

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



Diplomová práce

**Vliv geometrie úkosu tupého svaru na kvalitu a produktivitu svařování
MAG s vysokou hustotou výkonu.**

2012

Ondřej Myšák

TECHNICKÁ UNEVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

**Vliv geometrie úkosu tupého svaru na kvalitu a produktivitu
svařování MAG s vysokou hustotou výkonu.**

**Geometry of V-grooved butt weld effect on a quality and
productivity of High Power Density GMAW**

Ondřej Myšák

KSP – SM – 567

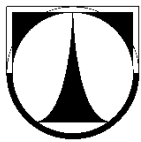
Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D. – TU v Liberci

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

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	56
Počet tabulek	11
Počet příloh	7
Počet obrázků	38

Datum: 25.5. 2012



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Ondřej M Y Š Á K
Studijní program	M 2301 Strojní inženýrství
Studijní obor	2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření	Strojírenská metalurgie

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Vliv geometrie úkosu tupého svaru na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu.

Zásady pro vypracování:

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

1. Prostudujte způsob svařování MAG s vysokou hustotou výkonu, 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 efektivity provedení koutových svarů.
4. Navrhněte vstupní a výstupní veličiny včetně matematického modelu pro plán experimentů pro vymezení optimální geometrie úkosu tupého svaru.
5. Proveďte optimalizaci jednovrstvého vysokovýkonného svařování tupých svarů pro soustavu Sigma 500 – Aristorod 1,2 – FeromaxPlus s vymezením pole přijatelné geometrie úkosu a svaru podle dosažené kvality a efektivity. Vyhodnoťte získané výsledky a formulujte dílčí závěry.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: cca 50 stran
- grafické práce: grafy, tabulky, makrostruktury

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] HUDEC, Z.: Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG, disertační práce, Liberec 2005.
- [2] HRSTKA, D.: Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG.[Diplomová 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] MYERS, R. H.: Response Surface Methodology, John Wiley & Sons Inc. N.Y. 1995

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. David Hrstka

L. S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry

Doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 17.2.2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301-Strojní inženýrství

Diplomant: Ondřej Myšák

Téma práce: Vliv geometrie úkosu tupého svaru na kvalitu a produktivitu svařování
MAG s vysokou hustotou výkonu.

Geometry of V-grooved butt weld effect on a quality and productivity of
High Power Density GMAW

Číslo DP: KSP-SM-567

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

Konzultant : Ing. David Hrstka – TU v Liberci

Anotace

Diplomová práce řeší kvalitu a efektivitu provedení úkosového tupého svaru při hlubokozávarovém svařování MAG. Návrh experimentů je proveden pomocí DOE metody centrální kompozice a jeho výstupní veličinou je efektivita provedení svaru, vypočtená podle dvou variant algoritmu pro 1. a 3. jakost provedení. Jakost je dále hodnocena podle makrostrůmků a zahrnuta do závěrečného hodnocení.

Klíčová slova: MAG, úkosový tupý svar, efektivita, optimalizace.

Abstrakt

Diploma thesis is solving quality and performance efficiency of V-grooved butt welds, performed with deep-penetrated GMAW. Design of experiments (DOE) method of central composition was used for optimization of butt weld efficiency as an output value. Butt efficiency (BE) is calculated for 2 variants of weld shape quality in accordance with codes. Quality is also validated according to welds macrostructures.

Key words: GMAW, V-grooved butt weld, efficiency, optimization

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (Školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, které má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

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

V Liberci, 25. 5. 2012

.....

Ondřej Myšák

Vrbice 6

517 45 Kostelec nad Orlicí

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.....	12
2. Teoretická část.....	13
2.1. Princip technologie MAG.....	13
2.2 Přenos kovu v oblouku.....	14
2.2.1 Zkratový přenos kovu.....	14
2.2.2. Sprchový přenos kovu.....	15
2.2.3. Impulsní přenos kovu	16
2. 3. Tupé svary.....	16
2. 4. Ochranné plyny.....	17
2.4.1 Směsné plyny.....	20
2. 5. Trhliny ve svarových spojích.....	22
2.5.1 Trhliny za tepla.....	22
2.5.1.1. Trhliny krystalizační.....	22
2.5.1.2 Likvační trhliny.....	22
2.5.1.3 Polygonizační trhliny.....	23
2.5.2. Trhliny za studena.....	23
2.5.3. Lamelární trhliny.....	23
2. 6. Svařování s vysokou hustotou výkonu.....	24
2. 6. 1 RapidArc.....	24
2.6.2. RapidMelt.....	24

2.6.3. TIME/TIME Twin.....	25
2.6.4. Svařování trubičkovým drátem (FCAW).....	27
2.6.5 Svařování metodou zkratované sprchy.....	28
2.7. Optimalizace procesu.....	28
2.7.1. Metoda středové kompozice.....	29
3. Praktická část	30
3.1. Cíl práce.....	30
3.2. Popis použitého zařízení a vybavení.....	30
3.2.1 Svařovací zdroj Migatronic Sigma 500 pulse.....	31
3.2.2. Přídavný materiál.....	32
3.2.3 Použitý ochranný plyn Ferromaxx Plus.....	32
3.2.4 Použitý materiál.....	33
3.3. Příprava a svařování vzorků.....	33
3.4. Rozměrová analýza vzorků.....	34
3.5. Návrh experimentů.....	36
3.5.1. Návrh algoritmu výpočtu efektivity provedení V-svaru.....	36
3.6 Série 1.....	38
3.7. Série 2.....	41
3.8. Série 3 a 4.....	44
3.9.Hodnocení všech experimentů.....	47
3.9.1.SVARY s max. efektivitou.....	47

3.9.2. SVARY s vadami.....	49
4. Celkové shrnutí výsledků.....	52
4.1 Posouzení statistické významnosti.....	53
5. Závěr.....	54
6. Seznam použité literatury.....	56
Příloha 1 až 7	

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 úkosu [mm]
v_t	efektivní výška svaru [mm]
z	hloubka závaru [mm]
x	jmenovitá velikost úkosu [mm]
a	jmenovitá velikost svaru [mm]
w	šířka úkosu [mm]
p	převýšení svaru [mm]
α	úhel [°]
P_M	výpočtová průřezová plocha návaru [mm^2]
P_N	plocha návaru [mm^2]
P_S	průřezová plocha svaru [mm^2]
D	zředění [-]
Q	vnesené teplo [kJ/cm]
f	účinnost svaru [%]
BE_1	efektivita svaru metoda 1 [-]
BE_3	efektivita svaru metoda 3 [-]

1. Úvod

Svařování MAG je nejrozšířenější metoda svařování na světě. Jeho počátky je možno sledovat od roku 1947, kdy byly v USA uvedeny na trh první použitelné přístroje pro tuto svařovací techniku. V té době se tato technologie označovala jako svařování S.I.G.M.A., což byla zkratka názvu “Shielded Inert Gas Metal Arc” (oblouk chráněný inertním plynem), odpovídající dnešnímu označení “GMAW” a v Evropě MIG. V roce 1952 použili ruští technici ke svařování poprvé plyn CO₂ (kysličník uhličitý), čímž vznikl dnešní svařovací postup MAG. Tento postup se prosadil po celém světě až s novou konstrukcí svařovacích zdrojů, využívající výkonové diody a tyristory a to nejprve pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí v 70-tých letech. Prudký rozvoj zaznamenal proces MAG zejména s nástupem automatizace a robotizace a dále s další konstrukční změnou zdrojů – invertory, které umožnily zvýšení kvality a širší parametrické využití, zejména vývoj nových vysokovýkonných metod. Jednou z nich je hlubokozávarové svařování, jehož využití je předmětem této práce.[3]

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.

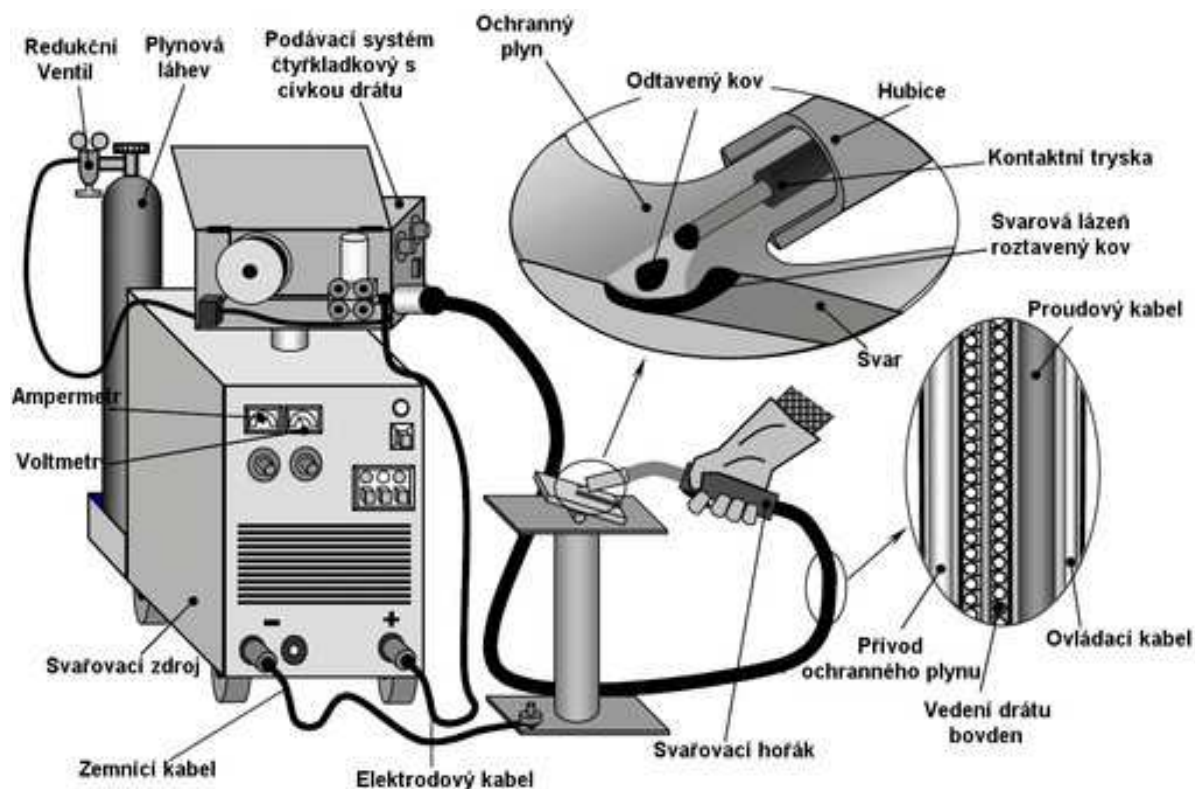
2. Teoretická část

2.1. Princip technologie MAG

Metoda svařování MAG (svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu) je založena na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základního materiálu v ochranné atmosféře aktivního plynu. Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v kontaktní špičce hořáku tak, aby elektricky zatížená délka drátu byla co nejkratší. Drát je podáván podávacími kladkami, umístěnými zpravidla v podavači, případně ve vlastním hořáku, nebo kombinací obou systémů, z cívky o běžné hmotnosti 15kg.[4]

Proudová hustota je u svařování MAG je 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 u průměru 0,6 – 0,8 mm, až do 800A 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. Díky vysokým výkonům tavení svařovací rychlosti někdy přesahuje $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlosti kapek přenášených obloukem přesahuje $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [4]

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 metodou MAG. [7]

2.2 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]

2.2.1 Zkratový přenos kovu

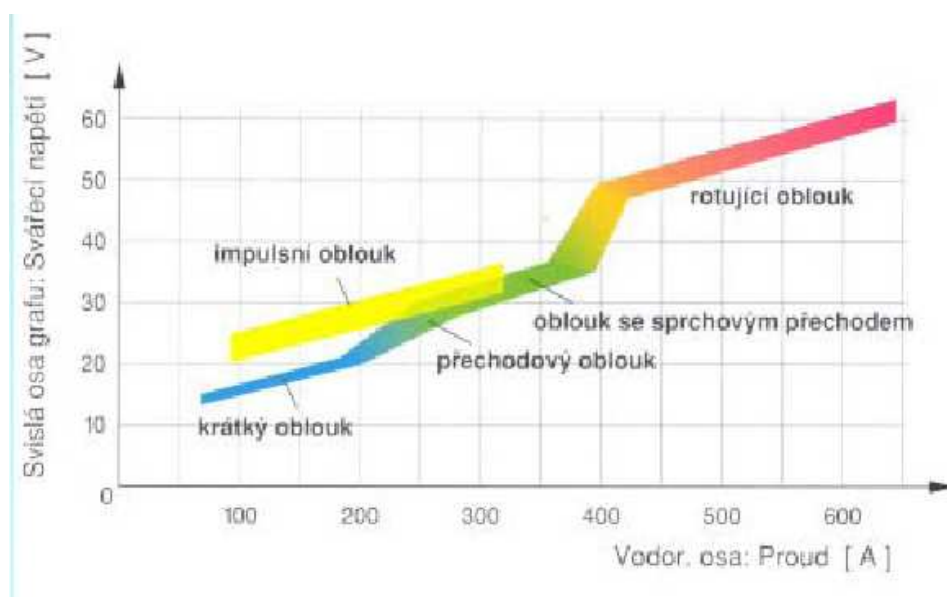
Zkratový přenos probíhá pro drát pr. 1,2 mm v rozsahu svařovacího proudu od 60 do 240 A, pak nastává přechodová oblast a při cca 300 A přechází do sprchového přenosu kovu. Výkon navaření při těchto parametrech se pohybuje v rozmezí 1 – 3 kg.hod⁻¹. Při zkratovém způsobu přenosu dochází vlivem nižšího napětí k přerušování oblouku zkratem kapek, které se taví z drátu. [4]

2.2.2. Sprchový přenos kovu

Sprchový přenos je typický pro hodnoty svařovacího proudu od 300 do 400 A a napětí 28 až 40 V. 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, protože se tvoří velké kapky. Charakteristické pro sprchový přenos v Ar a směsích s argonem (minimálně 75 %) je, že díky snadné ionizaci plynu obklopuje plazma i konec tavící se elektrody a tím se urychluje ohřev drátu, který tvoří ostrý hrot. [4]

2.2.3. Impulsní přenos kovu

Svařování impulsním proudem je zvláštní formou bezkratového 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. 3. Tupé svary

Tupé svary jsou závislé na tloušťce svařovaného materiálu, části svařenců do tloušťky 5 mm se svařují bez zhotovených úkosů. Na silnějších dílech provádíme úpravu frézováním nebo obrážením. Použití tupých svarů je nejčastěji v rafinerském, lodním a těžkém průmyslu. Velkou částí jsou také zastoupeny v opravárenství.

Svar I

Velmi jednoduchý svar, neboť nedochází k úpravě povrchu stykových částí. Plechy se k sobě přiblíží a doje k zavaření. Tento svar používáme na plechy do tloušťky 4mm.

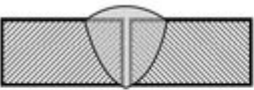
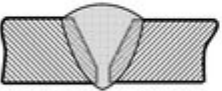
Svar V

Svařence jsou opatřeny úkosy. Používá se na materiál o tloušťce 4 až 25 mm. Plechy a trubky jsou v místě svaření zkoseny pod úhlem 20 – 45 °.

Pro větší tloušťky se používají typy úkosů X, U a W.

Svar X

Jedná se o dvojitý svar typu V umístěný proti sobě. Použití pro plechy o tloušťce 8 až 40 mm, která svařujeme z obou stran.

Typ svaru		Tloušťka základního materiálu (mm)							
		1.5	3	6	12	24	...	100	200
	Základní svar bez přípravy svarových ploch	■	■	■					
	Základní svar s přípravou svarových ploch		■	■	■				
	Více vrstvý svar				■	■	■		

Obr. 3. Základní aplikační třída použití z hlediska tloušťky materiálu V svaru. [7]

2. 4. 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 – Ar + CO_2 , Ar + O_2 , Ar + CO_2 + O_2 a Ar + He + CO_2 , někdy i Ar + He + CO_2 + 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 kg/m³) = 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°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]

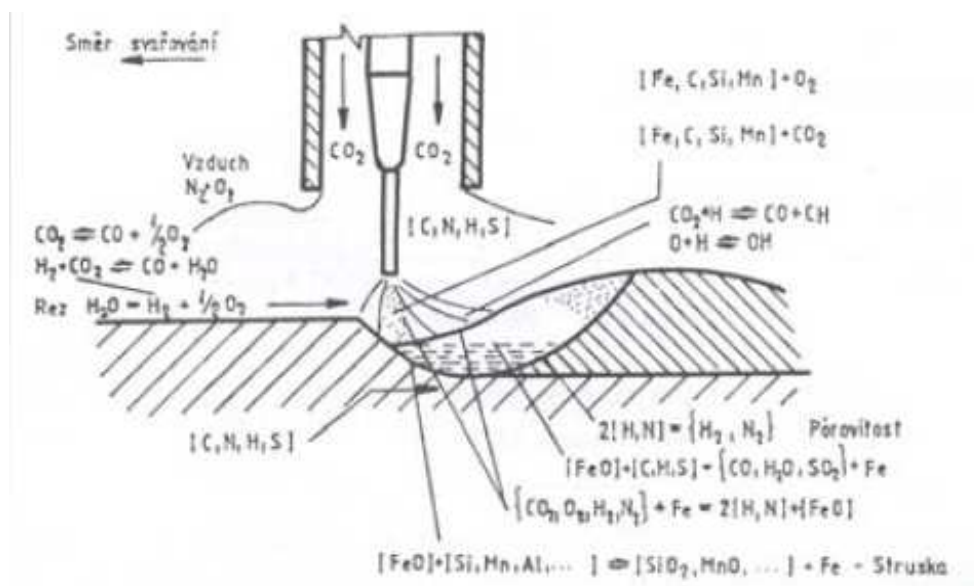
Vzniká jako „odpadní produkt“ při výrobě ostatních plynů. Tlakem ho je možné zkapalnit (např. při 0 °C tlakem 3,6 MPa). Až do teploty 700 °C je **CO₂** stabilní a chová se jako inertní plyn (chemicky netečný). Při vyšších teplotách se však rozpadá na oxid uhelnatý (CO) a kyslík (O₂), takže působí oxidačně. Dá se říci, že 10 % **CO₂** má potom stejný účinek asi jako 1% O₂).

CO₂ se odebírá z lahve pomocí jednostupňového redukčního ventilu, přičemž kapalný **CO₂** 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 **CO₂** používají proti zamrznutí elektrické ohřívače jako jejich součást a jsou připojené na zdroj svařovacího proudu. Velkou předností **CO₂** 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]

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]



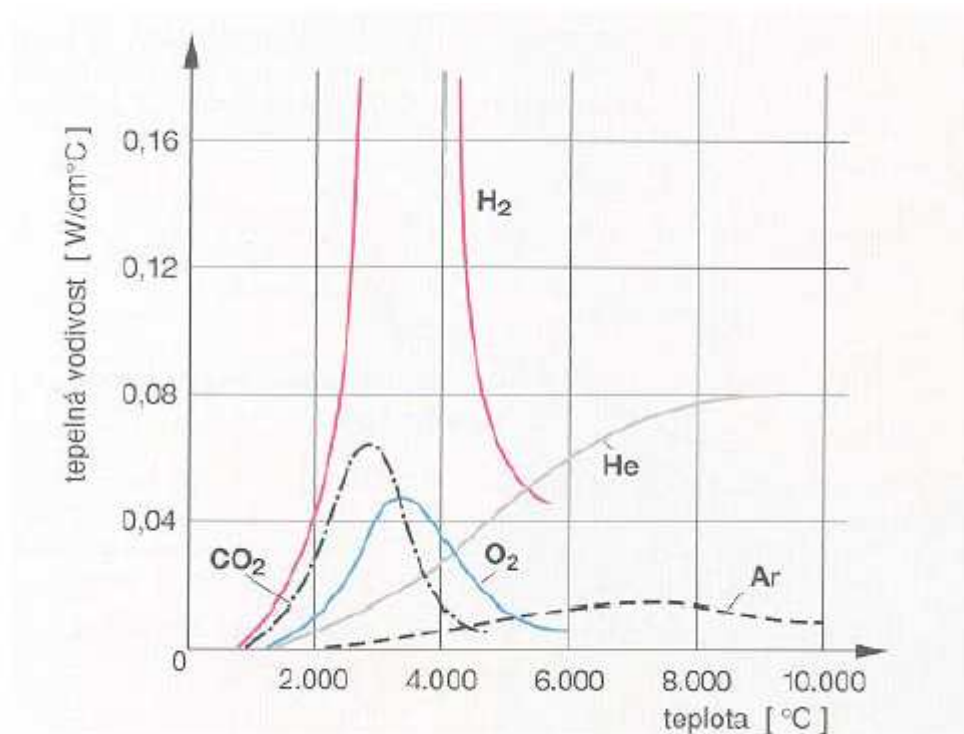
Obr. 4: Reakce ochranného plynu s povrchem svarové lázně [5]

2.4.1 Směsné plyny

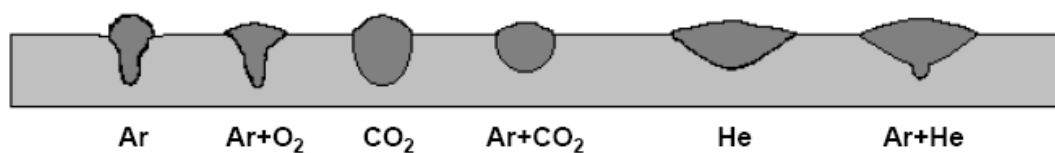
Jednokomponentní ochranné plyny nezaručují při svařování některých kovů a slitin požadovaný stabilní svařovací proces a pravidelný přenos kovu v elektrickém oblouku, proto se v dnešní době často nahrazují směsmi plynů na bázi argonu. Do argonu se v zájmu zvýšení stability oblouku přidávají zejména plyny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

Výhody použití směsných plynů

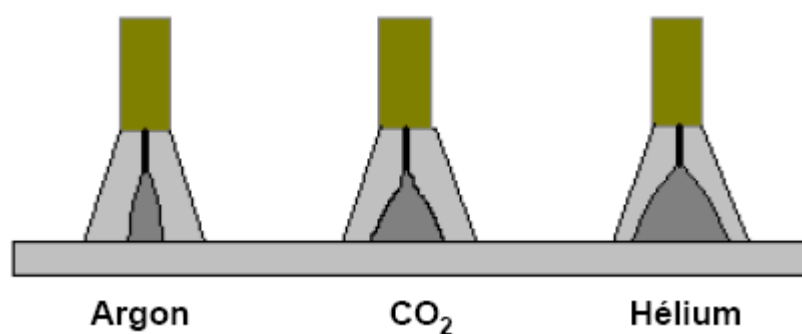
- Zvýšení stability procesu svařování
- Snížení rozstříku tekutého kovu
- Zlepšení formování svarové housenky
- Zvýšení produktivity svařování



Obr. 5: Závislost tepelné vodivosti různých plynů na teplotě [6]



Obr. 6: Tvar závaru [6]



Obr. 7: Tvar elektrického oblouku [6]

2. 5. Trhliny ve svarových spojích

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem. Vady výrobku mohou být zjevné, které lze zjistit při prohlídce výrobku pouhým okem nebo jednoduchými pomůckami nebo skryté, které obvykle zjistíme pomocí přístrojů nebo laboratorními zkouškami. Podle ustanovení příslušných předpisů, mohou být vady přípustné nebo nepřípustné. Vady přípustné jsou takové, které normy, technické podmínky nebo smluvní vzorek dovolují a jejich odstranění není nutné. Vady nepřípustné jsou takové, které neodpovídají povoleným hodnotám. Tyto vady mohou být buď opravitelné, nebo neopravitelné.[8]

2.5.1 Trhliny za tepla

Vznikají ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje při teplotách mezi solidu a likvidu nebo i při podsolidových teplotách. Podle detailnějšího hlediska je můžeme rozdělit na trhliny krystalizační, likvační a polygonizační.[8]

2.5.1.1. Trhliny krystalizační

Vznikají při tuhnutí svarového kovu v intervalu pohybující se okolo solidu. Tento interval je označován jako teplotní interval křehkosti. Nejčastější příčinou vzniku krystalizačních trhlin je zvýšený obsah síry. Často vznikají v části svarového kovu, která tuhne jako poslední, tedy ve středu svarové housenky. Trhliny jsou tvarově složité a rozevřené. Krystalizační trhliny mohou být hluboké a mohou výrazně snížit pevnost svarového spoje.[8]

2.5.1.2 Likvační trhliny

Mohou vznikat v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje a také i v oblasti svarového kovu u vícevrstvého svařování, kdy se housenky navzájem překrývají a působí na sebe navzájem vneseným teplem. Nevznikají proto v krycích vrstvách svarového spoje. Nejčastěji je hlavní příčinou vzniku likvacích trhlin zvýšený obsah prvků S, P, B, Ti, Nb a Si.[8]

2.5.1.3 Polygonizační trhliny

Polygonizační trhliny nebo také trhliny z poklesu tažnosti. Hlavní příčinou jejich vzniku je vytváření dislokačních sítí při vysokých teplotách. Tato síť však omezuje další pohyb dislokací a tím se zhoršují podmínky pro plastickou deformaci materiálu a snižuje se tažnost při ochlazování při teplotách přibližně okolo 1000°C. Polygonizační trhliny vznikají především ve svarech austenitických ocelí a slitin niklu.[8]

2.5.2. Trhliny za studena

Studené trhliny vznikají při nízkých teplotách okolo 200°C. Vyskytují se nejčastěji v podhousenkové oblasti svarových spojů, v kořenové oblasti nebo také ve svarovém kovu. Orientaci mohou být podélné, příčné, nebo přes všechny části svarového spoje. Jejich povrch je lesklý a nezoxidovaný. Hlavní příčinou vzniku studených trhlin je přítomnost vodíku ve svarovém spoji, přítomnost struktury citlivé na účinek vodíku a přítomnost tahových napětí.

Zdrojem vodíku bývá nejčastěji atmosférická vlhkost, vlhkost z obalu elektrod nebo tavidel. Dále pak barvy, mazadla na svarových plochách a korozní produkty.

Nejcitlivější struktura na vznik studených trhlin je struktura martenzitická a struktura horního bainitu. Nejméně náchylná na vznik studených trhlin je struktura feritická.

Základním opatřením proti vzniku studených trhlin je předehřev svarových spojů, který snižuje rychlost ochlazování a prodlužuje dobu výdrže nad teplotou 200°C a tím umožňuje difuzi vodíku z materiálu.[8]

2.5.3. Lamelární trhliny

Lamelární trhliny vznikají v základním materiálu nebo také v teplotně ovlivněné oblasti svarového spoje. Mají stupňovitý tvar většinou rovnoběžný s povrchem materiálu. Hlavní činitelé, které ovlivňují přítomnost trhlin, jsou přítomnost velkého počtu plošně rozválcovaných plastických vměstků, plastické vlastnosti oceli ve směru tloušťky a konstrukce svarového uzlu.[8]

2. 6. Svařování s vysokou hustotou výkonu

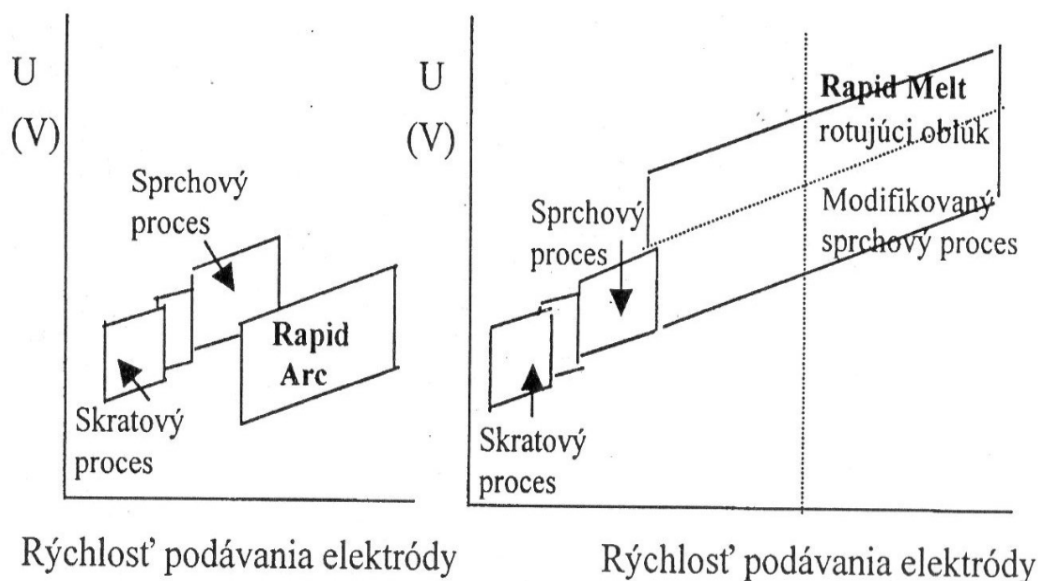
Modifikace vysokorychlostního svařování v ochranném plynu jednou elektrodou představují dvě varianty "Rapid Processing". Nazývají se RAPID ARC a RAPID MELT, které vyvinula bývalá firma AGA AB. Oba jsou založeny na společném principu. Používají vysokou rychlost podávání drátu a to víc než 30 m/min. a uplatňují zvýšený výlet elektrody, běžně 10 až 16 mm, v tomto případě je to až 20 až 35 mm, čímž se zvýší odpor ve výletu drátu a víc se ohřeje konec elektrody. Oba faktory, vyšší výlet elektrody a vyšší rychlost jeho podávání zvyšují výkon tavení drátu. Jako ochranný plyn se používá Ar + 8% CO₂. [9]

2. 6. 1 RapidArc

Při procesu RAPID ARC vzniká zrychlený zkratový proces při rozsahu vyšších proudů a nižších napětí. Pomocí moderních zdrojů proudu je oblouk donucený zkratovat i v oblasti, která byla při použití klasických zdrojů nedostupná. Proces RAPID ARC si zachovává výhody zkratového procesu, které se s výhodou používají hlavně při svařování tenkých plechů. Minimální hloubka plechu je v tomto případě 2 mm. [9]

2.6.2. RapidMelt

Proces RAPID MELT se naopak uplatňuje při svařování vyššími proudy a napětími, přičemž rychlost podávání elektrody může být víc jak 30m/min. Podle zvoleného napětí může vzniknout přenos kovu rotačním obloukem (oblast vyššího napětí) nebo moderovaným sprchovým procesem (oblast nižšího napětí). V obou případech je možné získat výkon tavení až 20 kg/h. Proces RAPID ARC má v porovnání s konvečním GMAW nižší tepelný příkon. Proto je menší teplem ovlivněná oblast a jsou i menší deformace. Naopak proces RAPID MELT má větší tepelný příkon, pomalejší chladnutí, ale i nárůst velikosti a pokles plasticity v teplem ovlivněné oblasti. [9]



Obr. 8: Charakteristiky procesů RapidArc a RapidMell. [9]

2.6.3. TIME/TIME Twin

Tento proces za pomoci 4-složkového plynu a kvalitního zdroje propojuje všechny zmíněné oblasti přenosu kovu bez přechodových jevů.

Vysokovýkonný svařovací postup TIME je možno realizovat jako manuální, mechanizovaný, nebo také jako automatizovaný. Úspěšnou aplikaci umožňuje výkonná technologie svařovacího zdroje, stejně tak jako elektrody s dobrými transportními vlastnostmi a pro ten který případ přizpůsobené ochranné plyny. Nejvýkonnější varianta TIME má k dispozici dva dráty, které se současně odtavují ve společné tavné lázni. U tohoto tak zvaného TimeTwin postupu jsou kontaktní trubice speciálního hořáku vzájemně izolované, v důsledku čehož se přechod materiálu pro každou drátovou elektrodu řídí selektivně. Svařovací rychlost je oproti svařování MIG/MAG dvoj- až trojnásobná, při nejvyšší možné kvalitě a minimálním rozstříku.

Ve funkci ochranného plynu se používají inertní plyny s podílem aktivního plynu. Obvykle se jedná o směs s hlavním podílem argonu doplněného příměsí hélia, kyslíčníku uhlíčitého a kyslíku. Výsledky provedených zkoušek ukázaly, že v mnoha aplikacích se dosáhne optimálních výsledků při vynechání některé příměsi, nicméně hlavním podílem zůstává stále argon. V mnoha případech přispívá významně podíl

hélia ke zvýšení svařovací rychlosti. Důvodem toho je jednak vysoká teplota TIME oblouku a jednak velká tepelná vodivost hélia, která přispívá k optimálnímu napojení svaru na boky svarové drážky. Optimální podíly kyslíčnicku uhličitého a kyslíku závisejí rovněž na příslušné aplikaci.(fronius)

Potřebné vybavení odpovídá technice svařovacího zdroje, stejně tak jako posuv drátu a svařovací hořák, aplikacím MIG/MAG, avšak jednotlivé komponenty jsou svým dimenzováním a výkonností přizpůsobené potřebám vysokovýkonného svařování TIME. Proto jsou ruční hořáky TIME často vybavené stavitelnou kontaktní trubicí pro nastavování výletu drátu (Stick-Out) a dvouokruhovým chladicím systémem. Druhý okruh chladí přímo plynovou hubici a zaručuje i při plném výkonu její dlouhou životnost a rovněž snadné uvolňování odstříků.

Zvláštností svařovacího procesu TIME je oddělený svařovací potenciál se samostatným svařovacím zdrojem pro každý z obou drátů. Synchronizační jednotka na zdrojích řídí časový průběh přechodu materiálu na jednotlivých drátech. Následkem toho je pohyb drátu i průběh svařovacího proudu řízený samostatně pro každý oblouk.



Obr. 9: Technologie TIME/TIME Twin.

Hlavní využití nachází vysokovýkonné svařování TIME a TimeTwin ve strojírenství, stavbě ocelových konstrukcí, lodí, motorových vozidel a výrobě nádrží a zásobníků. Používanými materiály jsou zde nelegované a nízkolegované druhy ocelí, jemnozrnné ocele a ocele odolné nízkým teplotám. Tento svařovací postup nabízí celou řadu předností. Odtavný výkon činí více, než 10 kg/hod. Podíl hélia v

ochranném plynu zajišťuje hluboký závar vysokou dynamickou pevnost svarových spojů. Průvodními znaky dobrých svařovacích vlastností jsou čisté povrchy svarových švů, jejich hladké přechody a minimální výskyt rozstřiku. Dokončovací práce se pak stávají zbytečnými. Vysokou míru flexibility dokazují vysokovýkonné svařovací postupy svojí vhodností pro všechny síly plechu. Ani v nepříznivých svařovacích polohách není nutno snižovat odtavný výkon a omezené tepelné zatížení udržuje deformace součástí v úzkých mezích.

Na rozdíl od jednodrátového svařování TIME se svařování TimeTwin používající dva dráty omezuje na mechanizované a automatizované aplikace. Zejména v případě impulzního oblouku probíhá uvolňování kapky na obou drátových elektrodách bez vzájemného ovlivňování, což umožňuje svařovat dokonce i slitiny hliníku. Dvoudrátový proces se oproti jednodrátovému vyznačuje lepší kontrolou tavné lázně. Podstatně vyšší přísun energie je zde přípustný, protože je doprovázený zvýšením svařovací rychlosti. Výhodnou je rovněž časově posunutá aktivita druhého oblouku s efektem prodloužení odplynovacího času a tím i výrazného snížení tvorby pórů.[9]

2.6.4. Svařování trubičkovým drátem (FCAW)

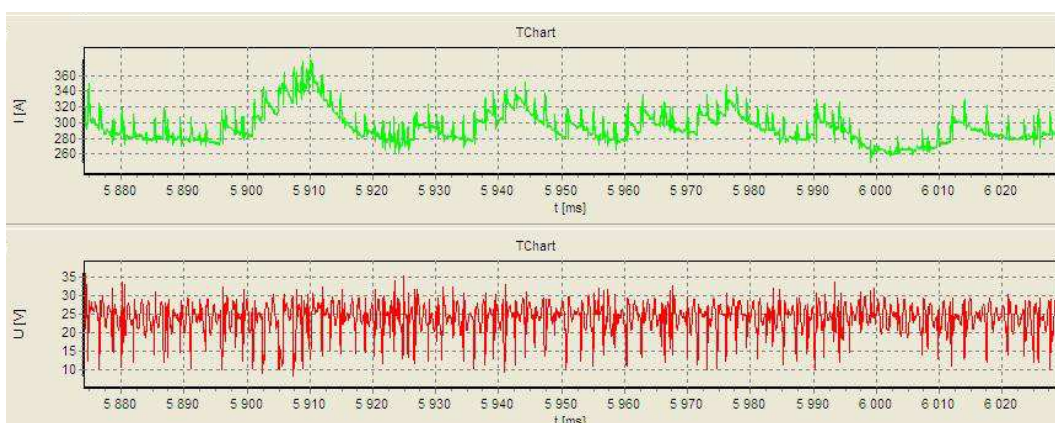
Při svařování trubičkovým drátem se pracuje s plněnou elektrodou (trubičkovým drátem), která je tvořena páskou svinutou do kruhového průřezu nebo tenkostěnnou trubičkou, s vnitřní náplní tavidla, případně kovového prášku, případně i s potřebnými legurami. Oproti plnému drátu lze u plněné elektrody docílit různým složením plniva i potřebných operativních svařovacích vlastností i různých vlastností svarového kovu.

Oproti plnému drátu lze u plněné elektrody docílit různým složením plniva i potřebných operativních svařovacích vlastností i různých vlastností svarového kovu. Podstatně vyšší proudová hustota při hoření oblouku plněné elektrody umožňuje při jinak stejných parametrech svařovacího proudu ve srovnání s drátem plného průřezu podstatně rychlejší odtavování, a tím i vyšší výkon svařování spolu se snazší kontrolou a ovládáním svarové lázně.[6]

Plněné elektrody se obvykle používají s přívodem ochranného plynu (ČSN EN 439), náplň některých druhů však může být koncipována i tak, že při svařování vzniká vlastní ochranná atmosféra a samostatný přívod ochranného plynu není potřebný.

2.6.5 Svařování metodou zkratované sprchy

Metoda patří do kategorie svařování s vysokou hustotou výkonu. S využitím moderních invertorových zdrojů s řídicí frekvencí 50 kHz bylo možno snížit napětí a výlet drátu v oblasti sprchového přenosu kovu až dochází ke zkratování jednotlivých drobných kapek sprchy, což je patrné na záznamu z monitorování procesu, kde 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.[1]



Obr. 10: Průběhy proudu a napětí – laboratoř TUL.[1]

2.7. 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.

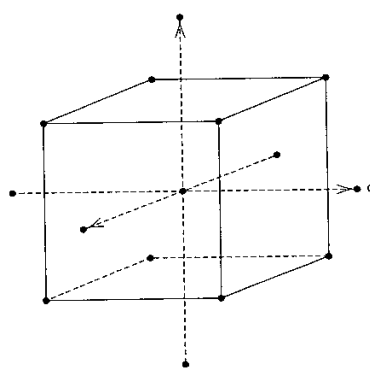
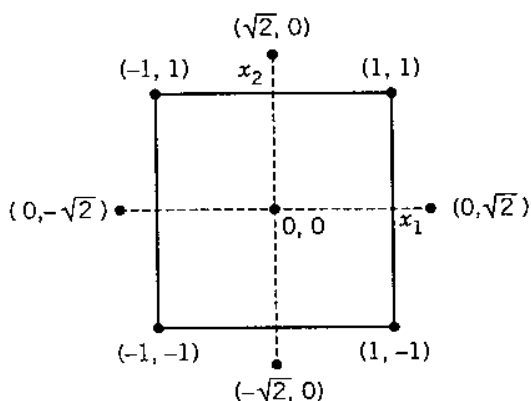
2.7.1. Metoda středové kompozice

Tato metoda, použitá již v předcházejících pracích, nabízí proti běžnému ortogonálnímu uspořádání, vhodnější **sférické uspořádání** parametrického prostoru.

Návrhová matice experimentů podle středové kompozice sestává z:

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

Body návrhu tak vymezí v parametrickém prostoru vícerozměrný sférický tvar (kruh pro 2 parametry, koule pro 3 parametry, atd. viz obr. 17 a 18) , doplněné o několik středových bodů, poskytujících odhad rozptylu. [1]



Obr. 11: Uspořádání hodnot parametrů pro 2 proměnné.

Obr. 12: Uspořádání hodnot parametrů pro 3 proměnné.

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

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (0.1)$$

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]

3. Praktická část

3.1. Cíl práce

Cílem a úkolem praktické části bylo po vzoru předchozích prací na koutových svarech, navrhnout algoritmus pro optimalizaci svařování tupých úkosových svarů, navrhnout, provést a vyhodnotit soubor experimentů podle metody DOE a zobecnit dosažené výsledky jako podklad pro další optimalizace systémů zdroj-drát-plyn pro použití na tupé spoje.

3.2. Popis použitého zařízení a vybavení.

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 inverterové 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]

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	86 kg
Rozměry d x š x v	119 x 54,5 x 120 cm



Obr. 13: Migatron Sigma 500 pulse.[6]

Tab. 1: Technická data svařovacího zdroje

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]

Technická data:

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 Použitý ochranný plyn Ferromaxx Plus

Je tříložková směs plynu firmy AIRPRODUCTS. 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 20% vyšší rychlost ručního svařování v porovnání s běžnými směsnými plyny Ar/CO₂.

Plyn zaručuje hladký a plochý povrch svaru díky sníženému rozstříku. Použitelnost pro všechny tloušťky základního materiálu a druhy přídavných svařovacích materiálů (plné i trubičkové dráty). Ideální i pro robotizované pracoviště. Zlepšuje pracovní prostředí omezenou tvorbou ozónu.[6]

3.2.4 Použitý materiál

Pro všechny svařené vzorky tupých svarů byl použit základní materiál ocel 11373, i když se současné době normy doporučují pro svařování mikrolegované oceli

(S 235). Podle námi sledovaných parametrů se nejvíce žádný rozdíl v použitých materiálech. Materiál se řezal z pásoviny ČSN 42 5522 o průřezu 100 x 16 mm.

3.3. Příprava a svařování vzorků

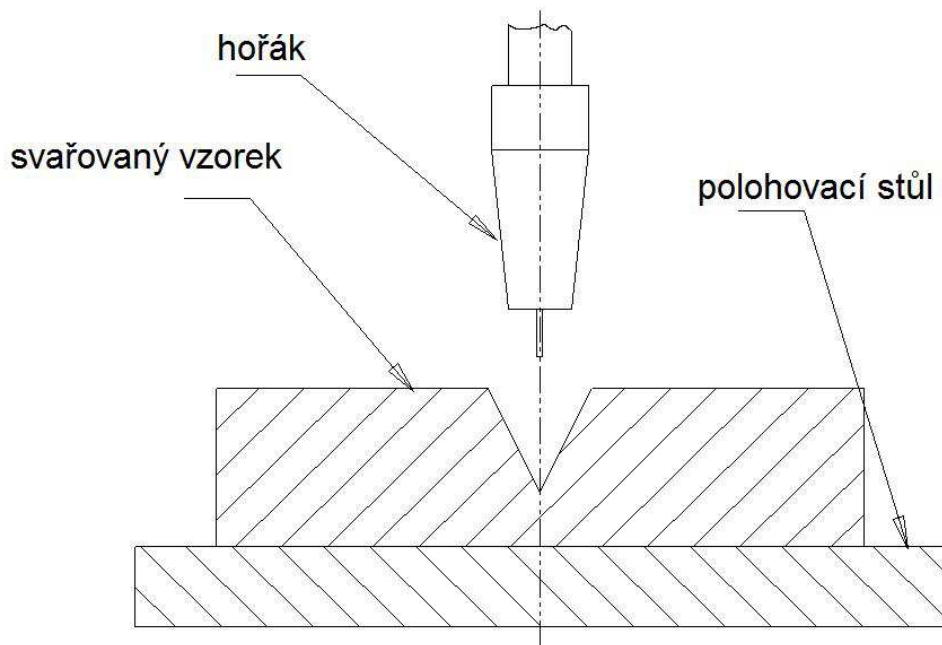
Práce začínala rozřezáním pásoviny o průřezu 100 x 16 mm. Řezání se provádělo kyslíko – acetylenovým hořákem s automatem na požadovanou délku vzorků 250 mm. Po nařezání se odstranily zbytky strusky po tavení materiálu.

Další operace při přípravě vzorků bylo frézování úkosů. Nařezané díly byly v otočném svěráku ofrézovány dle navržených parametrů viz. Tabulka. Při frézování jednotlivých dílců jsem se snažil o nejpřesnější nastavení úběru frézy. Ale i přes dodržení nastavovaných hodnot se výsledné parametry úkosu projevily jako nepřesné. Tyto vzniklé chyby byly odhaleny u vyhodnocování úkosů a navařených svarů. Stupnice na otočném svěráku nebyla dlouho kalibrována a to se projevilo na frézovaných plochách úkosů.

Po nafrézování se jednotlivé úkosity nabodovaly k sobě podle velikostí navržených ploch a výškou úkosů. Toto probíhalo na masivní ocelové desce stolu, kde byly dílce posazeny k sobě a zatíženy, aby nedošlo k průhybu dílů při bodovém svařování vlivem tuhnutí svarové lázně. Bodování jsme směřovali do čela svařenců, abychom zabránili porušení a deformaci ofrézovaných ploch.

Samotné svařování vzniklých tupých svarů bylo provedeno na automatizovaném pracovišti, které se skládalo z lineárního automatu a polohovacího zařízení na upínání vzorků.

Vzorek byl položen vodorovně na polohovací přípravek tak, aby svíral s hořákem 90° viz Obr. 20. Hořák byl nastaven v rovině mezery svaru a nastaven 10° dopředu. Úhel a vzdálenost kontaktní špičky byla nastavena měrkou. Průběh svařování byl monitorován monitorovacím zařízením WeldMonitor, které se stává z průběžného měření proudu, napětí, rychlosti drátu, rychlosti svařování a průtokového množství plynu, které jsme vyřadili, protože jsme použili kalibrovaný nastavitelný ventil.



Obr. 14: Svařovací poloha vzorku.

3.4. Rozměrová analýza vzorků

Vzorky pro metalografický výbrus byly získány rozřezáním svařených svarů rovnoběžně podél osy svaru, kyslíko- acetylenovým hořákem. Na metalografické pile se dále dělily příčným řezem zhruba v polovině vzorku, v místě, kde svar byl vizuálně optimální.

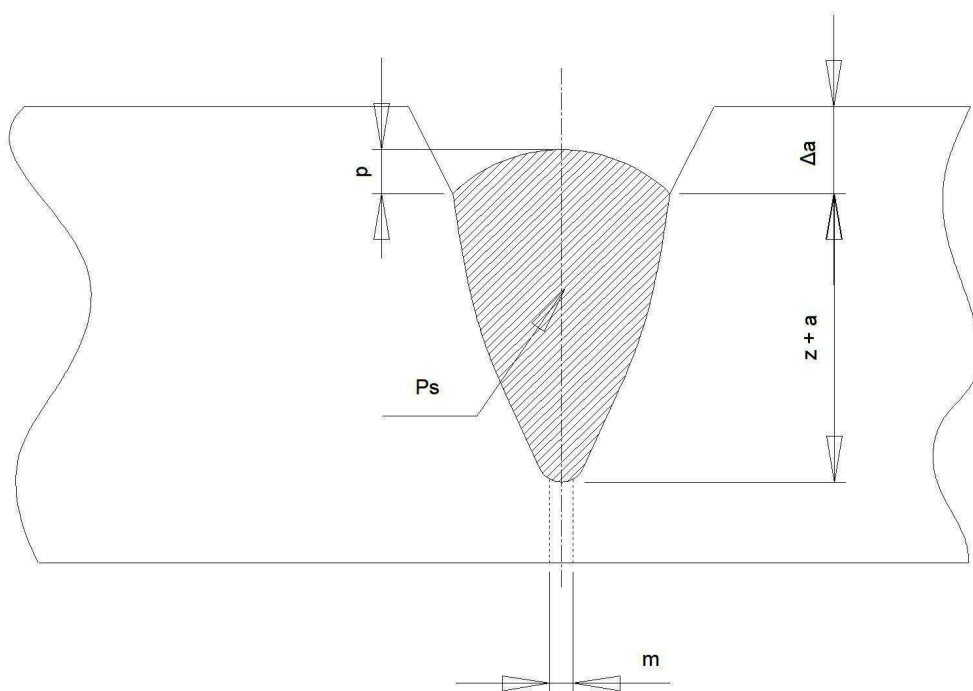
Poté byl vzorek zalit do dentakrylu a po jeho ztuhnutí byl proveden makrovýbrus na metalografické brusce. Postupně jsme na broušení vystřídali čtyři sady brusných papírů u zrnitosti 120, 220, 400 a 600. Poslední mechanická úprava zahrnovala leštění na textilním kotouči s přídavkem abraziva o velikosti 1 μ m.



Obr.15: Metalografická laboratoř. [2]

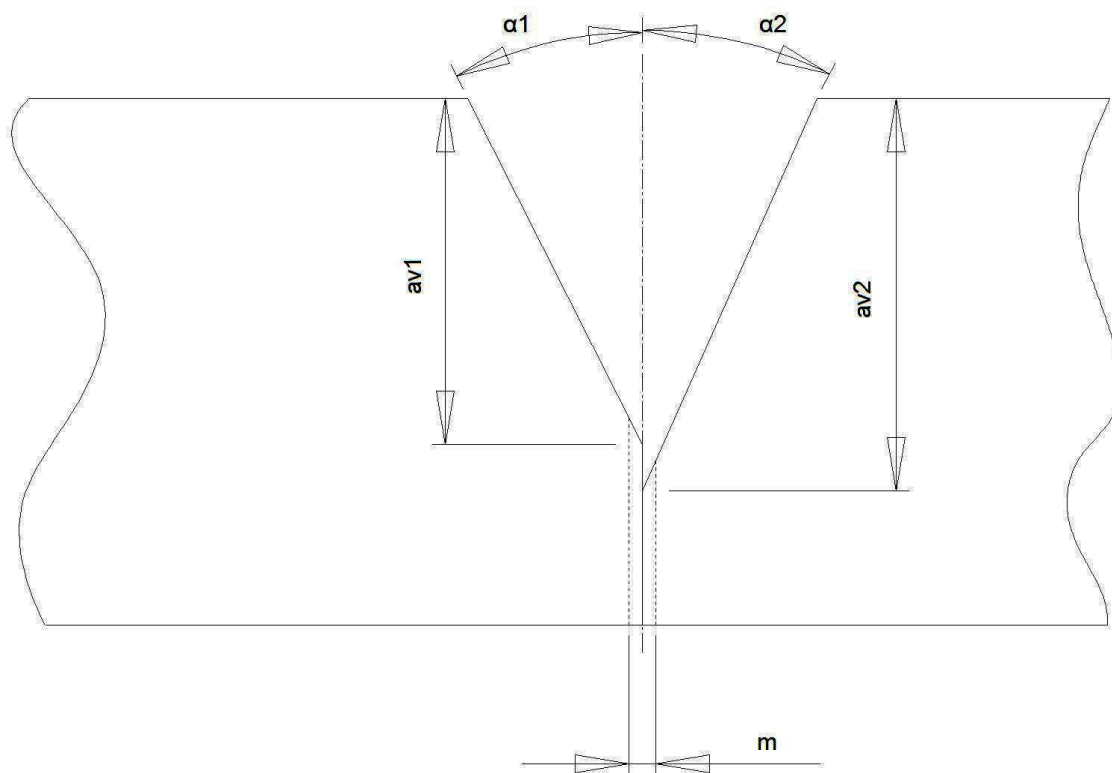
Připravené metalografické vzorky se poté naleptaly 3 % Nitalem. Focení, snímání a vyhodnocování vzorků probíhalo pomocí optické kamery a softwaru NIS-elements.

Pomocí softwaru NIS-Elements se naměřily rozměry svarů. Na svarech se odečetly hodnoty v příslušném měřítku dle použitého optického zvětšení. Na svarech se měřily tyto rozměry - výška svaru + závar ($a + z$), plocha svaru (P_s), svarová mezera (m), dopočet do výšky úkosu (Δa), převýšení svaru (p). Náčrt je znázorněn na obr. 16.



Obr.16: Náčrt měřených hodnot na tupém svaru.

Byl měřen i samotný úkos bez svaru z úvodní nebo konečné části svařeného vzorku, kde jsme z důvodu nepřesnosti frézování měřili jednotlivé úhly ofrézovaného zkosení materiálu (α_1 , α_2), jednotlivou výšku úkosu (a_1, a_2) a dále mezeru mezi jednotlivými díly (m), způsobenou zpravidla prasknutím stehu v půběhu svařování. Náčrt měřených hodnot zobrazuje obr.23.

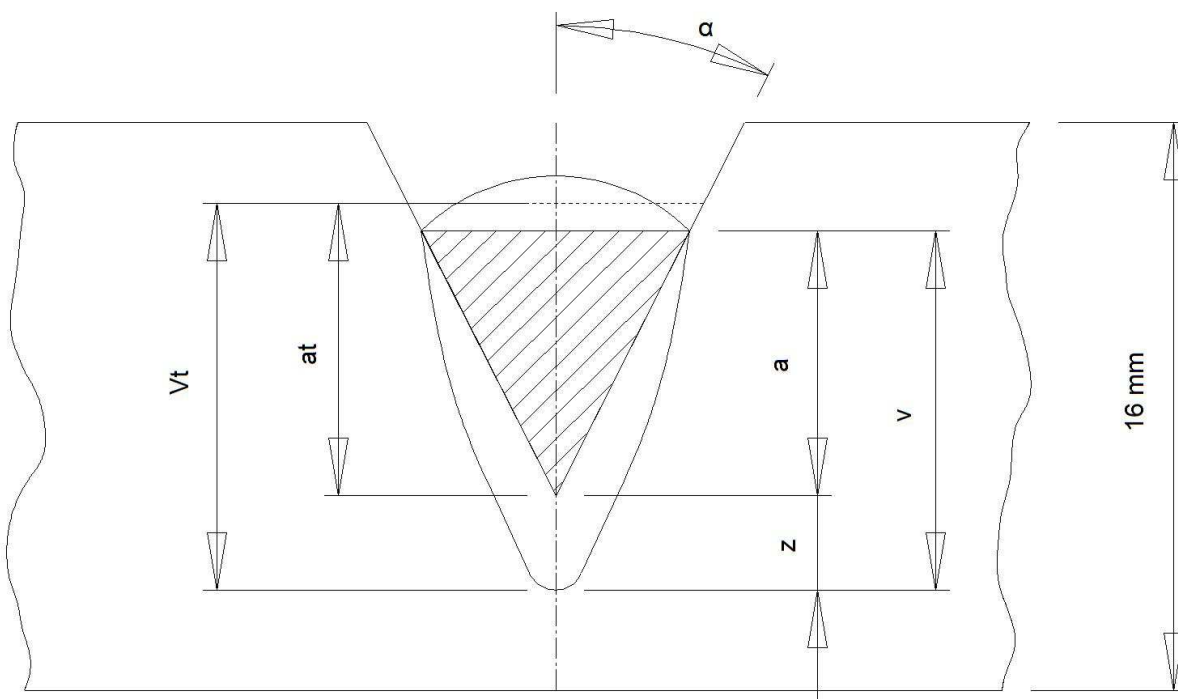


Obr.17: Náčrt měřených hodnot svařovaného úkosu.

3.5. Návrh experimentů.

Návrh experimentů byl směřován do oblasti zkratové sprchy a vycházel z již provedené optimalizace soustavy zdroj-drát-plyn pro koutové svary. [2]

3.5.1. Návrh algoritmu výpočtu efektivity provedení V-svaru.



Obr. 18: Náčrt hodnot pro výpočet efektivity.

Efektivní hodnotu výšky návaru a_t vypočteme ze skutečné plochy návaru P_N .

$$a_t = \sqrt{P / \operatorname{tg} \alpha} \quad (0.2)$$

Efektivitu provedení V-svaru pak vypočteme stejným způsobem, jako u koutového svaru:

Pro svar 1. jakosti :

$$BE_1 = \frac{z}{v_t} * \frac{a}{a_t} = \frac{z * a}{\left(\sqrt{\frac{P}{\operatorname{tg} \alpha}} + z \right) * \sqrt{\frac{P}{\operatorname{tg} \alpha}}} = \frac{z * a}{\frac{P}{\operatorname{tg} \alpha} + z * \sqrt{\frac{P}{\operatorname{tg} \alpha}}} \quad (0.3)$$

Pro svar 3. jakosti :

$$BE_3 = \frac{z}{v_t} * \frac{v}{v_t} = \frac{z * v}{v_t^2} = \frac{z * v}{\left(\sqrt{\frac{P}{\operatorname{tg} \alpha}} + z \right)^2} \quad (0.4)$$

Na rozdíl od optimalizace koutových svarů je u V- svarů o jeden parametr více, protože stejná plocha návaru se dá vytvořit různou kombinací úhlu úkosu a výšky svaru. Proto optimalizační diagram bude min. trojosý.

Vzhledem k tomu, že se jedná o první optimalizace V-svarů, byly před vlastní optimalizací provedeny 2 fáze experimentů, mapující vhodné parametrické pole.

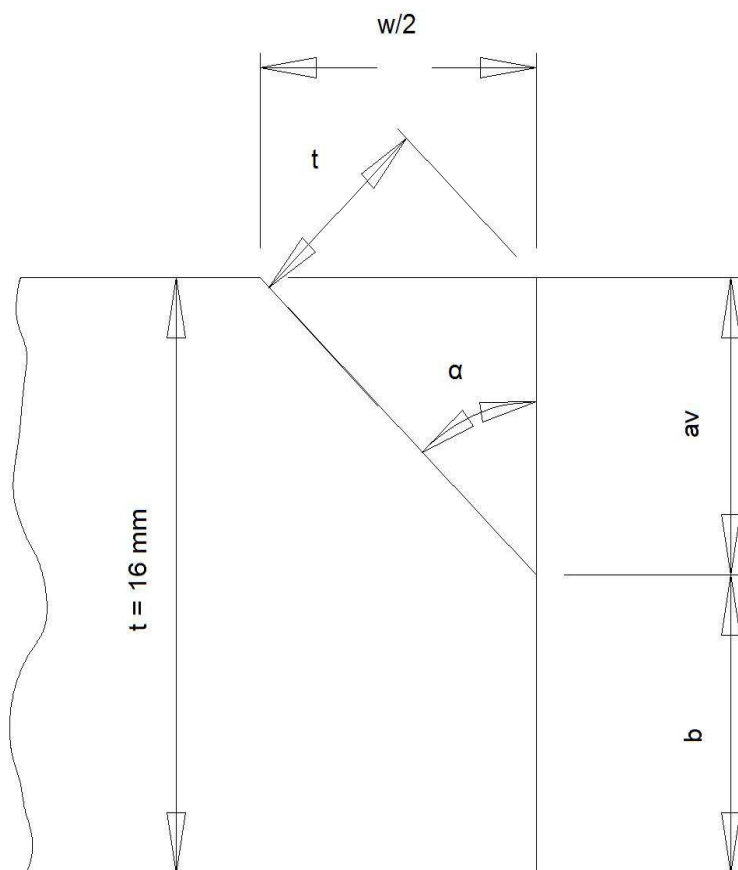
3.6 Série 1.

Byla provedena série experimentů pro přiblížení oblasti optimálních parametrů v rozsahu – plochy návaru 16, 20 a 24 mm², dále v rozsahu rychlostí drátu 9, 13 a 15 m/min a v rozsahu úhlů úkosů 20, 30 a 45°.

Tabulka 2 (úplná v příloze) obsahuje i parametry, potřebné ke zhotovení úkosů dle obr. 19 a k jejich kontrole. Výška úkosu a_v byla zvolena tak, aby se požadovaný svar do úkosu bezpečně vešel a pokud možno zůstal trochu nevyplněn. Stejně tak zbývající velikost b do rozměru tloušťky musí být vždy větší než maximální hloubka závaru. Plechy byly opatřeny úkosy z obou stran tak, aby se svařila jedna polovina svarů a po odříznutí hotových svarů druhá polovina.

Tab. 2: Vybrané parametry.

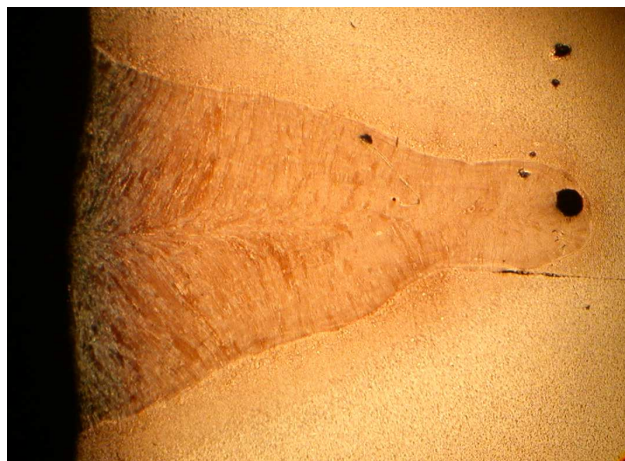
Číslo svaru	P	α	Vd	Vs
11	20	45	9	0,61
12	16	45	13	0,88
13	16	30	13	0,88
14	16	30	14,5	0,98
15	20	30	13	0,7
16	20	30	15	0,81
17	20	20	13	0,73
18	20	20	15	0,98
19	24	20	16	0,6
110	24	20	16	0,72



Obr. 19: Parametry úkosů

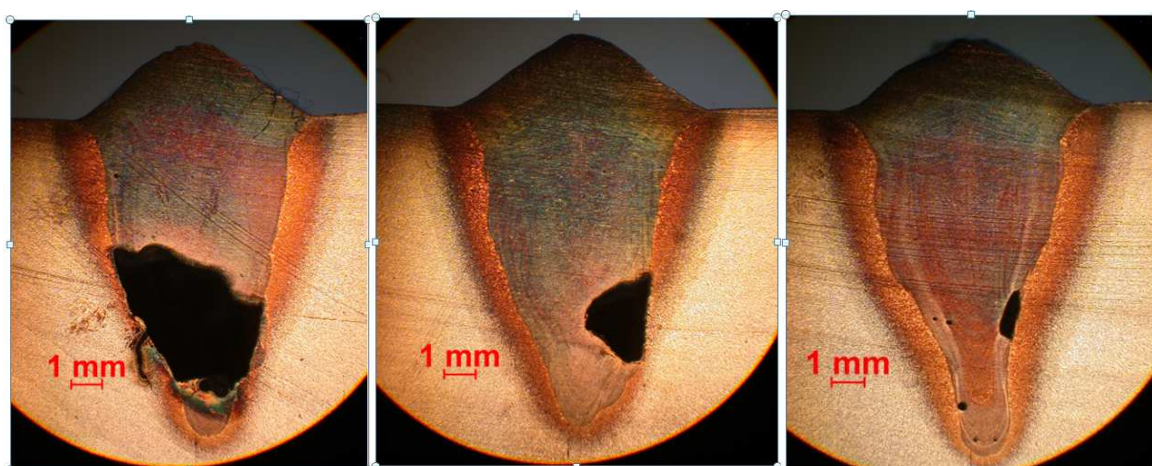
Shrnutí

Především se ukázalo, že přesné vedení hořáku do kořene je zde stejně důležité jako u koutových svarů. Některé svary vykazovaly kořen svaru mimo mezeru (svar 13).



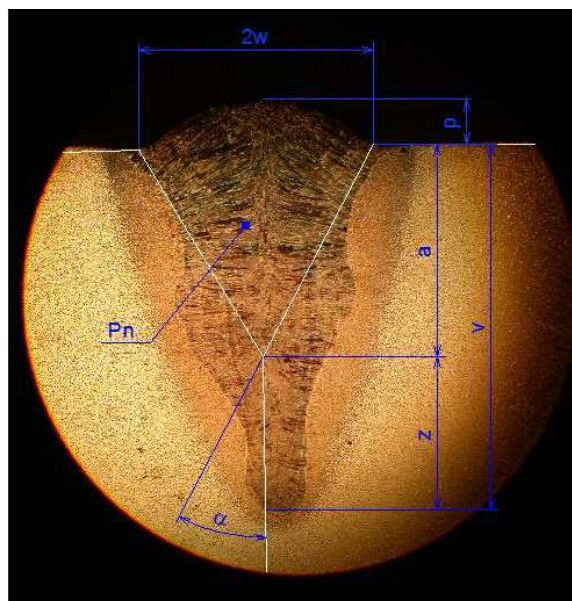
Obr. 20: Svar 13.

Extrémní hodnoty úhlu úkosu se projevily negativně – při úhlu 45° (V 90) byl svar vypouklý a s minimálním závarem (svary 11, 12), naopak u svarů 20° (V40) s extrémě hlubokým závarem se projevila tunelová porozita – svar 18.



Obr. 21: Řezy svaru 18.

Nejvyšší efektivity a kvality dosáhl svar 14 – obr. 22 při úhlu 30°



Obr. 22: Svar 14.

3.7. Série 2.

Tentokrát byl zvolen 1 režim svařování $v_D = 13,6$ m/min, (optimální z předchozí optimalizace koutových svarů) pro hodnoty $v_S = 0,6$ až $1,0$ m/min, takže plocha návaru P_m je nepřímo úměrná rychlosti svařování. Druhou proměnou jsou úhly úkosu $\alpha = 20 - 40^\circ$. Experimenty mají též za cíl zmapovat vliv kombinace rychlosti svařování a úkosu na tvorbu trhlin za tepla.

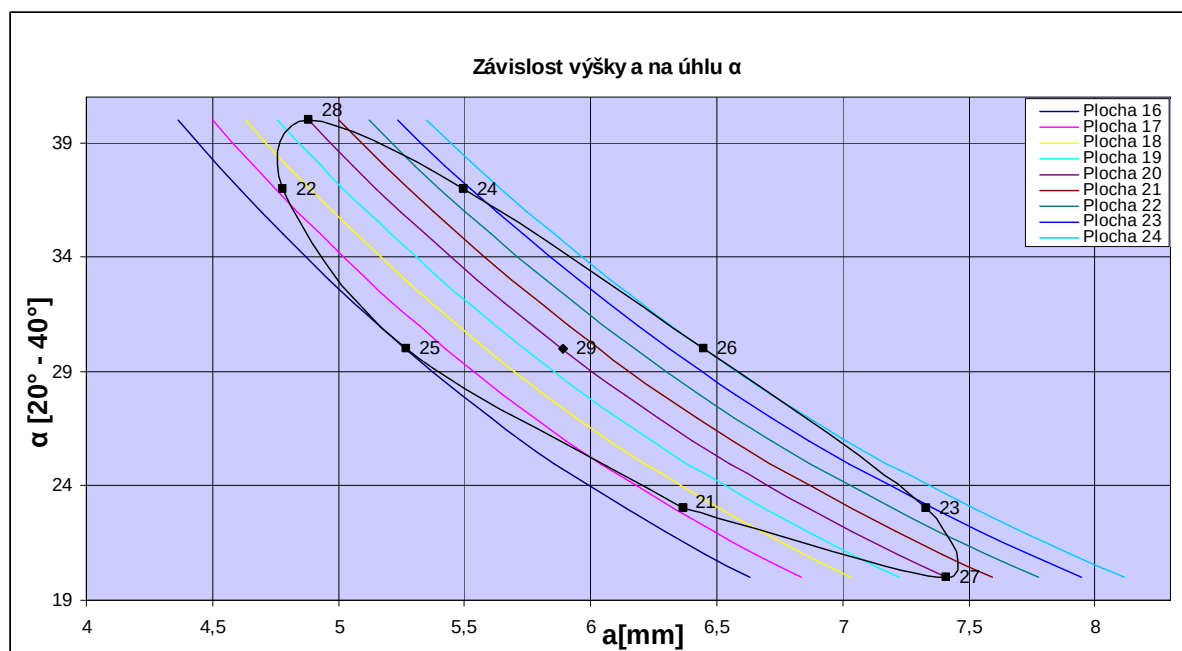
Tab.3: Převod řídicích jednotek.

	-1,414	-1	0	1	1,414
P	16	17,2	20	22,8	24
α	20	23	30	37	40

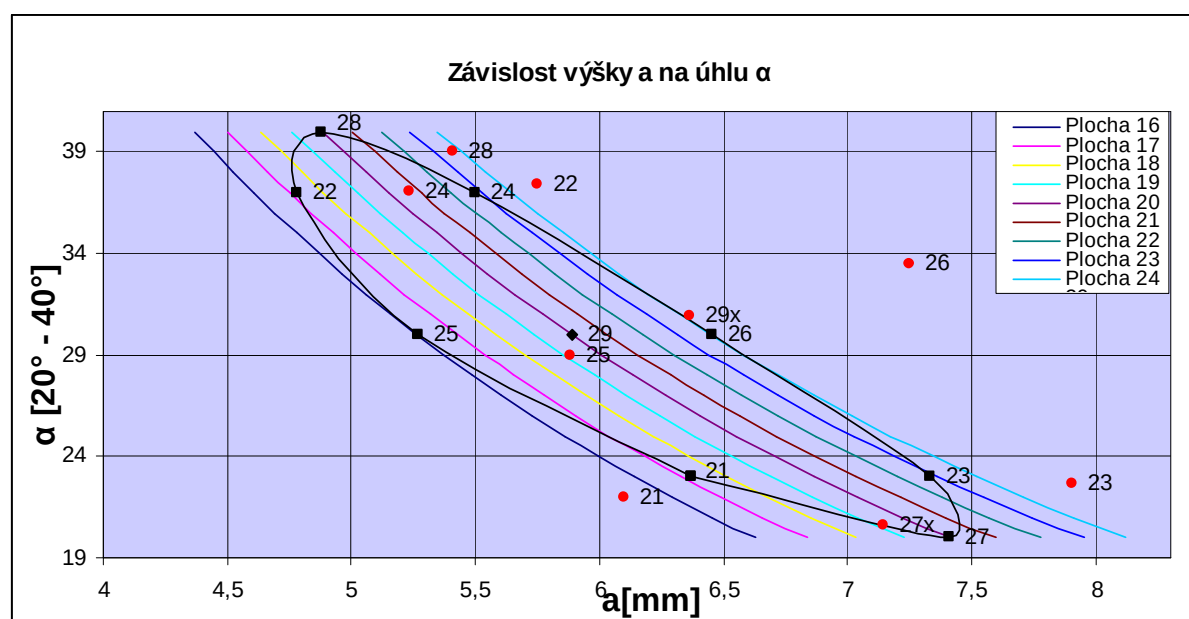
Tab.4: Návrhu experimentů.

číslo svaru			P	α	av	t	w
1	-1	-1	17,20	23,00	6,37	2,50	2,70
2	-1	1	17,20	37,00	4,78	2,88	3,60
3	1	-1	22,80	23,00	7,33	3,87	3,10
4	1	1	22,80	37,00	5,50	3,31	4,15
5	-1,41	0	16,00	30,00	5,27	2,64	3,04
6	1,41	0	24,00	30,00	6,45	3,23	3,72
7	0	-1,41	20,00	20,00	7,41	2,53	2,70
8	0	1,41	20,00	40,00	4,88	3,14	4,10
9	0	0	20,00	30,00	5,89	2,95	3,40

Graf 1: Návrh hodnot pro sérii 2.



Graf 2. Návrh hodnot pro sérii 2 + hodnoty získané měřením.



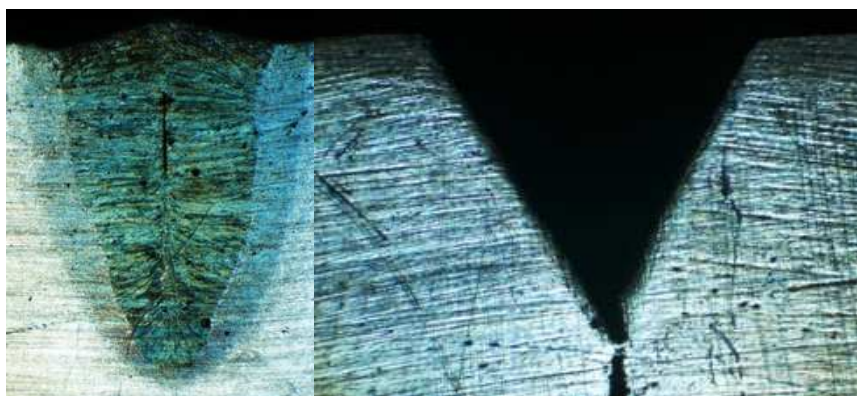
Shrnutí

Z grafu 2 je patrné, že vlivem nepřesnosti frézování jsou skutečné úkopy větší než navrhované (úhel je celkem přesný ale úběr větší). Trhliny za tepla se objevily u svarů s úhlem úkосу 20° (27) a 23° v kombinaci s největší rychlostí svařování (21) a dále u jednoho svaru s úhlem 30° (29). Naopak svar 23 s maximální plochou návaru

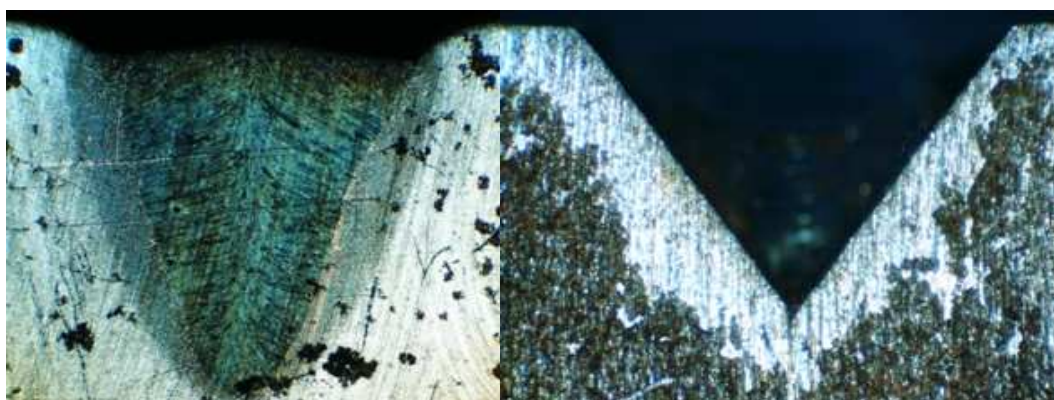
a nejnižší rychlostí svařování je i při úhlu 23° bez trhliny. Nejvyšší hodnotu efektivity provedení má svar 24 s úhlem úkosu 37° (V 74).



Obr. 23: SVAR 27, Plocha 20 mm^2 , alfa - 20°



Obr. 24: SVAR 29, text: Plocha 20 mm^2 , alfa - 30°



Obr. 25: SVAR 24, text: Plocha 16 mm^2 , alfa - 37°

3.8. Série 3 a 4

Série 3 byla navržena pro 3 parametry, plocha návaru, úhel úkosu a rychlost drátu. Pro návrh centrální kompozice z toho vychází 16 svarů.

Tab.5: Tabulka pro převod řídících jednotek.

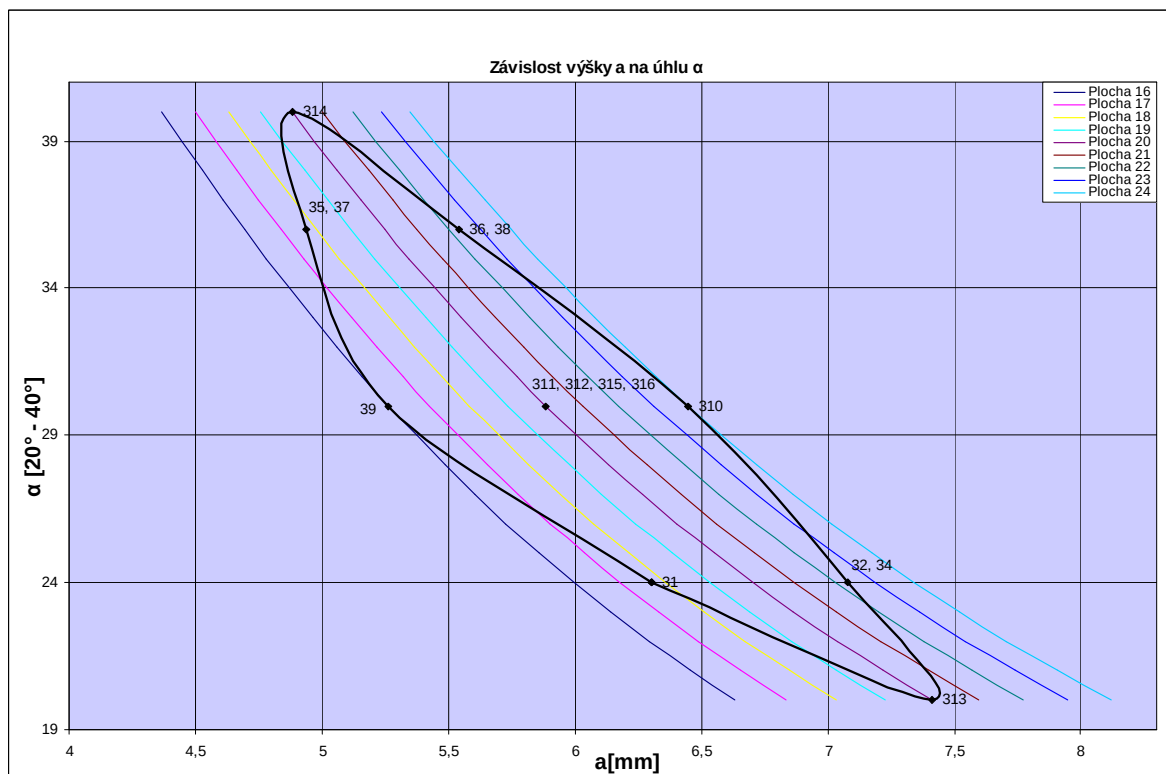
	-1,73	-1	0	1	1,73
P	16	17,7	20	22,3	24
Vd	12	12,6	13,5	14,4	15
α	20	24	30	36	40

Tab.6: Tabulka experimentů dle statistického návrhu.

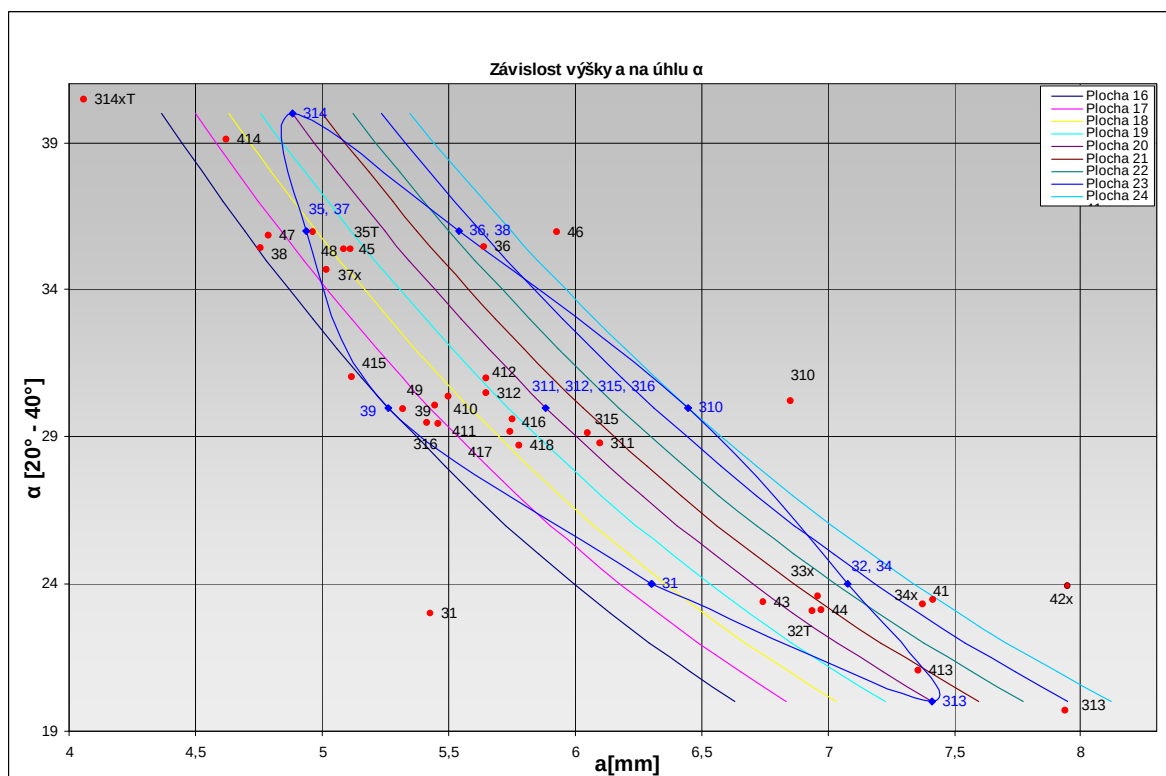
měř.	P	Vd	α	P	Vs	Vd	α	P+4mm ²
1	-1	-1	-1	17,7	0,74	12,6	24	21,7
2	1	-1	-1	22,3	0,59	12,6	24	26,3
3	-1	1	-1	17,7	0,85	14,4	24	21,7
4	1	1	-1	22,3	0,67	14,4	24	26,3
5	-1	-1	1	17,7	0,74	12,6	36	21,7
6	1	-1	1	22,3	0,59	12,6	36	26,3
7	-1	1	1	17,7	0,85	14,4	36	21,7
8	1	1	1	22,3	0,67	14,4	36	26,3
9	-1,7	0	0	16	0,88	13,5	30	20
10	1,7	0	0	24	0,59	13,5	30	28
11	0	-1,7	0	20	0,62	12	30	24
12	0	1,7	0	20	0,78	15	30	24
13	0	0	-1,7	20	0,70	13,5	20	24
14	0	0	1,7	20	0,70	13,5	40	24
15-16	0	0	0	20	0,70	13,5	30	24

Vzhledem k vyššímu počtu vadných svarů v sérii 3 a pro zvýšení statistické pravděpodobnosti výsledků jsme soubor měření zopakovali – při stejné geometrii úkosu s nepatrně vyššími parametry svařování.

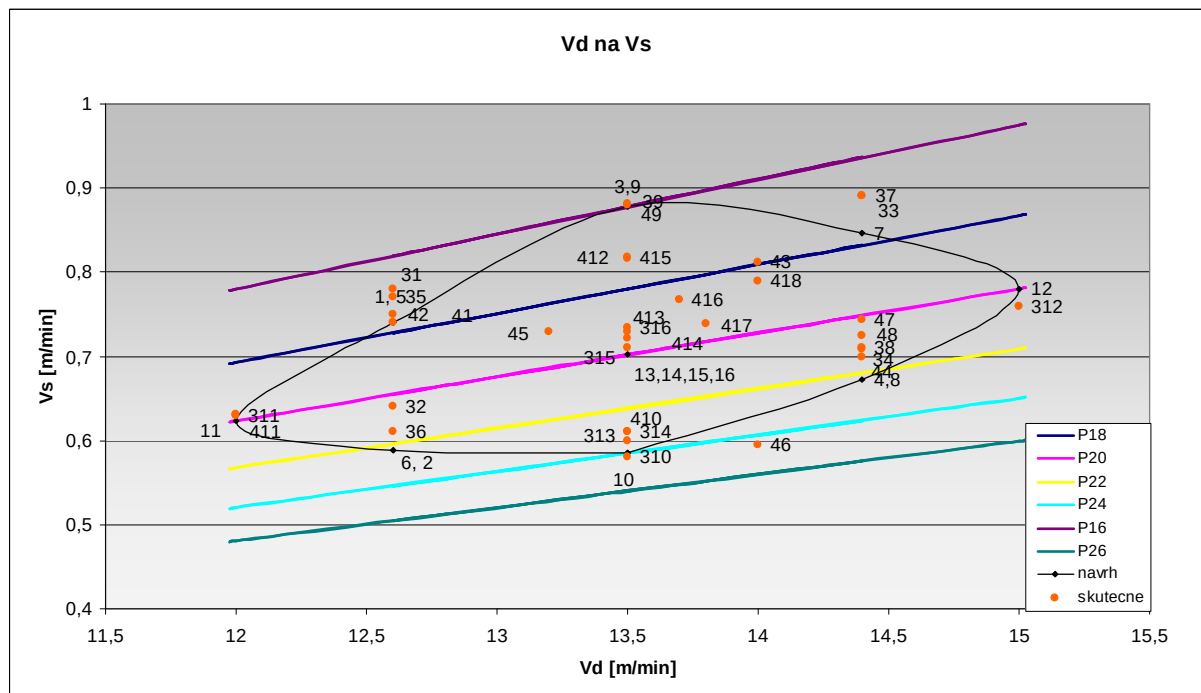
Graf 3: Navrhované hodnoty série 3,4.



Graf 4: Navrhované a změřené hodnoty série 3,4.



Graf 5: Závislost vd na vs

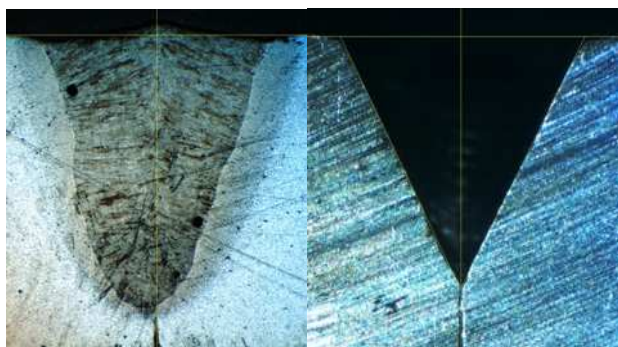


Tab. 7: Naměřené hodnoty a efektivita BE1.

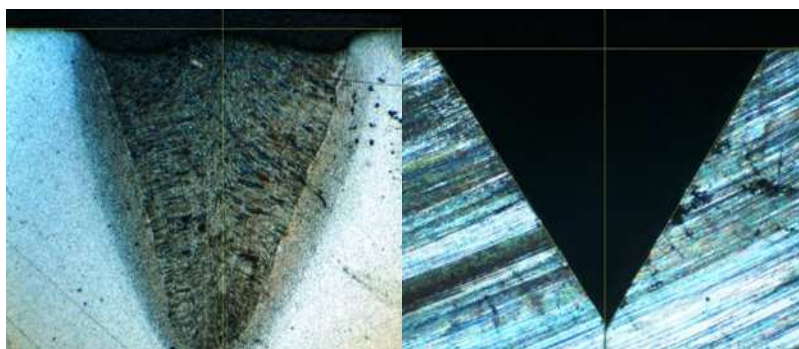
Svar	Vs	Vd	BE1	Svar	Vs	Vd	BE1	Svar	Vs	Vd	BE1
41	0,74	12,6	0,126	412	0,816	13,5	0,253	35	0,77	12,6	0,436
42	0,75	12,6	0,017	413	0,722	13,5	0,150	36	0,61	12,6	0,324
43	0,812	14	0,334	414	0,734	13,5	0,349	37	0,89	14,4	0,448
44	0,709	14,4	0,314	415	0,818	13,5	0,251	38	0,71	14,4	0,349
45	0,73	13,2	0,374	416	0,768	13,7	0,277	39	0,88	13,5	0,384
46	0,595	14	0,347	417	0,739	13,8	0,217	310	0,58	13,5	0,241
47	0,743	14,4	0,395	418	0,79	14	0,230	311	0,63	12	0,274
48	0,724	14,4	0,389	31	0,78	12,6	0,281	312	0,76	15	0,378
49	0,882	13,5	0,309	32	0,64	12,6	0,261	313	0,61	13,5	0,163
410	0,6	13,5	0,274	33	0,89	14,4	0,338	314	0,61	13,5	0,377
411	0,631	12	0,158	34	0,7	14,4	0,340	315	0,71	13,5	0,294

3.9.Hodnocení všech experimentů

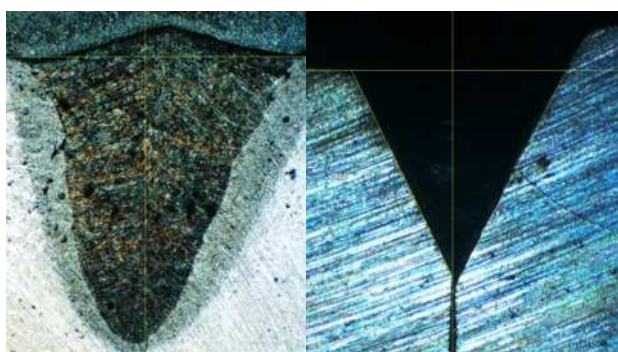
3.9.1.SVARY s max. efektivitou.



Obr. 26: SVAR a úkos 36, Plocha 22 mm², α - 36°



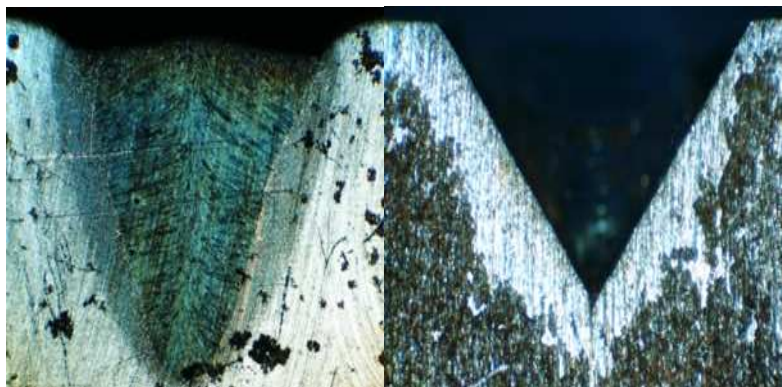
Obr. 27: SVAR a úkos 38, Plocha 22 mm², α - 36°



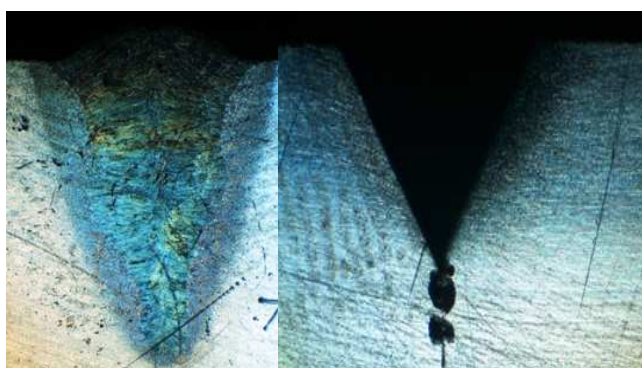
Obr. 28: SVAR a úkos 316, Plocha 20 mm², α - 30°

Tab. 8: Vybrané hodnoty a efektivita BE.

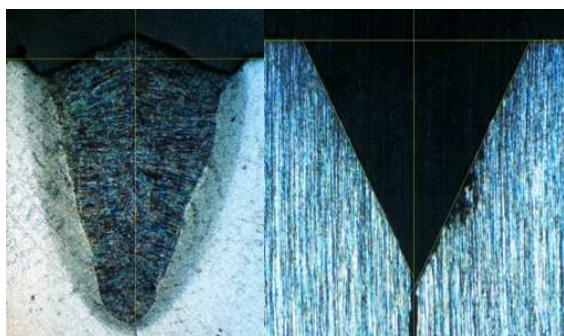
svar	Ps	Vs	Vd	I	U	Pm	Q1	a	z	alfa	D	f	BE1	BE3
36	41,31	0,61	12,60	348,0	29,4	21,48	8,55	5,64	2,53	35,45	0,46	24,34	0,324	0,321
38	39,50	0,71	14,40	379,0	30,4	21,09	8,28	4,76	3,64	35,42	0,44	23,35	0,349	0,370
316	38,37	0,73	13,50	373,0	29,8	19,23	7,77	5,42	2,78	29,46	0,48	25,88	0,299	0,307



Obr. 29: SVAR a úkos 24, Plocha 16 mm², alfa - 36°



Obr. 30: SVAR a úkos 16, Plocha 20 mm², alfa - 30°

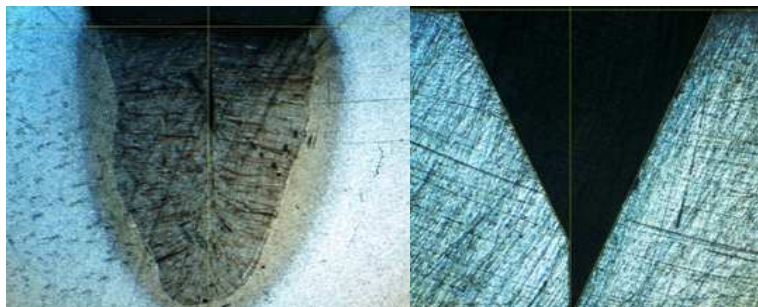


Obr. 31: SVAR a úkos 47, Plocha 20 mm², alfa - 36°

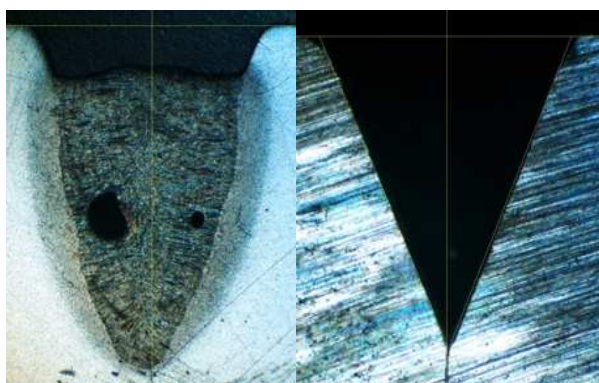
Tab. 9: Vybrané hodnoty a efektivita BE.

svar	Ps	Vs	Vd	I	U	Pm	Q1	a	z	alfa	D	f	BE1	BE3
24	37,30	0,98	14,50	424,0	29,00	15,39	6,40	5,24	2,73	37,10	0,57	35,96	0,437	0,414
16	41,42	0,81	15,00	438,0	29,40	19,26	8,11	5,45	4,52	30,66	0,52	28,70	0,423	0,431
47	41,36	0,74	14,40	391,0	30,70	20,16	8,24	4,79	4,08	35,83	0,52	27,02	0,395	0,413

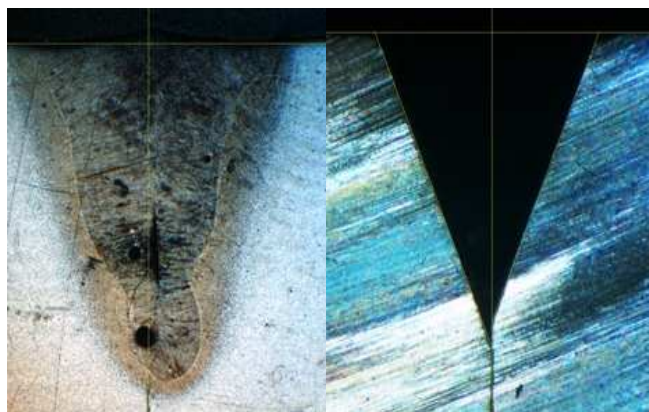
3.9.2. SVARY s vadami (trhliny, póry, tunel. porozita)



Obr. 32: SVAR a úkos 42, Plocha 17 mm², alfa - 23°



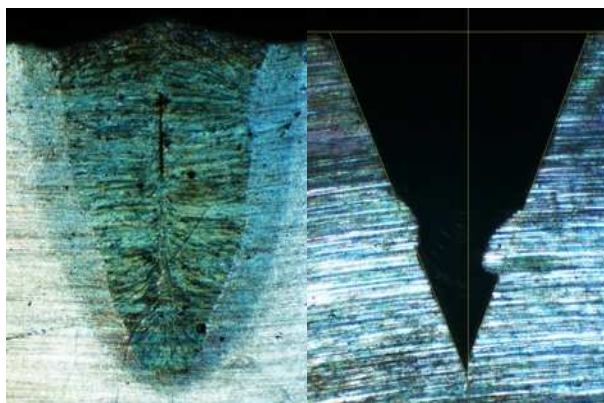
Obr. 33: SVAR a úkos 32, Plocha 20 mm², alfa - 23°



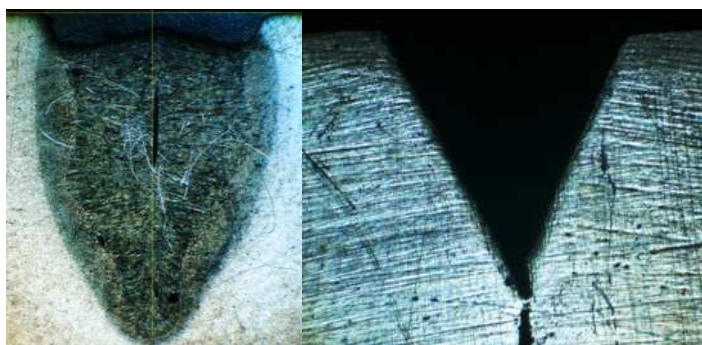
Obr. 34: SVAR a úkos 33, Plocha 17 mm², alfa - 23°

Tab. 10: Vybrané hodnoty a efektivita BE.

svar	Ps	Vs	Vd	I	U	Pm	Q1	a	z	alfa	D	f	BE1	BE3
24	38,7	0,75	12,6	380	29,5	17,5	7,62	8,10	0,08	23,9	0,424	29,3	0,017	0,017
32	41,8	0,64	12,6	357	29,8	20,5	8,48	6,94	2,45	23,1	0,467	26,4	0,261	0,261
33	35,9	0,89	14,4	397	30,9	16,8	7,03	6,96	2,68	23,6	0,507	28,5	0,338	0,327



Obr. 35: SVAR 34, Plocha 22 mm², alfa - 23°



Obr. 36: SVAR 29, Plocha 26 mm², alfa - 30°

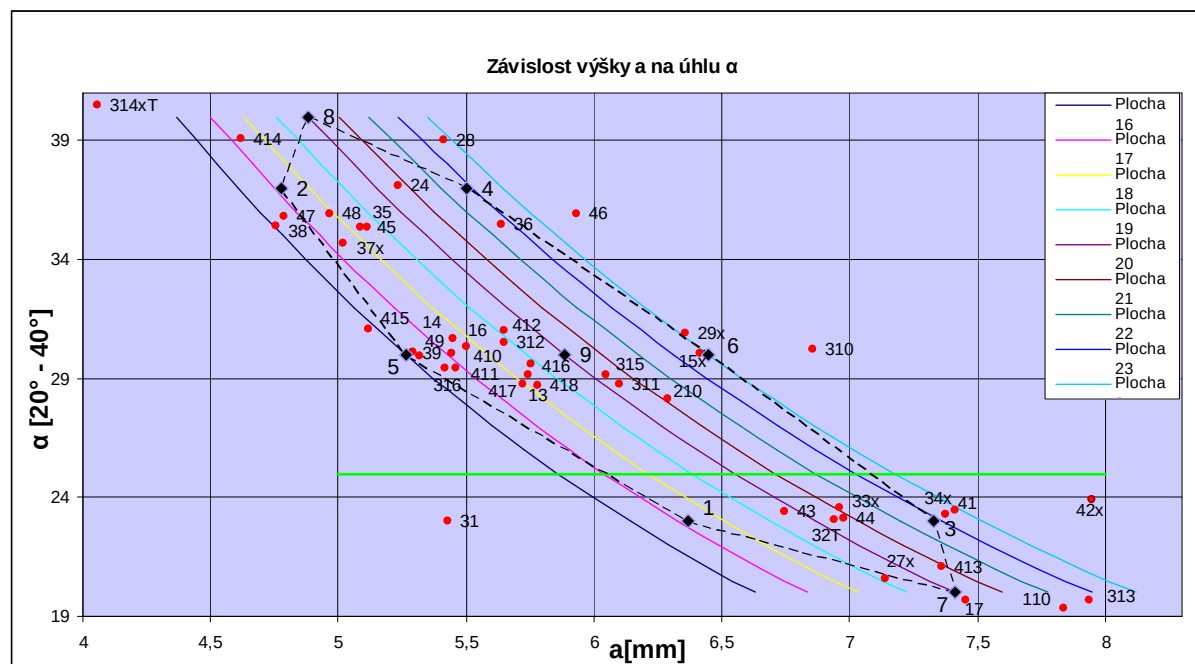


Obr. 37: SVAR 27, Plocha 17 mm², alfa - 20°

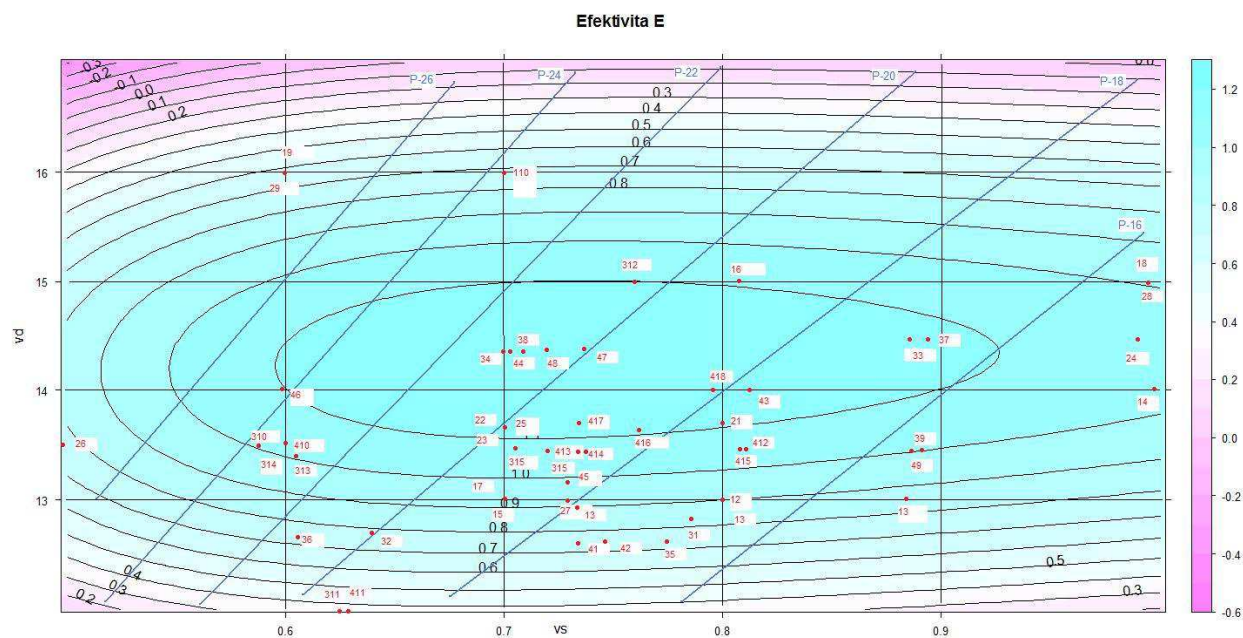
Tab. 11: Vybrané hodnoty a efektivita BE.

svar	Ps	Vs	Vd	I	U	Pm	Q1	a	z	alfa	D	f	BE1	BE3
34	49,7	0,7	14,4	401	30,5	21,4	8,91	7,38	3,40	23,3	0,552	33,4	0,340	0,335
29	40,6	0,6	16	461	30,5	27,7	11,95	6,36	2,58	30,9	0,409	11,3	0,257	0,262
27	41,2	0,73	13	407	28,4	18,5	8,08	7,14	3,80	20,6	0,514	29,5	0,357	0,355

Graf 6: Naměřené hodnoty s vyznačením trhlin a tunelové porozity.



Graf 7: OTP1 Efektivita BE1 s vyzačenými body naměřených svaru



Při optimalizaci soustavy SIGMA 500 – Drát Aristorod 1,2 mm – Plyn Ferromaxx Plus pro svařování tupých V-úkosových svarů jsme vycházeli z výsledků dříve provedené optimalizace pro koutové svary. To znamená rozsah svařovacích parametrů a ploch návarů. Úkolem bylo zjistit nejefektivnější provedení úkosu – to znamená úhlu úkosu alfa a výšky svaru a v kombinaci s parametry svařování. Po první sérii se nám rozmezí použitelných úhlů úkosů zúžilo na 20 – 40° a objevil se problém s trhlinami za tepla.

52

4.1 Posouzení statistické významnosti.

Optimalizace podle přísnějšího vzorce pro první jakost se ukázala jako statisticky nevýznamná a proto ji nebudeme hodnotit. Optimalizace podle vzorce pro 3. jakost vykazuje cca 82 % významnost, což je též pod uznávaným kritériem prokazatelnosti 95 %, ale graf ukazuje i důvod a směr dalších potřebných experimentů. Jak je na grafu patrné, pouze 4 experimenty ohraničují optimální oblast shora – to znamená vyšší rychlost drátu, všechny ostatní experimenty mají rychlost drátu nižší. Důvod, proč jsme neprovedli více experimentů v této oblasti je již zmíněná náchylnost na tvorbu trhlin za tepla při kombinaci velkého objemu svaru s vysokou rychlostí svařování. Pro uzavření této optimalizace bude nutno provést ještě několik experimentů v oblasti $V_d = 14,5$ až 16 m/min, $V_s = 0,6$ až $0,8$ m/min při úhlu úkosu kolem 35° .

Z hlediska dalšího pokračování experimentů optimalizace soustav pro tupé V-úkosové svary bude potřeba upravit metodiku návrhu experimentů i vyhodnocování tak, aby lépe propojila konstrukční parametry – výška svaru a , úhel úkosu α s parametry svařování – rychlost drátu, rychlost svařování a zejména aby zohlednila výskyt vad. Na základě provedených experimentů je už nyní jasné, že parametrické pole efektivních tupých svarů bude více omezené než u koutových svarů.

Výpočet optimálního nastavení:

Pro BE1 :

Residual standard : 0.608 on 18 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.1773, Adjusted R-squared: -0.05122

F-statistic: 0.7759 on 5 and 18 DF, p-value: 0.5797

$E=1.168265$

Optimální řešení:

$E= 1.180670$

$v_d = 14.28455$

$P_s = 21.16327$

$v_s = 0.7019679$

Pro BE3:

Residual standard : 1.87 on 18 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.3264, Adjusted R-squared: 0.1393

F-statistic: 1.745 on 5 and 18 DF, p-value: 0.1755

E=3.755377

Optimální řešení:

E= 3.954314

v_d = 14.55376

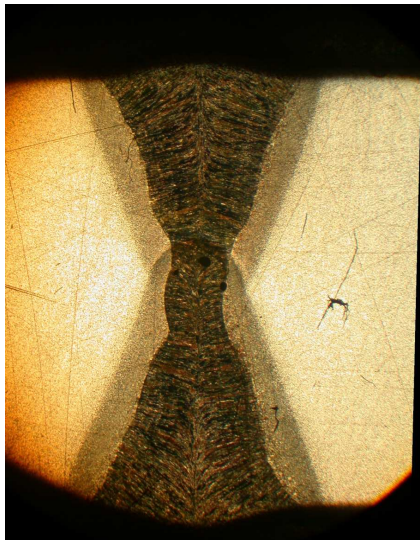
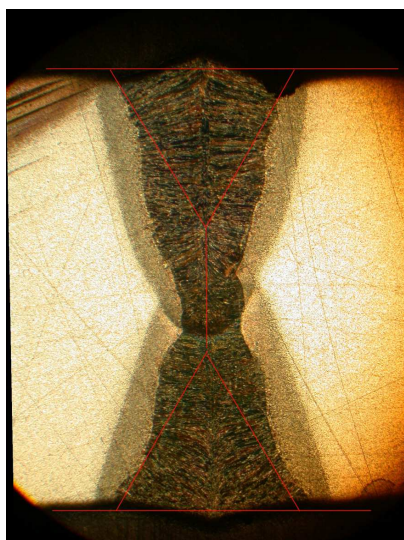
P_s = 22.72703

v_s = 0.6659869

5. Závěr

Optimalizace soustavy pro tupé V-úkosové svary je obtížnější než pro koutové svary. Především tu je faktor přesného vymezení plochy návaru a dále přesnosti provedení úkosu. Dalším faktorem je zajištění kvality. Svařování tupých svaru je mnohem citlivější ke vzniku trhlin za tepla a tunelové porozity, zejména kombinací vysoké rychlosti svařování a úzkého úkosu a též velké plochy návaru a úzkého úkosu.

I přesto bylo dosaženo velmi pěkných výsledků, takže lze konstatovat, že při pečlivě provedené optimalizaci, která vymezí užší parametrické pole optimální efektivity provedení než u koutových svarů, získaný výsledek se určitě vyplatí, což dokumentují 2 provedené X svary, zhotovené příkonem 2 x 7,7 kJ/cm.



Obr. 38. Svary X.

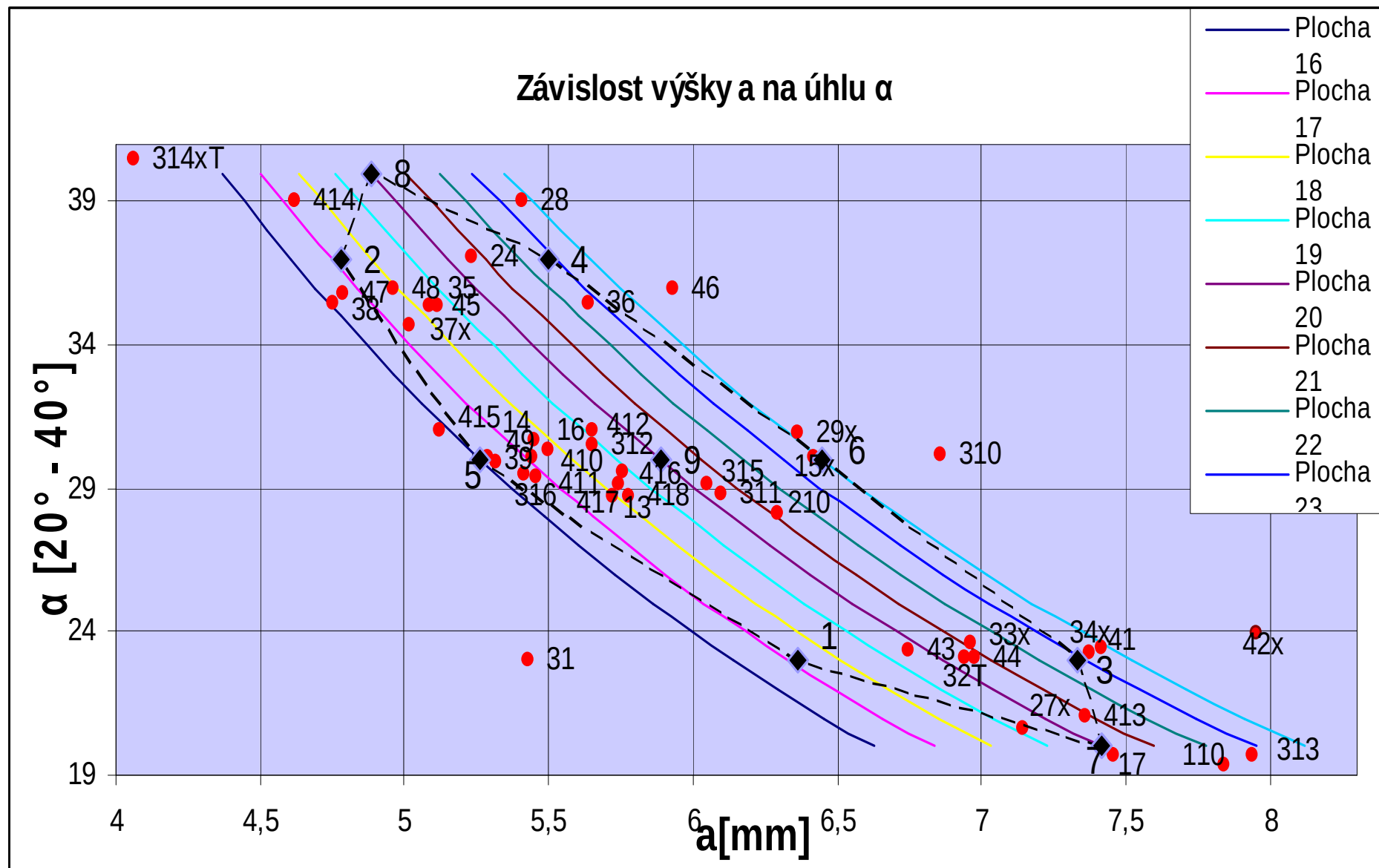
6. Seznam použité literatury

- [1] Hudec, Z.: Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG. [Disertační práce]. Liberec 2005.
- [2] Tomášek, M.: Vliv ochranného plynu na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu. [Diplomová práce]. Liberec 2010. 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] <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2> [cit. 2. ledna 2012]
- [8] KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J.: Materiály a jejich svařitelnost, Ostrava 2009
- [9] Ondráček, P., Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektrodou, Bratislava 2003
- [10] http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-1FE3C13E-DDD3621E/fronius_ces-ka_republika/hs.xsl/29_3922.htm [cit. 5. ledna 2012]

Příloha:

Tabulka 2. Hodnoty úkosů serie 1.

číslo svaru	P	α	av	t	w
11	20	45	6,37	2,50	2,70
12	16	45	4,78	2,88	3,60
13	16	30	7,33	3,87	3,10
14	16	30	5,50	3,31	4,15
15	20	30	5,27	2,64	3,04
16	20	30	6,45	3,23	3,72
17	20	20	7,41	2,53	2,70
18	20	20	4,88	3,14	4,10
19	24	20	5,89	2,95	3,40



Tabulka hodnot série 2.

Č.svaru serie 2	Návrh geometrie								Úkos skutečná geometrie					Svar									
	P	α	b	Vd	Vs	x	U	w	P	α	b	x	w	a	z	av	p	w	Ps	I	U	Vs	
21	17,2	23	6,36	13,6	0,8	2,49	26,9	5,4	22,5	22	3,1	2,75	5,86	3,1	6,3	9,4	0,14	6,8	38,3	395	28,7	0,81	
22	17,2	37	4,78	13,6	0,7	2,88	26,9	7,2	22,5	37,4	5,75	3,5	8,12	5,75	2,35	8,1	0,69	6,83	36,2	387	28,8	0,71	
23	22,8	23	7,33	13,6	0,7	2,86	26,9	6,22	27,1	22,7	7,9	3,1	6,71	7,9	1,77	9,67	0,48	7,57	47,3	385	28,5	0,64	
24	22,8	37	5,51	13,6	0,7	3,31	26,9	8,29	31	36,6	6,49	3,71	9,62	6,49	1,74	8,23	0,41	7,99	38,5	359	28,6	0,63	
25	16	30	5,26	13,6	0,7	6,08	26,9	2,63	18,5	29	5,88	3,07	5,75	5,88	2,79	8,67	0,28	6,63	34,6	383	28,7	0,85	
26	24	30	6,45	13,6	0,5	3,22	26,9	7,44	45,9	33,5	8,59	3,99	10,4	8,59	0,61	9,2	0,19	8,5	45,9	374	28,9	0,6	
27	20	20	7,41	13,6	0,7	2,53	26,9	5,4	23	22,1	8,07	2,65	5,8	8,07	3,17	11,2	0,3	6,36	43,6	402	28,6	0,71	
28	20	40	7,88	13,6	0,7	3,14	26,9	8,19	32,4	38,2	5,77	3,97	10	5,77	1,49	7,26	0,77	7,82	37,9	370	28,8	0,72	
29	20	30	5,86	13,6	0,7	2,94	26,9	6,8	24,5	29,6	6,76	3,65	7,46	6,76	2,58	9,34	0,66	6,32	42,3	401	28,9	0,71	

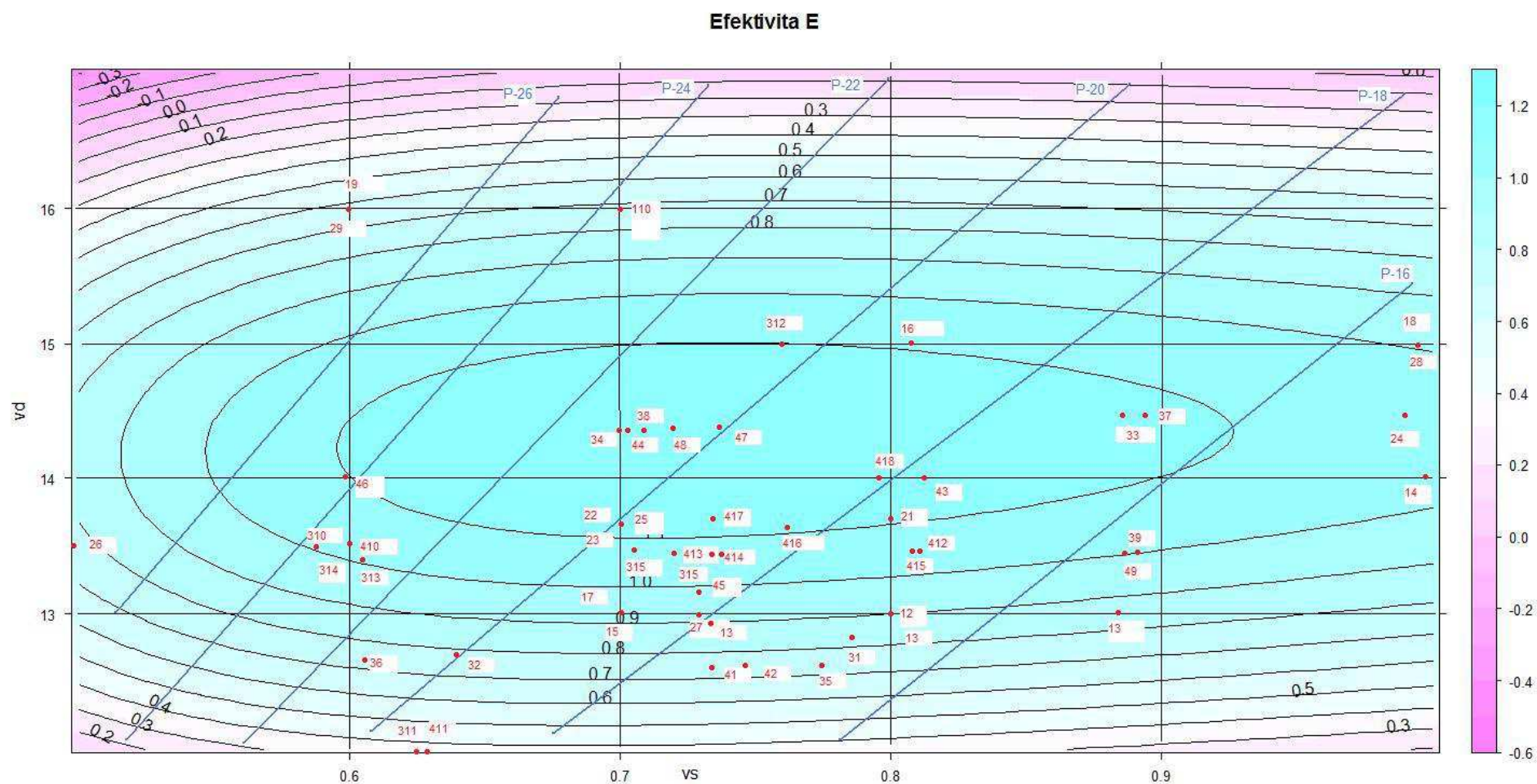
Tabulka naměřených hodnot.

svar	a+z	Da	p	m	Ps	Vs	Vd	I	U	Pm	Q1	a	z	Pn	alfa	D	%	f	R	E1	E3
S4S1	8,19	0	0,3	0	35,7	0,74	12,6	351	29,2	17,7	7,06	7,42	0,77	17,7	23,4	0,504	1,0	26,7	0,00	0,1255	0,1236
S4S2	8,18	0,4	0,2	0	38,7	0,75	12,6	380	29,5	17,5	7,62	8,10	0,08	22,3	23,9	0,424	1,28	29,3	0,00	0,0172	0,0172
S4S3	9,76	0,37	0,22	0	38,3	0,81	14	400	29,9	17,9	7,51	6,75	3,02	22,0	23,4	0,425	1,23	28,4	0,00	0,3340	0,3292
S4S4	10,24	1,21	0,47	0	46,3	0,71	14,4	404	30,5	21,1	8,86	6,98	3,27	22,0	23,1	0,525	1,04	29,8	0,00	0,3143	0,3151
S4S5	8,22	0,36	0,7	0	40,2	0,73	13,2	370	29,6	18,8	7,65	5,09	3,14	19,0	35,4	0,527	1,01	29,3	0,00	0,3740	0,3757
S4S6	8,92	0,54	0,65	0	47,7	0,6	14	375	29,9	24,5	9,61	5,93	2,99	24,0	36,0	0,497	0,98	25,3	0,00	0,3469	0,3445
S4S7	8,87	0,7	1,39	0	41,4	0,74	14,4	391	30,7	20,2	8,24	4,79	4,08	20,0	35,8	0,516	0,99	27,0	0,00	0,3950	0,4127
S4S8	8,8	0,96	1,09	0	40,6	0,72	14,4	377	30,6	20,7	8,13	4,97	3,84	22,3	36,0	0,451	1,08	25,8	0,00	0,3886	0,4008
S4S9	7,67	0,3	0,12	0,1	28,9	0,88	13,5	352	29,7	15,9	6,05	5,45	2,23	16,0	30,1	0,447	1,01	22,6	0,00	0,3093	0,3059
S4S10	8,4	0,77	0,33	0	41,6	0,6	13,5	362	29,7	23,4	9,14	5,50	2,90	24,0	30,4	0,424	1,03	21,0	0,00	0,2736	0,2865
S4S11	6,68	0,32	0,16	0	34,2	0,63	12	329	28,7	19,8	7,63	5,46	1,22	20,0	29,4	0,415	1,01	19,8	0,00	0,1575	0,1598
S4S12	7,34	1,47	0,26	0,07	24,3	0,82	13,5	351	29,6	17,2	6,49	5,65	1,69	15,0	31,0	0,384	0,87	11,5	0,00	0,2534	0,2502
S4S13	8,56	0,72	0,14	0,04	39,4	0,72	13,5	363	29,8	19,4	7,64	7,36	1,20	20,0	21,1	0,493	1,03	27,5	0,00	0,1497	0,1490
S4S14	7,43	0,58	0,44	0	32,8	0,73	13,5	349	29,6	19,1	7,18	4,62	2,81	20,0	39,1	0,389	1,05	19,9	0,00	0,3491	0,3555
S4S15	7,01	1,37	0,35	0,4	39,3	0,82	13,5	350	29,6	17,2	6,46	5,12	1,89	20,0	31,0	0,491	1,17	36,0	0,00	0,2506	0,2535
S4S16	7,92	0,65	0,29	0	32,5	0,77	13,7	352	29,8	18,6	6,97	5,76	2,17	20,0	29,6	0,385	1,08	21,1	0,00	0,2766	0,2760
S4S17	7,44	0,12	0,44	0	33,8	0,74	13,8	360	29,8	19,4	7,40	5,75	1,70	20,0	29,2	0,408	1,03	20,4	0,00	0,2173	0,2186
S4S18	7,52	0,66	0,33	0	32,4	0,79	14	370	29,8	18,4	7,12	5,78	1,74	20,0	28,7	0,383	1,09	20,7	0,00	0,2298	0,2300
S3S1	8,46	0,34	0,46	0,29	33,3	0,78	12,6	359	29,5	16,8	6,92	5,43	3,03	17,7	23,0	0,468	1,05	24,9	0,00	0,2806	0,2950
S3S2	9,39	1,69	0,31	0	41,8	0,64	12,6	357	29,8	20,5	8,48	6,94	2,45	22,3	23,1	0,467	1,09	26,4	0,00	0,2615	0,2614
S3S3	9,64	0	0,25	0	35,9	0,89	14,4	397	30,9	16,8	7,03	6,96	2,68	17,7	23,6	0,507	1,05	28,5	0,00	0,3379	0,3269
S3S4	10,77	1,72	0,7	0	49,7	0,7	14,4	401	30,5	21,4	8,91	7,38	3,40	22,3	23,3	0,552	1,04	33,4	0,00	0,3402	0,3353
S3S5	8,62	0,4	0,49	0	36,0	0,77	12,6	350	29,4	17,0	6,82	5,10	3,53	17,7	35,4	0,508	1,04	29,2	0,00	0,4356	0,4285
S3S6	8,17	0,73	0,51	0	41,3	0,61	12,6	348	29,4	21,5	8,55	5,64	2,53	22,3	35,4	0,460	1,04	24,3	0,00	0,3237	0,3211
S3S7	8,9	0,32	0,24	0,21	32,6	0,89	14,4	390	30,9	16,8	6,91	5,02	3,88	17,7	34,7	0,457	1,05	24,0	0,00	0,4482	0,4447
S3S8	8,39	0,72	0,8	0,21	39,5	0,71	14,4	379	30,4	21,1	8,28	4,76	3,64	22,3	35,4	0,435	1,06	23,4	0,00	0,3494	0,3698
S3S9	8,54	0	0,67	0,06	36,5	0,88	13,5	385	30,1	16,0	6,72	5,32	3,22	16,0	29,9	0,561	1,00	32,1	0,00	0,3835	0,3820
S3S10	8,75	0,1	0,6	0	45,9	0,58	13,5	370	30,2	24,2	9,83	6,86	1,90	24,0	30,2	0,477	0,99	23,2	0,00	0,2414	0,2382

Tabulka naměřených hodnot.

svar	a+z	Da	p	m	Ps	Vs	Vd	I	U	Pm	Q1	a	z	Pn	alfa	D	%	f	R	E1	E3
S3S11	8,32	0	0,32	0	36,3	0,63	12	341	29	19,8	8,01	6,10	2,22	20,0	28,8	0,449	1,01	21,6	0,00	0,2742	0,2730
S3S12	9,51	0,59	1,19	0	43,1	0,76	15	397	30,9	20,5	8,23	5,65	3,86	20,0	30,5	0,535	0,97	28,7	0,00	0,3782	0,3849
S3S13	9,52	0,31	0,97	0	46,4	0,61	13,5	374	30,3	23,0	9,47	7,94	1,58	20,0	19,7	0,569	0,87	26,0	0,00	0,1629	0,1632
S3S14	8,9	1,06	0,65	0,5	35,8	0,61	13,5	362	30	23,0	9,08	4,06	4,84	20,0	40,5	0,442	0,87	14,8	0,00	0,3770	0,4278
S3S15	8,47	0,32	0,56	0	38,9	0,71	13,5	373	29,7	19,8	7,96	6,05	2,42	20,0	29,1	0,486	1,01	25,2	0,00	0,2936	0,2922
S3S16	8,19	0,22	0,79	0	38,4	0,73	13,5	373	29,8	19,2	7,77	5,42	2,78	20,0	29,5	0,479	1,04	25,9	0,00	0,2991	0,3066
S2S4	7,96	1,04	0,49	0	37,3	0,98	14,5	424	29	15,4	6,40	5,24	2,73	16,0	37,1	0,571	1,04	36,0	0,00	0,4371	0,4143
S2S7	10,94	0,43	0,21	0	41,2	0,73	13	407	28,4	18,5	8,08	7,14	3,80	20,0	20,6	0,514	1,08	29,5	0,00	0,3573	0,3552
S2S8	6,9	0,69	1,01	0	37,5	0,99	15	424	29	15,8	6,33	5,41	1,49	20,0	39,0	0,467	1,27	36,0	0,00	0,3098	0,2953
S2S9-1	8,94	0,01	0,08	0	40,6	0,6	16	461	30,5	27,7	11,95	6,36	2,58	24,0	30,9	0,409	0,87	11,3	0,00	0,2570	0,2619
S2S9-2	8,44	0,74	0,36	0	39,4	0,6	16	461	30,5	27,7	11,95	6,29	2,15	24,0	28,2	0,390	0,87	10,2	0,00	0,2009	0,2076
S1S3	8,82	0	0,36	0	36,6	0,88	13	405	28,4	15,4	6,67	5,72	3,10	16,0	28,7	0,563	1,04	33,5	0,00	0,3992	0,3882
S1S4	8,86	0,66	0,57	0	32,4	0,99	14,5	421	29,3	15,2	6,35	5,28	3,58	16,0	30,1	0,506	1,05	28,3	0,00	0,4238	0,4187
S1S5	8,84	0,71	0,39	0	39,0	0,7	13	393	28,7	19,3	8,22	6,42	2,43	20,0	30,1	0,487	1,04	25,1	0,00	0,3283	0,3186
S1S6	9,97	0	1,18	0	41,4	0,81	15	438	29,4	19,3	8,11	5,45	4,52	20,0	30,7	0,517	1,04	28,7	0,00	0,4228	0,4314
S1S7	9,59	0	0,54	0	38,2	0,73	13	407	28,4	18,5	8,08	7,46	2,14	20,0	19,7	0,476	1,08	25,6	0,00	0,2370	0,2351
S1S10	11,27	0	1,3	0	50,9	0,72	16	442	27,8	23,1	8,70	7,84	3,43	24,0	19,3	0,529	1,04	33,6	0,00	0,2871	0,2900

OTP1 Efektivita BE1 s vyzačenými body naměřených svaru.



OTP2 Efektivita BE3 s vyznačenými body naměřených svarů a trhlin.

