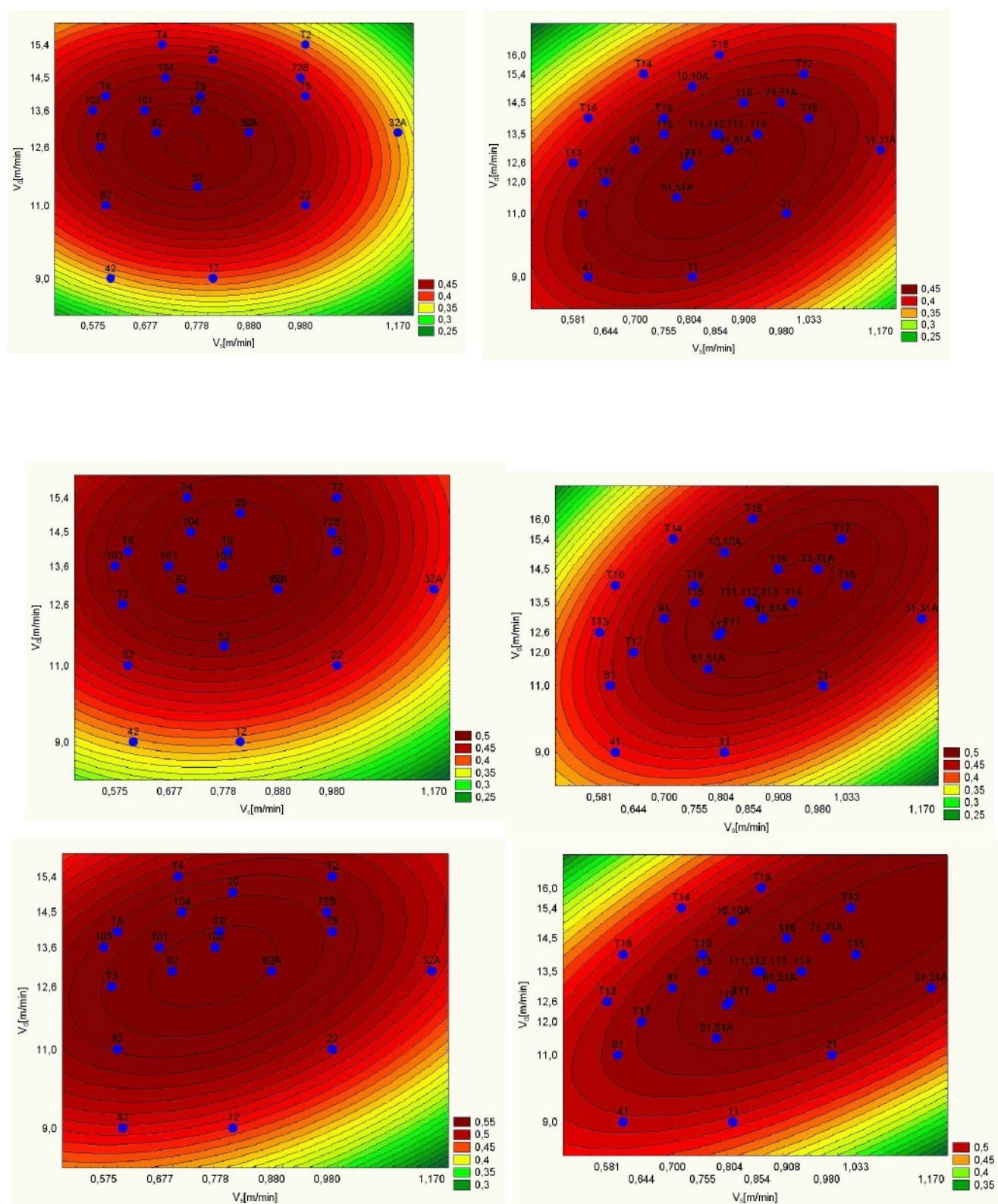
VZ	V _d	V _s	P _N	v	Q	D	f ₂	FE1A	FE1B	FE3
42	9,00	0,61	16,4	6,3	7,3	0,474	20,6	0,372	0,373	0,471
T2	15,40	0,990	18,6	7,3	6,2	0,54	33,5	0,317	0,458	0,521
41	9,00	0,61	16,4	6,7	7,00	0,473	22,7	0,421	0,421	0,483

Ferromaxx 7

Ferromaxx Plus

Při porovnání stejných svarů, zhotovených pod směsí 1 a směsí 2 je na první pohled patrné, že směs 1 s O₂ vnáší do svaru více měrného tepla než směs 2 s He i s tím, že bereme v úvahu posun optima směsi 1 k vyšším hodnotám průřezových ploch svarů. Dále je zřejmé, že parametry, které se používají jako směrodatné pro intenzitu svařování – zředění D a efektivita tavení f₂ neodráží použitelnost svaru, protože jsou v přímé závislosti na intenzitě proudu a nezohledňují geometrii svaru. U obou směsí plynů je zřejmé, že optimální oblast režimu “zkratované sprchy” dává vyšší účinné výšky (nosnosti) svarů při vyšší produktivitě a nižším měrném vneseném teple než svary, zhotovené konvenčním sprchovým režimem.

4.3 Porovnání algoritmů efektivity svarů



Obr. 46: Srovnání grafů první je metodika 1A uprostřed metodika 1B a dole metodika3, vlevo pro plyn Ferromaxx 7a v pravo pro plyn Ferromaxx Plus

Metodika 1 se v obou variantách 1 a 2 ukázala jako použitelná na technologické zkoušky maximální hloubky závaru při přijatelném tvaru svaru. Vytvoření algoritmu - metodiky 2 bylo motivováno snahou použít osvědčené hledisko efektivity výplňových koutových svarů – overwelding pro závarové koutové svary i když v tomto případě porovnání ploch návaru není technologicky přijatelné. Provedená optimalizace ukázala, že ani matematicky tato optimalizace nevychází, takže se neosvědčila ani prakticky.

Poslední vytvořený algoritmus – metodika 3 se naopak ukázala jako prakticky nejlépe použitelná, protože vychází z pevných, měřitelných hodnot a vypočítává i konkrétní rozměry ideálního tvaru návarového trojúhelníka pro porovnání se skutečným tvarem svaru (Obr. 38). Osvědčila se i při optimalizaci efektivity provedení. Optimální svary mají hluboký závar, který dává maximální nosnost svaru při přijatelném tvaru a vysoké produktivitě svařování.

5 Seznam použité literatury

- [1] Hudec, Z.: Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG. [Dí sřtační práce]. Liberec 2005.
- [2] Hrstka, D.: Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG. [Díplomová práce]. Liberec 2007. TU Liberec, FS.
- [3] Hudec, Z.,Hrstka, D.: "GMAW Fillet Weld Overwelding Solution", First IIW Congress in Central and East European Region, Tatry, Stará Lesná, SK, 2009.
- [4] Kopřiva, R.: Technologia zvarania v ochranných plynoch metodou MIG/MAG, Zeross, Ostrava 1993.
- [5] Kolařík, I.: Svařování metodou MIG/MAG, ČVUT, FS Praha.
- [6] Prospektový materiál firem:FRONIUS, ESAB, AIRPRODUCT, AIRLIQUIDE, MIGATRONIC.
- [7] MYERS, R. H.: Response Sur face Methodology, John Wiley & Sons Inc. N.Y. 1995.
- [8] PHADKE, M. S.: Quality Engineering using Robust Design. ATaT Laboratories, Prentice Hall 1989.
- [9] BELAVENDRAM, N.:Quality by Design, Prentice Hall International, 1995
- [10] Welding Journal 12: 123-s, 2000. ? ArcWise

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 diplomové práce a konzultantem.

Datum 28.5.2010

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature

Příloha 1

Tab. : Naměřené a vypočtené hodnoty z programu weldmonitor pro Ferromaxx 7

VZ	Vd[m/min]	Vs[m/min]	I[A]	U[V]	CW[mm]	Q[kJ/cm]	P _M [mm ²]	D[-]	f ₂ [%]
T1	12,6	0,806	381	28,4	13	6,84	16,9	0,573	34,7
T2	15,4	0,99	420	28,6	13	6,19	16,8	0,54	33,5
T3	12,6	0,59	382	28,4	13	9,38	23,1	0,532	29,3
T4	15,4	0,71	423	29	13	8,81	23,4	0,531	31,7
T5	14	0,99	410	28,7	13	6,06	15,3	0,542	31,3
T6	14	0,6	398	28,6	13	9,68	25,2	0,502	27,6
T7	12	0,65	356	27,7	13	7,74	19,9	0,534	31,1
T8	16	0,833	433	29,4	13	7,79	20,7	0,60	42,1
T9	14	0,785	399	28,6	13	7,41	19,3	0,557	34,3
12	9	0,81	316	27,7	13	5,51	12,0	0,469	20,2
22	11	0,99	362	28,2	13	5,26	12,0	0,496	23,6
32	13	1,17	397	28	13	4,85	12,0	0,449	35,3
42	9	0,61	320	27,3	14	7,30	15,9	0,474	20,7
52	11,5	0,78	371	28,1	14	6,82	15,9	0,505	22,8
62	13	0,88	378	27	14	5,91	16,0	0,511	29,4
62B	13	0,88	379	28,6	14	6,28	16,0	0,495	27,7
72B	14,5	0,98	424	29	14	6,40	16,0	0,498	28,4
82	11	0,6	358	28,2	14	8,58	19,8	0,487	22,3
92	13	0,7	391	28,6	14	8,15	20,1	0,505	25,7
20	15	0,81	427	29,2	15	7,85	20,0	0,514	28,2
32A	13	1,17	397	28,7	13	5,0	12,0	0,52	27,1
62A	13	0,88	401	28,4	14	6,6	16,0	0,505	25,8
101	13,6	0,677	408	28,6	13,5	8,79	21,7	0,54	30,5
102	13,6	0,778	400	29	13,5	7,60	18,9	0,564	33,7
103	13,6	0,575	392	28,7	14,5	9,98	25,5	0,501	26,9
104	14,5	0,717	417	29,1	14,5	8,63	21,8	0,559	33,7

Příloha 2

Tab. : Naměřené hodnoty z programu weldmonitor pro Ferromaxx Plus

VZ	Vd[m/min]	Vs[m/min]	I[A]	U[V]	CW[mm]	Q[kJ/cm]	P _M [mm ²]	D[-]	f ₂ [%]
T11	12,6	0,804	373	28,1		6,65	16,9	0,907	73,9
T12	15,4	1,024	419	29,8	13	6,22	16,2	0,528	30,7
T13	12,6	0,581	348	28,4	13	8,68	23,4	0,514	30,0
T14	15,4	0,716	401	30	13	8,57	23,2	0,522	31,1
T15	14	1,033	394	28,7	13	5,58	14,6	0,533	31,4
T16	14	0,61	385	28,1	13	9,04	24,8	0,493	28,0
T17	12	0,644	344	28,4	13	7,74	20,1	0,522	29,8
T18	16	0,862	414	30,4	13	7,45	20,0	0,531	31,9
T19	14	0,76	375	28,7	13	7,27	20,0	0,438	30,4
11	9	0,81	315	27,8	13	5,51	12,0	0,516	24,4
21	11	0,99	357	27,8	13	5,11	12,0	0,520	27,9
31	13	1,17	384	27,9	13	4,67	12,0	0,533	31,7
41	9	0,61	307	27,3	14	7,01	15,9	0,473	22,7
51	11,5	0,78	359	28	14	6,57	15,9	0,509	28,2
61	13	0,88	393	28,4	14	6,47	16,0	0,515	29,0
71	14,5	0,98	415	29	14	6,26	16,0	0,538	32,1
81	11	0,6	341	28,3	14	8,20	19,8	0,493	27,1
91	13	0,7	365	28,8	14	7,66	20,1	0,491	28,6
31A	13	1,17	380	28,6	13	4,7	12,0	0,529	29,9
51A	11,5	0,78	353	28,6	14	6,6	15,9	0,522	28,3
61A	13	0,88	373	28,4	14	6,1	16,0	0,803	54,8
71A	14,5	0,98	432	28,9	14	6,5	16,0	0,505	26,4
10	15	0,81	410	29,5	14	7,62	20,0	0,545	33,1
10A	15	0,81	397	29	14	7,2	20,0	0,405	19,7
111	13,5	0,854	395	29,3	14	6,91	17,1	0,572	34,6
112	13,5	0,86	380	28,6	14	6,44	17,0	0,556	34,6
113	13,5	0,858	400	28,9	14	6,87	17,0	0,580	35,9
114	13,5	0,935	399	28,6	14	6,22	15,6	0,562	33,8
115	13,5	0,756	384	28,5	14	7,38	19,3	0,546	33,0
116	14,5	0,908	408	29,4	14	6,74	17,2	0,515	32,9
117	12,5	0,798	360	27,6	14	6,35	16,9	0,490	34,3

Příloha 3

Tab. : Naměřené rozměry svarů v programu NIS-elements pro Ferromaxx 7

VZ	x [mm]	c [mm]	b [mm]	a [mm]	z [mm]	Z _{max} [mm]	v [mm]	V _{max} [mm]	p [mm]	w [mm]	P _N [mm]	P _s [mm]	úhel [°]	α [°]	e [mm]
T1	4,78	4,20	6,30	3,55	4,00	4,00	7,54	7,54	1,54	7,62	20,40	39,50	97/120,5	31,42	2,51
T2	5,59	2,37	5,86	2,20	5,12	5,12	7,31	7,31	2,58	6,34	18,58	36,53	46/101	24,53	2
T3	5,76	5,74	7,98	4,70	4,64	4,64	9,36	9,36	0,81	9,88	27,47	49,26	119/136	35,44	3,3
T4	5,70	4,84	6,88	3,96	4,62	5,41	8,60	9,37	2,20	8,40	28,00	50,00	90/109	34,74	3,3
T5	4,86	3,22	6,18	2,88	4,29	4,29	7,18	7,18	1,57	7,00	16,70	33,33	85/125	24,6	2,17
T6	5,74	5,44	7,28	4,35	4,56	5,00	8,94	9,35	1,43	9,06	28,65	50,60	106/122	37,95	3,4
T7	4,63	4,70	7,00	3,94	3,83	3,83	7,75	7,75	0,88	8,49	21,67	42,82	103/136	33,06	2,63
T8	7,08	4,09	6,93	3,58	6,00	6,35	9,52	9,93	2,24	8,04	25,59	51,96	83/116	30,82	3,57
T9	5,49	4,44	6,98	3,78	4,63	4,63	8,38	8,38	1,46	8,29	23,40	43,50	91/123	29,64	2,92
12	2,52	5,17	4,23	3,42	2,09	2,09	5,40	5,4	0,37	6,7	12,15	22,60	141/157	38,82	1,63
22	2,97	5,00	3,86	3,06	2,44	2,58	5,52	5,64	0,72	6,5	11,60	23,80	123/145	37,12	1,81
32	3,51	5,05	3,71	3,00	2,79	3,48	5,79	6,48	1,48	6,2	15,60	28,30	105/124	33,1	1,96
42	3,05	6,24	4,91	4,00	2,38	2,38	6,38	6,38	0,24	7,9	16,39	30,30	142/148	37,42	1,89
52	2,60	5,31	5,10	3,85	1,74	2,92	5,59	6,77	0,42	7,4	15,20	30,70	138/147	43,16	1,72
62	2,77	4,95	4,88	3,44	1,99	3,87	5,43	7,31	0,86	7,0	15,90	32,50	109/119	43,21	1,85
62B	4,22	5,67	4,34	3,46	3,29	3,72	6,75	7,18	1,04	7,1	16,40	32,50	123/125	36,88	2,52
72B	4,48	5,55	4,18	3,32	3,56	4,22	6,88	7,54	1,38	6,9	16,70	33,30	100/123	34,94	2,67
82	4,39	6,93	5,30	4,39	3,48	3,48	7,80	7,80	0,38	8,7	19,50	38,00	127/146	37,58	2,6
92	4,28	6,29	5,14	4,00	3,30	4,83	7,30	8,83	0,70	8,1	19,80	40,00	117/132	39,22	2,73
20	5,65	6,58	4,24	3,55	4,77	5,34	8,32	8,90	1,46	7,8	20,50	41,12	98/122	32,12	3,58
32A	3,42	5,03	3,33	2,79	2,83	2,83	5,61	5,61	1,12	6,0	12,5	24,8	121/131	32,08	2,59
62A	4,54	5,57	4,54	3,53	3,53	3,82	7,06	7,34	1,00	7,2	16,1	32,2	130/121	40	3,55
101	6,45	4,85	7,72	4,14	5,33	5,33	9,5	9,5	1,21	9,1	24,9	47,2	111/131	31,8	3,38
102	5,77	5,1	6,21	3,95	4,5	4,83	8,41	8,77	1,36	8,03	21,9	43,31	129/126	39,3	3,64
103	5,81	5,06	7,13	4,15	4,66	5,09	8,81	9,23	1,85	8,74	27,3	51,14	104/129	34,3	3,34
104	6,47	4,6	7,34	3,89	5,37	5,78	9,32	9,72	1,66	8,69	25,25	49,51	111/127	32,67	3,38

Příloha 4

Tab. : Naměřené rozměry svarů v programu NIS-elements pro Ferromaxx Plus

VZ	x [mm]	c [mm]	b [mm]	a [mm]	z [mm]	zmax [mm]	v [mm]	vmax [mm]	p [mm]	w [mm]	P _N [mm]	P _s [mm]	úhel [°]	α l[°]	e [mm]
T11	4,52	3,27	6,40	2,93	4,05	4,05	7,02	7,02	1,39	7,20	17,90	35,10	77/122	34,26	2,78
T12	5,05	4,04	5,60	3,30	4,09	4,09	7,34	7,34	1,57	6,88	18,60	34,40	89-106	35,55	2,96
T13	5,08	5,25	7,94	4,38	4,07	4,07	8,47	8,47	1,00	9,50	26,00	48,20	110-141	35,42	2,64
T14	5,28	4,72	6,66	3,86	4,33	4,77	8,19	8,63	2,20	8,18	26,30	48,60	88-138	36,11	2,7
T15	4,92	3,62	5,27	3,01	4,04	4,04	7,10	7,10	1,36	6,45	15,69	31,34	91-116	35,74	2,66
T16	4,77	5,18	7,33	4,24	4,00	4,00	8,18	8,18	1,66	9,00	27,90	48,9	100-122	36	2,74
T17	4,62	4,90	7,08	4,06	3,77	3,77	7,83	7,83	0,83	8,58	21,90	42,10	115-141	35,64	2,56
T18	5,50	3,67	5,88	3,18	4,61	4,86	7,76	8,04	2,50	7,00	22,70	42,70	72-112	32,83	2,81
T19	4,47	4,55	6,08	3,68	3,64	4,01	7,23	7,69	1,98	7,6	23,10	41,10	93-135	34,9	2,49
11	2,90	5,49	4,21	3,34	2,36	2,36	5,66	5,66	0,12	6,9	12,00	24,80	146-150	36,88	1,73
21	3,37	5,32	3,90	3,18	2,72	2,93	5,90	6,08	0,67	6,7	12,30	25,60	125-143	36,08	1,66
31	3,72	5,16	3,50	2,81	3,16	3,16	5,98	5,98	1,10	6,1	12,20	26,10	102-128	31,62	2,03
41	3,26	6,34	4,90	3,89	2,57	2,78	6,46	6,59	0,11	8,0	16,40	31,10	143-151	39,51	1,92
51	3,40	5,94	5,10	3,88	2,42	3,54	6,30	7,40	0,24	7,8	16,50	33,60	139-139	39,72	2,02
61	3,71	5,18	4,67	3,57	2,60	4,16	6,17	7,73	0,82	7,0	16,40	33,83	122-126	43,11	1,83
71	4,42	5,54	4,04	3,30	3,70	4,60	7,00	7,88	1,14	6,8	16,20	35,10	100-119	35,23	1,84
81	4,80	7,74	5,47	4,46	3,59	3,59	8,00	8,00	0,17	9,4	20,80	41,00	124-143	32,15	2,54
91	4,72	6,69	4,69	3,83	3,91	4,13	7,74	7,94	1,00	8,1	20,83	40,90	113-147	33,46	2,67
31A	3,67	4,63	3,24	2,68	2,96	3,03	5,64	5,69	1,40	5,6	12,0	25,5	96-110	35,52	2,06
51A	4,39	6,5	4,54	3,84	3,44	3,52	7,28	7,36	0,17	7,9	16,1	33,7	141-160	36,3	2,51
61A	4,92	6,3	3,2	2,86	4,34	4,34	7,2	7,2	0,84	7,0	13,8	32,0	135/135	29	3,19
71A	5,1	5,63	2,6	2,36	4,64	4,64	7,00	7,00	1,13	6,1	13,8	32,3	102/120	34,9	2,12
10	5,05	6,37	4,17	3,49	4,25	4,88	7,74	8,37	1,84	7,6	21,77	44,00	90/108	33	3,47
10A	4,7	6,26	3,4	3	4,18	4,18	7,14	7,14	1,28	7,1	16,8	33,6	90/117	34	3,32
111	5,85	3,21	6,68	2,9	5,12	5,12	8,02	8,02	1,85	7,4	19,08	39,86	84/123	25,72	2,38
112	5,45	3,7	5,89	3,15	4,6	4,6	7,74	7,74	1,7	7	18,03	38,18	100/124	30,61	2,92
113	5,58	3,89	6,57	3,34	4,97	4,97	8,28	8,28	1,53	7,61	19,66	40,47	110/125	28,93	2,83
114	5,02	4,19	5,82	3,43	4,03	4,03	7,48	7,48	1,29	7,22	17,92	35,64	119/115	34,7	2,89
115	5,62	3,8	7,22	3,4	5,07	5,07	8,46	8,46	1,5	8,23	21,19	42,51	128/128	27,88	2,64
116	5,75	4,21	5,89	3,45	4,58	5,18	8,04	8,64	1,41	7,3	18,59	38,34	123/114	33,48	3,25
117	5,19	3,77	6,62	3,3	4,12	4,12	7,42	7,42	1,29	7,61	19,22	37,69	92/127	28,79	2,11

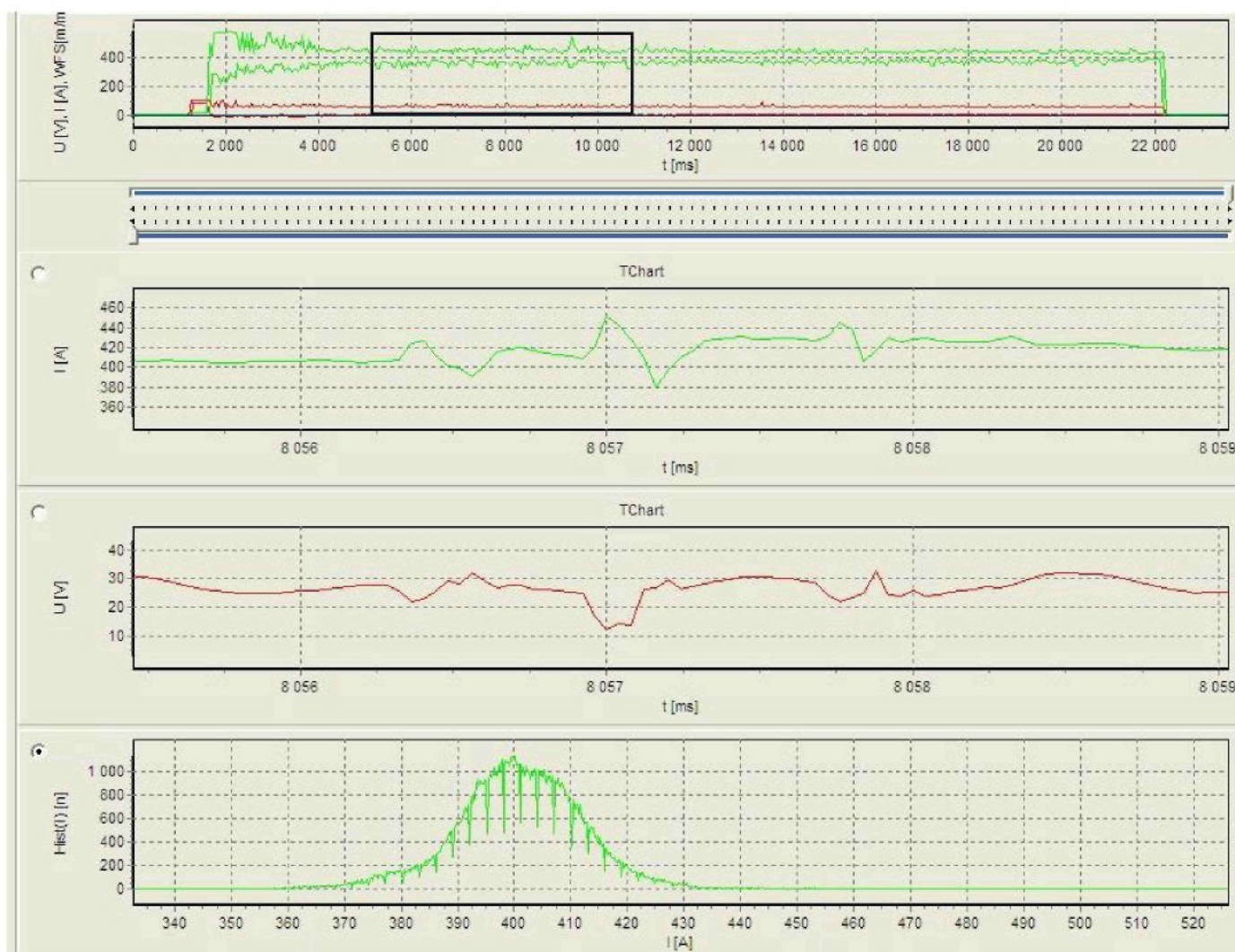
Příloha 5



Příloha 6



Příloha 7



Příloha 8

