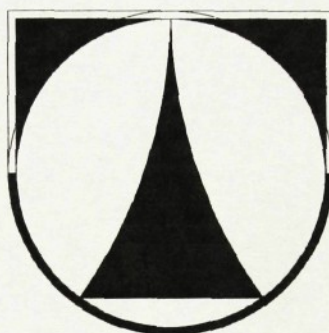


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



**Diplomová práce**

**GEOMETRIE KOUTOVÉHO SVARU U MAG  
SVAŘOVÁNÍ V OBLASTI ZKRATOVÉHO PŘENOSU  
KOVU**

**Tomáš Koranda**

**2001**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské metalurgie

Studijní obor : 2301 T

Strojírenská technologie

Zaměření : Strojírenská metalurgie

GEOMETRIE KOUTOVÉHO SVARU U MAG  
SVAŘOVÁNÍ V OBLASTI ZKRATOVÉHO PŘENOSU  
KOVU

**Tomáš Koranda**

KSP-493

Vedoucí diplomové práce : **Doc. Ing. Heinz Neumann, Csc**

Konzultant diplomové práce : **Ing. Zdeněk Hudec**

**Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 63

Počet tabulek: 6

Počet obrázků: 31

Počet příloh: 6

Počet grafů 11

25.5.2001





## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Tomáš KORANDA

obor  
zaměření

2301 T

Strojírenská technologie  
Strojírenská metalurgie

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

**Geometrie koutového svaru u MAG svařování v oblasti zkratového přenosu kovu.**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s teoretickými základy metody svařování MAG. Zaměřte se na vliv elektrických charakteristik zdroje na chování oblouku a svarové lázně v různých režimech přenosu svarového kovu a vliv svařovacích parametrů na geometrii svaru.
2. Seznamte se se systémy monitorování svařovacích parametrů a způsobem vyhodnocení geometrie svaru programem Lucia.
3. Seznamte se s metodikou určování efektivity provedení koutových svarů.
4. Navrhněte a realizujte experimentální program s cílem určit optimální nosnou velikost koutového svaru pro dané vstupní podmínky svařovacího procesu s použitím zdroje BDH 550 f. Migatronic.
5. Proveďte vyhodnocení a rozbor získaných výsledků.

V79/01 S

KSP/SM  
630, 60. příl.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva

cca 50 stran

- grafické práce

grafické vyhodnocení výsledků práce

Seznam literatury :

- [1] KUNCIPÁL, J.: Teorie svařování. Praha 1986.
- [2] SAMEK, E. – STRINKA, R.: Zváranie v ochrannej atmosfére taviacou sa elektródou. Bratislava, Praha 1982.
- [3] KONVALINA, M.: Porovnání efektivity MAG svařování trubičkovými a plnými dráty. [Diplomová práce]. Liberec 1997. Technická Univerzita v Liberci. – Fakulta strojní.
- [4] CANKÁŘOVÁ, J.: Optimalizace svařování MAG pomocí měření efektivity. [Diplomová práce]. Liberec 1999. Technická Univerzita v Liberci. – Fakulta strojní.
- [5] ŠÍTEK, R.: Optimalizace svařování koutových svarů metodou MAG. [Diplomová práce]. Liberec 2000. Technická Univerzita v Liberci. – Fakulta strojní.
- [6] HUDEC, Z.: Efektivita obloukového svařování. In: Sborník přednášek Zváranie 98“. Bratislava 1998.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Zdeněk Hudec

Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.  
vedoucí katedry



Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.  
děkan

V Liberci dne 31. 10. 2000

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



# DIPLOMOVÁ PRÁCE

**TÉMA:** Geometrie koutového svaru u MAG svařování v oblasti zkratového kovu.

**Anotace:**

Tato diplomová práce řeší problematiku optimalizace parametrů koutového svaru, která vychází z originální koncepce založené na změně geometrie koutového svaru podle dosažitelné hloubky závaru. Práce je zaměřena na sledování vlivů různých kombinací parametrů svařování, na geometrii koutového svaru pro určitý soubor vstupních podmínek podle navržené optimalizační metody. Výsledky práce bude možno použít v rámci širšího výzkumného projektu pro optimalizaci robotizovaného a automatizovaného svařování.

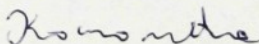
**THÉME:** Geometry of fillet weld in short arc metal transfer GMAW.

**Annotation:**

This graduate paper deals with the overwelding problems in fillet welds solution that is based on the original process variables optimization method, based on the change of the geometry of the fillet weld according to the reached depth of penetration. This work is intended to the searching of the influence between welding parameters relationship and corresponding weld bead shapes and penetration for special combination of input conditions (material and thickness, wire type and diameter, shielding gas and process mode). Resultes of this work as a part of the wider research could be used for optimizing of automatic and robotic welding.

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

V Liberci, dne 25.5.2001

Podpis: 



Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Doc. Ing. Heinzi Neumannovi a konzultantovi Ing. Zdeňku Hudcovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytovali během zpracování této práce.

Také bych chtěl poděkovat firmě Migatronic, jmenovitě panu Ing. Maryškovi za poskytnutí svařovacího zdroje.

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 1. ÚVOD                                                 | 7  |
| 2. TEORETICKÁ ČÁST                                      | 8  |
| 2.1. Svařování metodou MAG - základní principy a pojmy  | 8  |
| 2.2. Vliv dílčích faktorů na průběh svařovacího procesu | 8  |
| 2.3. Přenos kovu z elektrody u metody MAG [1, 6]        | 16 |
| 2.3.1. Zkratový přenos                                  | 20 |
| 2.3.2. Zrychlený zkratový přenos                        | 21 |
| 2.3.3. Sprchový přenos                                  | 21 |
| 2.3.4. Moderovaný sprchový přenos                       | 21 |
| 2.3.5. Rotující oblouk                                  | 22 |
| 2.3.6. Impulzní přenos                                  | 22 |
| 2.4. Metalurgické děje při tavném svařování [9]         | 23 |
| 2.5. Produktivita svařování [10]                        | 25 |
| 2.5.1. Stanovení faktorů produktivity [11]              | 29 |
| 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST                                  | 32 |
| 3.1 Použité zařízení                                    | 32 |
| 3.2 Postup experimentálních prací                       | 34 |
| 3.2.1 Příprava vzorků                                   | 34 |
| 3.2.2 Metodika výroby svarů                             | 34 |
| 3.3 Postup při určování parametrů svařování             | 37 |
| 3.4 Hodnocení výsledků                                  | 39 |
| 3.4.1 Vizuální kontrola a rozměrová analýza svaru       | 40 |
| 3.5 Výsledky                                            | 42 |
| 3.5.1 Tabulky naměřených hodnot                         | 42 |
| 3.5.2 Grafické vyhodnocení                              | 48 |
| 3.6 Diskuse výsledků                                    | 57 |
| 4. ZÁVĚR                                                | 60 |
| 5. POUŽITÁ LITERATURA                                   | 62 |
| 6. SEZNAM PŘÍLOH                                        | 63 |



## 1. ÚVOD

Svařování v ochranných atmosférách nachází uplatnění ve všech oborech aplikace svařovaných konstrukcí. Od 70 let minulého století se metoda MAG stala nejrozšířenější a nejproduktivnější metodou svařování zejména v souvislosti s rostoucím podílem robotizace a automatizace svařovacích pracovišť. Metoda MAG umožňuje svařování ve všech polohách s vysokou produktivitou a kvalitou svarů. Ve srovnání s ručním obloukovým svařováním je výrazné i zlepšení hygieny pracovního prostředí.

V souvislosti s obecným trendem zvyšování efektivity – hospodárnosti svaru nám jde o snižování prvotních nákladů (svar nejdražší část konstrukce). S velikostí svaru rostou zejména mzdové náklady, náklady na přídatný materiál, energii, dokončovací operace – odstranění deformací a vnitřního pnutí. V souvislosti se svařováním zejména ocelových konstrukcí, které se nejméně ze 70% svařují koutovými svary se v posledních letech vyskytuje termín předimenzování svaru (overwelding). Je to zbytečné předimenzování koutového svaru vznikající při výrobě proti nosné velikosti svaru spočítané a předepsané konstruktérem. Důvodem předimenzování koutového svaru je především fakt, že není přesně vymezen geometrií svařovaných dílů jako tupý svar, jehož velikost je předem vymezena tloušťkou svařovaného materiálu. Potřebnou velikost vnější části koutového svaru lze velmi efektivně snížit zvýšením hloubky závaru při zachování stejné nosné velikosti.

Moderní svařovací zdroje umožňující nastavení, řízení a monitorování parametrů svařování a tím umožňují také dodržování a garantování předepsané velikosti koutového svaru. Na tomto základu se katedra strojírenské technologie věnuje již delší dobu vypracování metody optimalizace svařovacích parametrů pro vytváření koutových svarů. Základním cílem tohoto přístupu je určení optimálních svařovacích parametrů (nejvyšší efektivita při dodržení kritérií kvality) pro zhotovení koutového svaru určité nosné velikosti za daných vstupních podmínek. V této souvislosti vzniklo také zadání této diplomové práce, která je zaměřena na posuzování vlivu dílčích parametrů svařování na geometrii koutových svarů.



## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. SVAŘOVÁNÍ METODOU MAG - ZÁKLADNÍ PRINCIPY A POJMY

Metoda MAG je poloautomatická nebo automatická metoda obloukového svařování kdy elektrický oblouk hoří v ochranné atmosféře aktivních plynů (např.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar-CO}_2$ ,  $\text{Ar-CO}_2\text{-O}_2$  apod.) mezi odtavujícím se přídavným materiálem (drát, trubičkový drát) podávaným konstantní rychlostí a základním materiálem. Svařuje se stejnosměrným proudem s nepřímou polaritou a se zdroji proudu s plochou statickou charakteristikou. Pro tuto technologii svařování je charakteristická vysoká proudová hustota v rozmezí 100 až 400  $\text{A mm}^{-2}$  oproti ručnímu svařování (10 až 20  $\text{A mm}^{-2}$ ). Teplota oblouku v oblasti plazmy při svařování metodou MAG dosahuje až 10 000 °C. Vysoká proudová hustota poskytuje vysoký výkon odtavení, umožňuje velké svařovací rychlosti a hluboký závar [1].

### 2.2. VLIV DÍLČÍCH FAKTORŮ NA PRŮBĚH SVAŘOVACÍHO PROCESU

Na průběh svařovacího procesu a geometrii svaru má u metody MAG vliv celá řada činitelů. Použité parametry svařování, typ ochranné atmosféry a druh přídavného materiálu rozhodují o:

- stabilitě hoření elektrického oblouku,
- charakteru přenosu kovu,
- geometrii svaru a jeho vlastnostech,
- operativních možnostech metody.

Za rozhodující faktory, které ovlivňují stabilitu elektrického oblouku, přenos kovu a geometrii svaru patří:

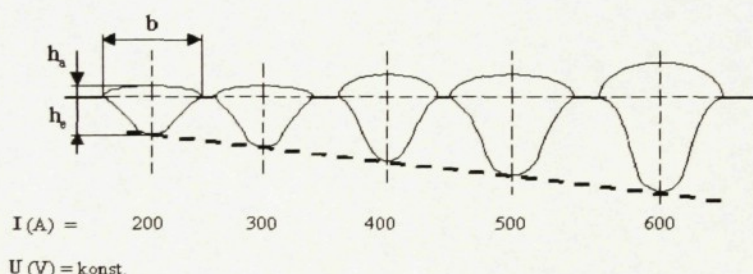
- svařovací proud resp. proudová hustota,
- svařovací napětí,
- rychlost svařování,
- typ ochranné atmosféry,
- druh a rozměr přídavného materiálu,
- výlet drátu,
- sklon svařovacího drátu.



Za optimální parametry svařovacího procesu budeme pokládat takové, při kterých vytvoříme svarové spoje s předepsanou kvalitou a současně s vysokou produktivitou a efektivitou. Tyto pojmy jsou vysvětleny v části práce 2.5.

### Svařovací proud (proudová hustota)

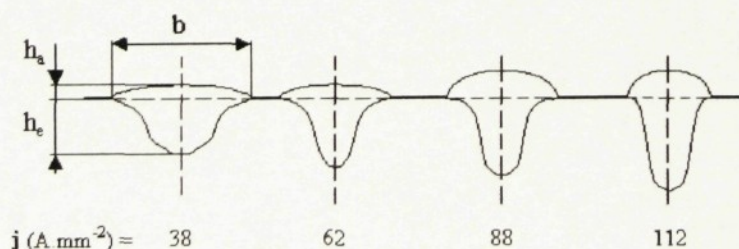
Hodnota svařovacího proudu  $I$  (A) resp. proudová hustota  $j$  (A.m<sup>-2</sup>) přímo ovlivňuje množství nataveného kovu. Zvýšením elektrického proudu se zvyšuje teplota elektrického oblouku, koncentrace tepla v elektrickém oblouku a zároveň dochází i ke zvýšení dynamického účinku elektrického oblouku. Důsledkem je zvýšení hloubky závaru  $h_e$  s mírným nárůstem převýšení  $h_a$  a malým zvýšením šířky housenky  $b$  v souladu s obr.1.



Obr. 1 Vliv svařovacího proudu  $I$  na tvar housenky [2]

$h_e$  – hloubka závaru,  $h_a$  – převýšení,  $b$  – šířka housenky

Proudová hustota bude mít samozřejmě obdobný vliv na tvar housenky jako svařovací proud. To je vidět podle obr. 2.



Obr. 2 Vliv proudové hustoty  $j$  na tvar housenky

$h_e$  – hloubka závaru,  $h_a$  – převýšení,  $b$  – šířka housenky



Proudová hustota spolu se specifickým odporem kovu elektrody  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ) má vliv na celkové množství vyvinutého tepla při průchodu proudu volným koncem elektrody a tím i na teplotu konce hrotu svařovacího drátu.

Svařovacím proudem výrazně ovlivňujeme charakter přenosu kovu v oblouku. Zvyšováním proudu se zmenšuje objem kapek a roste frekvence jejich přenosu. Při konstantním proudu vytvářejí dráty o menším průměru větší počet kapek za jednotku času. Hodnota svařovacího proudu má významný vliv také na rozstřík kovu. Při nadměrném zvýšení svařovacího proudu vzrůstá rozstřík a nebezpečí protavení svařovaného materiálu.

S ohledem na použití zdrojů proudu s plochou statickou charakteristikou je svařovací proud veličina přímo závislá na rychlosti podávání drátu. Velikost svařovacího proudu, a tím i rychlost podávání svařovacího drátu při daném průměru drátu, se volí podle :

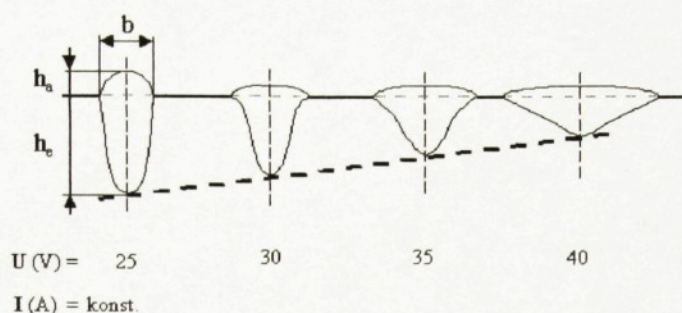
- tloušťky základního materiálu a polohy svařování,
- velikosti a druhu prováděného svaru,
- způsobu svařování – poloautomaticky nebo automaticky,
- polohy svařování a technologické přístupnosti ke svaru,
- požadovaného charakteru přenosu kovu.

### **Svařovací napětí**

Napětí oblouku pro určitý typ ochranné atmosféry je dané délkou oblouku a závisí na stupni ionizace. Zvyšování napětí se projeví růstem kapek a menší frekvencí jejich přenosu. Nárůst velikosti kapek, způsobuje větší rozstřík. Prodlužuje se čas styku povrchu kapky a ochranné atmosféry. Důsledkem je zintenzivnění metalurgických reakcí, které ovlivňují složení svarového kovu a tím i mechanické vlastností spoje. Dochází k nárůstu propalu legujících prvků ve svarové lázni a takto vzniklé svary jsou náchylné na pórovitost.

S rostoucím napětím při konstantním svařovacím proudu se zvyšuje šířka housenky  $b$  a hloubka závaru  $h_e$  klesá - obr 3. Příliš nízké napětí bývá příčinou nestabilního svařovacího procesu, vznikají úzké housenky s velkým převýšením, především při větších rychlostech svařování. V těchto případech vzniká nedokonalé natavení na okrajích svaru [3], [4].





Obr. 3 Vliv napětí elektrického oblouku  $U$  na tvar housenky [2]  
 $h_e$  – hloubka závaru,  $h_a$  – převýšení,  $b$  – šířka housenky

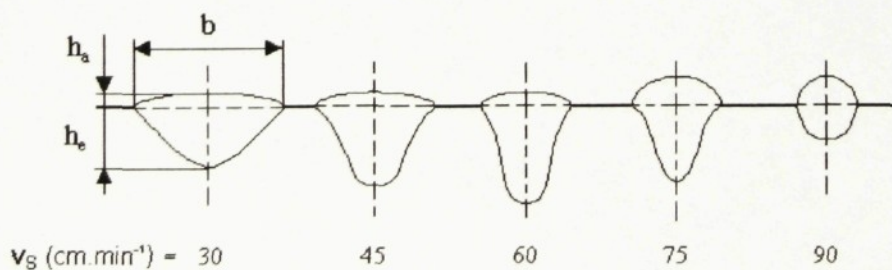
Informativně můžeme stanovit hodnotu napětí ze vztahu (1) :

$$U = 15 + 0,035 \cdot I \quad (1)$$

### **Rychlost svařování**

Rychlost svařování je definována jako rychlost pohybu hořáku ve směru svařování. Je to velmi důležitý parametr a vzájemně se váže na hodnoty svařovacího proudu a napětí.

Při malých rychlostech svařování má svar velkou šířku  $b$  a malé převýšení  $h_a$ . Zvyšováním rychlosti svařování roste hloubka závaru  $h_e$  až do určité rychlosti svařování, při které již nestačí vyvinuté teplo oblouku natavovat svarové plochy. V důsledku toho klesá protavení základního materiálu, zmenšuje se závar  $h_e$ , šířka svaru  $b$  a zvyšuje se převýšení svaru  $h_a$  podle obr. 4.



Obr. 4 Vliv rychlosti svařování  $v_s$  na tvar housenky [2]  
 $h_e$  – hloubka závaru,  $h_a$  – převýšení,  $b$  – šířka housenky



Při konstantním svařovacím proudu a napětí se změnou rychlosti svařování mění také množství tepla vneseného do základního materiálu připadající na jednotku délky svaru. Změna rychlosti svařování působí i na hoření elektrického oblouku a rozdělení dynamických sil v oblouku.

Při velmi vysokých rychlostech se často stává, že svar má malé hodnoty závaru, nebo dochází k vytvoření studených spojů. Při automatickém svařování je svařovací rychlost přesně definována nastavena rychlostí posuvu hořáku [5]. U poloautomatického svařování je skutečná rychlost svařování závislá na svářeči.

### **Typ ochranné atmosféry**

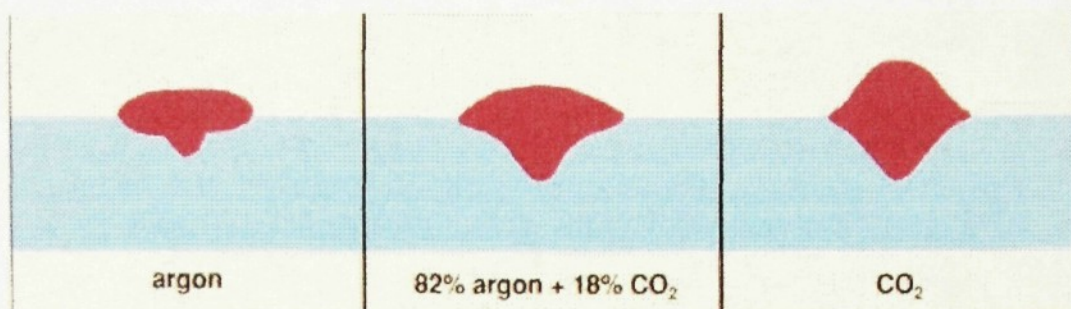
Kvalita svarového spoje je závislá na vhodném výběru typu ochranné atmosféry. Důležité je i správné nastavení množství přiváděného plynu. Malé množství ochranného plynu způsobuje nedostatečnou ochranu tavné lázně před kontaminací svaru vzduchem. Nedostatečná ochrana však vzniká i při nadměrném množství přiváděného ochranného plynu, kdy proudění není lamelární (přímé), ale turbulentní (vířivé) a způsobuje přisávání vzduchu do ochranné atmosféry. Z tohoto důvodu někteří dodavatelé plynů dodávají tlakové láhve s předem nastaveným průtočným množstvím, které svářeč již nemůže ovlivnit.

Za nepříznivý jev z hlediska jakosti svarů je absorpce plynů ve svarové lázni. V průběhu krystalizace se plyny z důvodu prudké změny rozpustnosti v tekuté a tuhé fázi uvolňují. Pokud není dostatek času na únik plynových vad ze svarové lázně svar obsahuje plynové dutiny.

Správnou volbou ochranného plynu se zajistí požadované mechanické vlastnosti svaru i požadovaná geometrie svaru např. velikost a tvaru závaru, nízké převýšení svaru, plynulý přechod mezi povrchem svaru a základním materiálem.

Chemické složení ochranné atmosféry je určující pro tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost atmosféry oblouku a tím i na účinnost přenosu tepelné energie z oblouku na svařovaný materiál. Typ použité ochranné atmosféry má proto vliv na tvar závaru – obr. 5. Se zvyšující se tepelnou vodivostí atmosféry oblouku se zvyšují tepelné ztráty oblouku. Při použití argonu jako ochranného plynu, který má nízkou tepelnou vodivost, nedochází k tak intenzivnímu přenosu tepla jako při použití CO<sub>2</sub> nebo He ve směsném plynu [3, 5, 6].





Obr.5 Vliv typu atmosféry na profil závaru při svařování MAG ve srovnání s čistým Ar [7]

### **Druh přídavného materiálu (průměr drátu)**

Volba druhu přídavného materiálu je závislá především na druhu základního materiálu v souvislosti s požadovanými vlastnostmi spoje, ale důležitý je i vliv typu použité ochranné atmosféry a použité svařovací parametry (charakter přenosu kovu). Při volbě průměru drátu musíme vzít do úvahy:

- tloušťku a druh základního materiálu,
- druh prováděného svarového spoje,
- polohu svařování,
- požadovaný výkon natavení,
- druh svařovacího stroje a podávacího mechanismu.

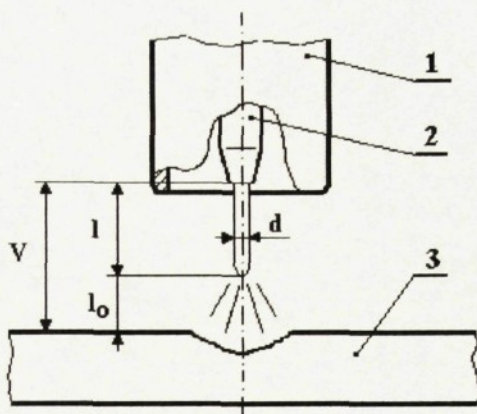
Všeobecně platí, že s rostoucím průměrem drátu roste také svařovací proud a požadavky na výkon zdroje proudu. Při stejném proudu je u menšího průměru drátu větší výkon natavení. Pro svařování MAG se používají dráty s průměrem od 0,6 až 2,4 mm [3].

### **Volná délka drátu (výlet drátu)**

Volná délka drátu neboli výlet elektrody, je délka volného konce elektrody měřená od nataveného konce drátu v elektrickém oblouku k místu výstupu z trysky přívodu svařovacího proudu podle obr. 6. Zvyšováním výletu drátu roste celkové množství vyvinutého odporového tepla ve volném konci drátu a roste teplota svařovacího drátu v místě odtavování. Současně se však ovlivní i velikost svařovacího proudu a klesá hloubka závaru. Velký výlet drátu způsobuje také větší rozstřík a horší ochranu tavné lázně. Při malém výletu drátu dochází k velkému



tepelnému namáhání kontaktní koncovky hořáku a intenzivnímu zanášení hubice. Náhlé změny výletu drátu působí nepříznivě na stabilitu svařovacího procesu.



Obr. 6 Výlet drátu (délka volného konce)

$d$  - průměr svařovacího drátu,  $l$  - výlet drátu,  $V$  - vzdálenost proudová tryska - svařovaný materiál,  $l_o$  - délka oblouku, 1 - plynová tryska, 2 - proudová tryska, 3 - svařovaný materiál

Vhodná velikost výletu drátu se přibližně určí podle [2] ze vztahu (2):

$$L = 5 + 5 \cdot d \quad (2)$$

kde označuje :

$L$  (mm) .... výlet drátu

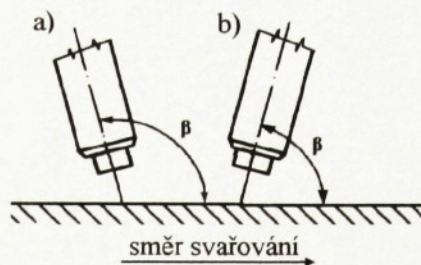
$d$  (mm) ... průměr drátu

### **Sklon svařovacího drátu**

Podle sklonu osy svařovacího drátu (hořáku) ve směru svařování, rozeznáváme dva způsoby svařování nakreslené na schématickém obr. 7 :

- svařování vpřed,
- svařování vzad.





Obr. 7 Svařování a) vpřed, b) vzad

**Svařování vpřed** podle obr. 7a) je charakteristické tupým úhlem  $\beta$ . Teplo oblouku působí na větší plochu základního materiálu a dochází ke zlepšení předeřevu svarových ploch. Zvětšuje se objem nataveného kovu pod obloukem a to má za důsledek pokles dalšího intenzivního tavení základního materiálu. Zmenšuje se hloubka závaru, zvětšuje šířka housenky a zmenšuje převýšení. Svar není dokonale chráněn ochranným plynem a je zde větší možnost vzniku vad.

**Svařování vzad** podle obr. 7b) je charakteristické ostrým úhlem  $\beta$ . Při tomto způsobu svařování se tekutý kov vytlačuje pod elektrickým obloukem. Dochází ke zvýšení hloubky závaru, k velkému převýšení svaru a zmenšení šířky svaru.

**Svařovací parametry** rozhodují také o množství tepla, které z elektrického oblouku přechází do svařovaného materiálu. Obvykle se vyjadřuje množství tepla připadající na jednotku délky svaru  $q$  ( $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ). Tato hodnota závisí bezprostředně na měrném tepelném výkonu oblouku určeného vztahem (3):

$$q = \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \quad (\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}) \quad (3)$$

kde označuje:

$q$  ( $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) ... měrný tepelný výkon

$I$  (A) ..... svařovací proud

$U$  (V) ..... napětí

$v_s$  ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) .... rychlost svařování

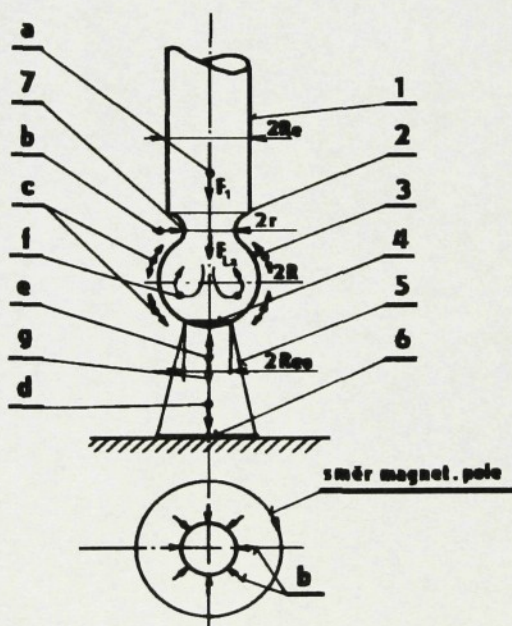
Při stanovení množství tepla přecházejícího do svaru se musí vzít do úvahy ještě účinnost přenosu tepelné energie z oblouku do základního materiálu. Ta je



závislá na metodě svařování. Použité svařovací parametry a tím i množství vneseného tepla musí být v souladu s druhem svařovaného materiálu.

### 2.3. PŘENOS KOVU Z ELEKTRODY U METODY MAG [1, 6]

Způsob přenosu roztaveného přídavného materiálu do svarové lázně mimo intenzitu průběhu metalurgických reakcí mezi roztaveným kovem a ochrannou atmosférou ovlivňuje i způsob formování svaru, vzhled povrchu svarových housenek, hloubku dosaženého závaru a ztráty rozstříkem. Způsob přenosu kapek kovu z nataveného přídavného drátu závisí především na velikosti a vzájemném poměru sil, které na kapku působí - obr. 8.



Obr. 8 Síly působící při přenosu kovu elektrickým obloukem [8]

1 – elektroda, 2 – hranice natavené oblasti, 3 – kapička taveniny, 4 – katodová skvrna, 5 – sloupec oblouku, 6 – anodová skvrna, 7 – zmenšení průřezu, a – působení gravitace ( $F_1$ ), b – směr radiálního působení magnetického pole (pinch efekt), c – povrchové napětí, d – směr elektrostatických sil, e – síly odpařujícího se kovu, f – viskozita taveniny, g – dynamický účinek proudícího plazmatu



Na roztavený kov přídavného materiálu při svařování působí hlavně gravitace, síly povrchového napětí, viskozita kapky nataveného kovu, elektromagnetické síly (tzv. Lorentzovy), které vyvolávají elektrostatické síly ve směru osy drátu a síly ve směru radiálním (pinch efekt), aerodynamický sací účinek proudu plynu (slabě ionizovaného plazmatu), síla tlaku plynů a par, které vznikly uvnitř kapky, síly z odpařujícího se kovu z povrchu kapky aj.

Velikost těchto sil a směr jejich výslednice jsou určovány svařovacími parametry, průměrem přídavného drátu, fyzikálně chemickými vlastnostmi přídavného materiálu a ochranné plynové atmosféry apod. Gravitace pomáhá k odtržení kapek nataveného kovu od nenataveného přídavného drátu, kromě svařování v poloze nad hlavou. Síla povrchového napětí udržuje kapku na čele elektrody. Hodnota této síly je určena velikostí povrchového napětí a geometrickými rozměry kapky. Velikost povrchového napětí závisí na mnoha činitelích, především na teplotě, chemickém složení přídavného materiálu a použitém typu ochranné atmosféry. Při zvýšení teploty se povrchové napětí nízkouhlíkových ocelí snižuje. Povrchové napětí se snižuje také v důsledku oxidačního charakteru atmosféry. Viskozita roztaveného kovu rovněž ovlivňuje poměry při přechodu kapek do tavné lázně.

Velikost elektromagnetické síly je úměrná druhé mocnině svařovacího proudu a její směr je určen poměrem průměrů přídavného materiálu a sloupce oblouku podle vztahu (4).

$$F_{EM} = \frac{\mu \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

Velikost gravitační síly je definována vztahem (5):

$$F_1 = k \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot g \quad (5)$$

k - součinitel, který charakterizuje jaká část tekutého kovu zůstane po odtržení kapky na elektrodě

R - poloměr kapky



$\rho$  - měrná hmotnost roztaveného kovu kapky

$g$  - zemské zrychlení

Síla povrchového napětí se dá určit ze vztahu (6):

$$F_{P,N} = 2\pi\sigma \cdot R_e \cdot \cos\psi \quad (6)$$

$\sigma$  - součinitel povrchového napětí na hranici kapky s elektrodou

$R_e$  - poloměr elektrody

$\psi$  - úhel mezi tečnou k povrchu kapky v místě přechodu kapky do nenataveného materiálu a povrchem elektrody

Síla vyvolaná odpařováním kovu je definovaná vztahem (7):

$$F_R = M \cdot v \quad (7)$$

$M$  – hmotnost kovu, která se odpaří za jednotku času

$v$  – počáteční rychlost proudu par

Mezi síly, které mají při MAG svařování vliv na pohyb odtavujících se kapek v elektrickém oblouku patří i proud plazmy. Předpokládáme, že jádro elektrického oblouku tvoří svazek vodičů, kterými protéká vysoký proud a dochází tak k přenosu kapek kovu do svarové lázně působením Lorentzových sil. To je výrazné v místě velké proudové hustoty (na hrotu drátu).

Síly od plazmových toků jsou definované vztahem (8):

$$F_p = M_p \cdot v \quad (8)$$

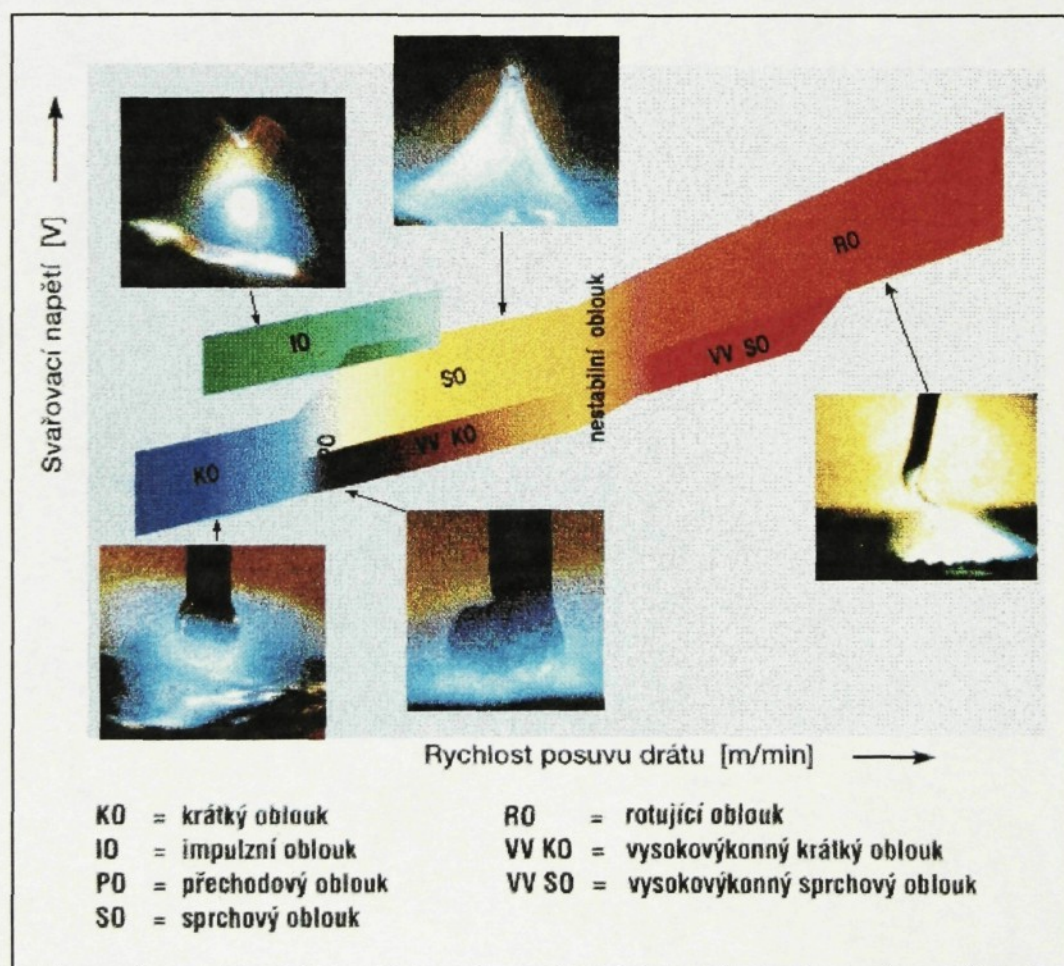
$M_p$  – hmotnost plazmatu procházejícího daným průřezem za jednotku času

$v$  – rychlost plazmatu v daném průřezu



Kapka roztaveného přídavného materiálu je dále podrobena aerodynamickému působení proudu par a plynů. Při svařování v ochranných atmosférách pomáhá aerodynamická síla svým sacím účinkem k odtržení kapky. Vysoká teplota kapek kovu a sloupce elektrického oblouku způsobuje vypařování kovu na povrchu kapky a vznik reakčních sil působících na kapku.

Při MAG svařování se charakter elektrického oblouku a charakter přenosu odtavujícího se kovu obvykle znázorňuje v schématickém obr. 9 v závislosti na svařovacím proudu a napětí. V obrázku uvedené pojmy se postupně užívají i když plně nevystihují fyzikální zákonitosti procesu.



Obr. 9 Oblasti jednotlivých typů oblouků při svařování MAG v ochranné atmosféře Ar/CO<sub>2</sub> [7]



Z elektrického hlediska se při obloukovém svařování rozlišují dva druhy přenosu roztaveného kovu do svarové lázně:

- **zkratový,**
- **bezzkratový.**

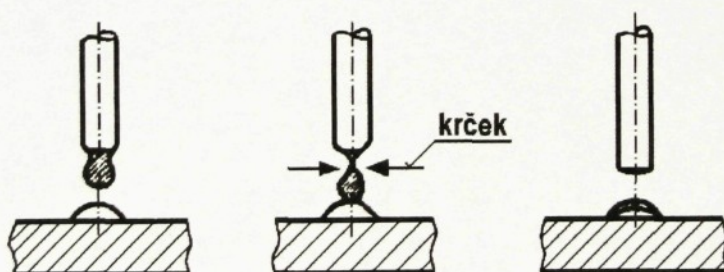
Bezzkratový typ přenosu u MAG metody svařování se dále dělí na:

- sprchový přenos,
- rotující oblouk,
- pulzní přenos.

Charakter přenosu kovu, tj. způsob oddělování, velikost a četnost kapek, je ovlivněn velikostí svařovacího proudu, napětím na oblouku, složením ochranného atmosféry a průměrem drátu (tomu musí odpovídat použité svařovací parametry).

### 2.3.1. Zkratový přenos

Při tomto typu přenosu se tvořící kapky roztaveného kovu dotknou povrchu svarové lázně a vytvoří zkrat. Tím se změní silové působení na kapku a dojde k jejímu oddělení od tavící se elektrody a přechodu do svarové lázně. Po přerušení zkratu se opět zapálí oblouk. K zapálení oblouku dojde v důsledku rostoucího proudu a přerušení tzv. krčku mezi elektrodou a kapkou - obr. 10.



Obr. 10 Zkratový přenos

Proces přenosu kovu je charakterizován údobím hoření oblouku a údobím zkratu. Je uskutečňován při nižších napětích (krátkém oblouku) a proudech a používá se při svařování ve všech polohách.



### 2.3.2. Zrychlený zkratový přenos

Zrychlený zkratový přenos (dále pouze Rapid Arc - RA), je svým mechanismem velice podobný klasickému zkratovému přenosu. Z důvodu použití vyššího proudu oproti konvenčnímu svařování krátkým obloukem, je oddělení kapky realizováno v kratším časovém intervalu a zapálení oblouku je rychlejší a explozivnější, než u klasického zkratového přenosu. Tento proces je určen pro vysoké rychlosti svařování v rozmezí 0,5 až 1,2 m.min<sup>-1</sup>.

### 2.3.3. Sprchový přenos

S rostoucím proudem narůstá frekvence oddělování kapek a jejich průměr klesá. Za stavu, kdy je průměr odtavovaných kapek menší než průměr přídavného svařovacího drátu, nejsou pro jejich přenos již rozhodující síly gravitační, ale síly elektromagnetické. Rozměry kapek nedosahují délky oblouku a v průběhu hoření nedochází ke zkratům - obr.11.



Obr. 11 Sprchový přenos kovu

Při sprchovém přenosu kapek je rozstřík kovu relativně malý. Na svařovaném základním materiálu vzniká velká svarová lázeň z důvodu velkého měrného výkonu tepelného zdroje. Sprchový přenos kovu proto není vhodný pro svařování materiálů malých tloušťek a svařování v polohách.

Nejčastěji se používá při automatickém svařování a při použití směsi plynů s převládajícím množstvím argonu, který zaručuje klidný a stabilní svařovací proces. Minimální obsah argonu ve směsi je 75%.

### 2.3.4. Moderovaný sprchový přenos

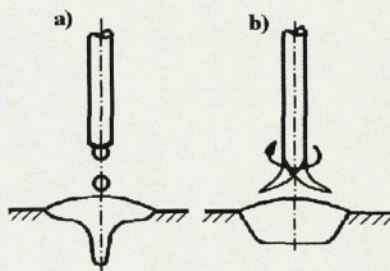
Při svařování moderovaným sprchovým režimem (proces Rapid Melt - RM) se kapky roztaveného kovu přenáší do tavné lázně jedna po druhé a tento přenos může být nejlépe přirovnán k přechodu kapek při pulzním svařování. Velikost



kapky je jen nepatrně větší než průměr drátu. Tento proces je orientován na dosažení vysokého výkonu odtavení.

### 2.3.5. Rotující oblouk

Při vysokých rychlostech podávání drátu vzniká rotující elektrický oblouk. Ten je výsledkem působení elektromagnetických sil vznikajících v důsledku velké proudové hustoty. Elektromagnetické síly způsobují odklon oblouku a nataveného konce elektrody ze směru pohybu drátu a vyvolávají rotační pohyb oblouku frekvencí cca 800 až 1000 otáček za sekundu. Při aplikaci rotujícího oblouku je vzniká svar s širokým závarem. Na obr.12 je porovnání tvaru závaru při sprchovém přenosu kovu a rotujícím oblouku.



Obr.12 Tvar závaru při svařování

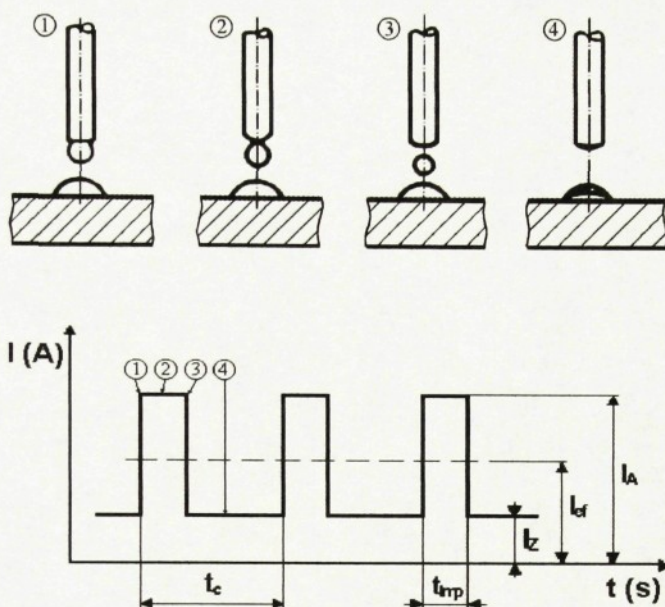
a) sprchovým přenosem, - moderovaný

b) rotujícím obloukem

### 2.3.6. Impulzní přenos

V pulzním režimu se trvalý oblouk udržuje nízkým základním proudem  $I_z$  (50 až 80 A) a oddělování kapek je zajištěno v období nárůstu proudu nad hodnotu přechodového proudu do oblasti sprchového přenosu. Jedná se o krátké proudové pulzy a při každém pulzu dochází k přechodu kapky roztaveného kovu z konce drátu do svarové lázně. Charakter přenosu a průběh veličin při impulzním režimu je na obr. 13.





Obr. 13 Přechod kovu a průběh proudu u pulzního svařování

$I_A$  – impulzní proud,  $I_z$  – základní proud,  $I_{ef}$  – efektivní proud,  $t_{imp}$  – čas trvání pulzu,  $t_c$  – čas cyklu (opakovací frekvence pulzu), 1 – intenzivní pulz natavuje konec elektrody, 2 – pinch efekt, 3 – na konci pulzu se odděluje kapka, 4 – dopad kapky do roztavené lázně, základní proud udržuje oblouk

## 2.4. METALURGICKÉ DĚJE PŘI TAVNÉM SVAŘOVÁNÍ [9]

Metalurgie obloukového MAG svařovacího procesu má určité specifické zvláštnosti a to především kontinuita dějů svařovacího procesu, vysokou intenzitu metalurgických reakcí a krátkou dobu jejich trvání. Kontinuita svařovacího procesu je v tom, že během trvání elektrického oblouku mezi základním materiálem a koncem přídavného materiálu (elektrody, drátu) dochází k neustálému přechodu svarového kovu v kapkách do svarové lázně. V každém okamžiku svařovacího procesu také probíhají současně různé metalurgické děje v soustavě tekutý kov - plynná fáze - tekutá struska, která vzniká vzájemným působením předchozích dvou fází. Metalurgické reakce svařovacího procesu probíhají převážně v mikroobjemech drobných kapek. Tyto „mikrometalurgické“ reakce se vyznačují tím, že probíhají ve velmi krátkém časovém intervalu. Stupeň přiblížení se k rovnovážnému stavu závisí především na chemickém složení



přídavného materiálu, typu ochranné atmosféry a použitých svařovacích parametrech, které určují čas vzájemného působení všech reagujících fází. Z uvedeného vyplývá, že nedochází k homogenizaci v celém objemu taveného kovu, ale jen v jednotlivých mikroobjemech. Vysoká intenzita metalurgických reakcí v oblasti elektrického oblouku je vyvolána vysokou teplotou a velkým reakčním povrchem mezi kapkami roztaveného kovu a okolním prostředím. Při svařování v ochranných atmosférách sehrávají z hlediska metalurgických procesů významnou úlohu ochranné plyny, některé prvky v přídavném drátu a způsob přenosu kapek kovu přes oblast elektrického oblouku.

Používání čistých plynů při svařování MAG má určité nevýhody. Proto je typické používání směsných plynů např.  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  apod. Z uvedeného je zřejmé, že ochranné plyny používané při svařování metodou MAG mají oxidační účinek. Oxidační charakter atmosféry je nutno eliminovat zvýšením obsahu dezoxidačních prvků v drátu (především Mn a Si). V závislosti na typu ochranné atmosféry, použitém přídavném materiálu a charakteru přenosu kovu se bude měnit chemické složení svarového kovu, zejména obsah C, Mn, Si, a tím i jeho mechanické vlastnosti.

Čím kratší je reakční doba tekutého kovu s okolní atmosférou, tím méně se liší obsah příslušných prvků ve svarovém kovu od jejich obsahu v drátu. Jakákoliv změna svařovacích podmínek ovlivní také obsah zmíněných prvků ve svarovém kovu.

Podle obsahu  $\text{CO}_2$  ve směsi s Ar se dosahuje rozličného stupně oxidačních reakcí, a tím se mění velikost propalu jednotlivých legujících prvků z přídavného materiálu. Propal prvků je ovšem také ovlivněn způsobem přenosu svarového kovu do svarové lázně. Směs 80 % Ar + 20%  $\text{CO}_2$  je nejoptimálnějším vzhledem k dosažení potřebné stability elektrického oblouku i mechanických vlastností svarového kovu.

Při použití směsi Ar +  $\text{O}_2$  se dosahuje zlepšení stability hoření elektrického oblouku, zlepšuje se formování svaru a geometrie závaru. Směs se vlivem kyslíku stává aktivní a začnou probíhat oxidační reakce. Zvyšuje se teplota svarové lázně a propal prvků, snižuje se povrchové napětí. Oxidační procesy mají příznivý vliv na čistotu svarového kovu. Většina oxidačních reakcí má exotermický charakter, přispívá tedy ke zvýšení teploty svarové lázně, čímž se tato stává tekutější a



vytvářejí se lepší podmínky pro vyplouvání nečistot a vměstků, pro rafinační, dezoxidační a jiné metalurgické reakce vedoucí k zlepšení kvality svaru. Za optimální množství kyslíku v argonu se považuje 3 až 5 %  $O_2$ .

Rovněž při použití směsi  $CO_2 + O_2$  dochází k zvýšení teploty svarové lázně, jejích rozměrů, doby její existence a tím vším k zlepšení možnosti odstranění nečistot, vměstků, úplnějšího průběhu chemických reakcí. Při použití těchto směsí se zmenšuje také rozstřík a dochází k lepšímu formování povrchu svarových housenek.

Výsledné vlastnosti svarového spoje jsou závislé na celé řadě dílčích faktorů. Za rozhodující lze v tomto směru pokládat:

- typ ochranné atmosféry,
- druh základního a přídavného materiálu,
- charakter přenosu kovu (svařovací parametry).

Uvedené faktory jsou rozhodující pro průběh svařovacího procesu a metalurgickou kvalitu svaru, neboť předurčují :

- chemické složení svarového kovu spoje,
- celkový obsah, druh, velikost a distribuci vměstků (jde především o produkty dezoxidační pochodů),
- charakter krystalizace a geometrii svaru.

Volba typu ochranné atmosféry, druhu a rozměru přídavného materiálu a svařovacích parametrů musí být provedena s ohledem na druh, rozměry a kvalitu základního materiálu i požadované operační vlastnosti metody. Složitost vzájemných vazeb jednotlivých dílčích faktorů přispívá k širšímu využití synergických svařovacích zdrojů.

## 2.5. PRODUKTIVITA SVAŘOVÁNÍ [10]

Kritéria produktivity metod svařování mohou být definována různě. Za rozhodující kritéria při metodě svařování MAG se pokládá:

- tavný výkon,
- operační faktor,
- efektivita provedení koutového svaru.



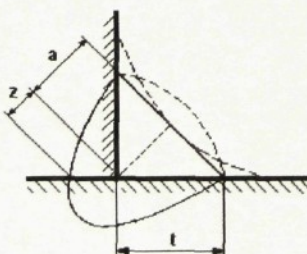
**Tavný výkon** je definován jako množství odtaveného přídavného materiálu za jednotku času. Je závislý především na použitých svařovacích parametrech.

**Operační faktor** je dán podílem času hoření oblouku a celkového pracovního času. Závisí zejména na stupni mechanizace a automatizace.

**Efektivita provedení koutového svaru** může být definována z různých pohledů. Za efektivně zhotovený koutový svar se obvykle považuje svar, který bude mít největší možnou nosnou velikost při nejmenším množství spotřebovaného přídavného materiálu a energie.

K efektivnímu vytvoření svaru je potřeba sladit požadavky konstrukčního návrhu a technologických možností vytvoření svaru. Základními údaji pro konstrukční návrh svaru jsou kromě druhu a způsobu namáhání také druh základního materiálu a jeho tloušťka, případně délka svaru a jeho přístupnost. Na základě těchto údajů určí konstruktér s přihlédnutím k technologickým možnostem svařování velikost a umístění svarů. Základními údaji pro stanovení technologických parametrů výroby svarů jsou především poloha svařování a možnost svařování z obou stran. Důležitá je také sériovost, která určuje výrobní podmínky (tj. vybavení pracoviště), zvláště využití mechanizace a polohování svarku.

**Koutový svar** patří mezi nejvíce používané typy spojů. Velikost koutového svaru není jednoznačně vymezena geometrií svařovaných dílů jako např. u tupého svaru a především při poloautomatickém způsobu svařování dochází při výrobě k zbytečnému předimenzování svarů a k nepravidelnosti svaru. Tím se efektivita provedení koutového svaru prudce snižuje. Vyplyvá to z jeho geometrie rovnostranného pravoúhlého trojúhelníka, kde vnější plocha svaru je kvadrátem výšky, tedy nosného rozměru podle obr. 14 a vztahu (9).

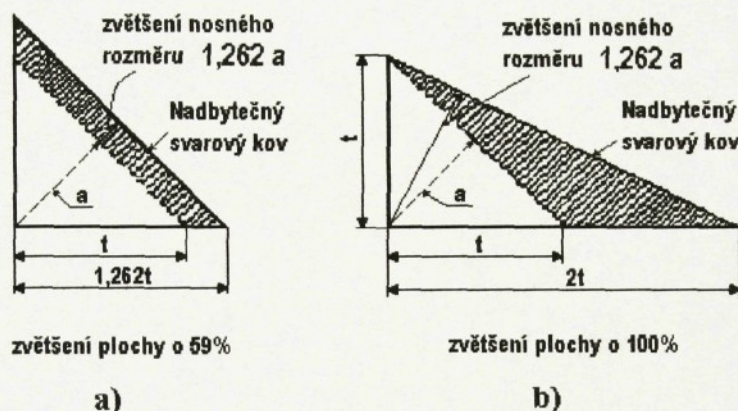


Obr. 14 Nosný průřez a geometrie koutového svaru



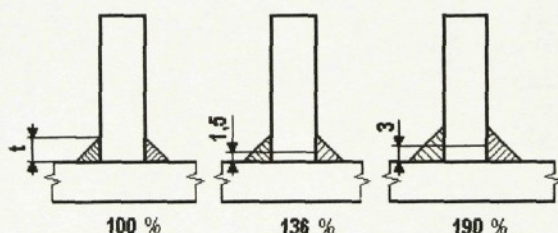
$$P = a^2 \quad (9)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že koutový svar velikosti 5 mm má o 56% větší plochu a tedy i objem než koutový svar velikosti 4 mm - obr.15 a). Plocha svaru se může neefektivně zvětšit také nesymetrií vnějšího tvaru - obr.15 b) nebo větší mezerou při sestavení podle obr.16.



Obr.15 Změna velikosti plochy vlivem:

- a) nosného rozměru
- b) nerovnoměrnosti svaru



Obr.16 Vliv vzdálenosti polotovarů na změnu plochy svaru

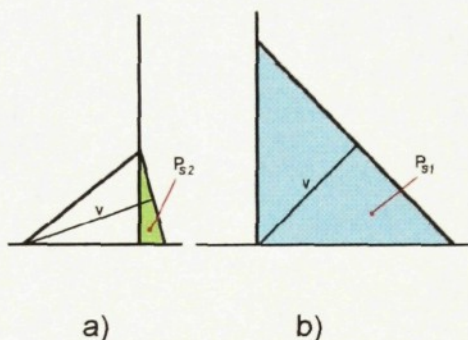
*přesnější sestavení*

Popisované neefektivní důsledky lze podstatně snížit zvětšením nosné velikosti závaru, který se podle ČSN 05 0120 do nosné velikosti svaru započítává - obr.14 (nosná velikost svaru:  $v = a + z$ ). Zahrnout závar do nosné velikosti lze ovšem pouze v případě, že výrobce může míru závaru garantovat. Zahrnutí závaru do nosné velikosti umožňuje zmenšit plochu návaru, která se



získá nanesením přídavného materiálu a zvýšit efektivitu svařování při stejné nosnosti svaru použitím metody s vyšší intenzitou proudu a tedy hlubším závarem v kořeni [18].

Tento přístup vede k úvahám o vhodnosti změny obvyklé geometrie vnější části svaru a zvýšit podíl závaru do celkové únosnosti svaru. Na obr. 17 je provedeno porovnání vzhledu zidealizovaných tvarů svarů s různým podílem závaru na nosné velikosti svaru.



Obr. 17 Změna zidealizovaného tvaru svaru s rozdílným podílem závaru na nosné velikosti svaru (oba svary mají stejnou nosnou velikost  $v$ )

Na obr 17 a) je svar s vysokým podílem závaru na nosné velikosti svaru  $v$ . Na obr. 17 b) svar bez uvažování závaru, ale se stejnou nosnou velikostí. Rozdíl v množství potřebného svařového kovu je zcela zřejmý z rozdílu velikosti vnějších ploch obou svarů  $P_{s1} \gg P_{s2}$ .

Efektivní provedení koutových svarů vyžaduje také stanovení optimální polohy hořáku i svarku a dodržení stanovených kritérií kvality svaru (např. celková geometrie svaru a vady svaru hodnocené podle norem) a svařovacího procesu (velikost rozstřiku).



### 2.5.1. Stanovení faktorů produktivity [11]

S nástupem výpočetní techniky do svařovacího procesu lze tavný výkon a operační faktor velmi dobře určit pomocí monitorovacího zařízení, které je příslušenstvím zdroje nebo univerzálním přídavným zařízením. Parametry svařování - velikost proudu, napětí, rychlost svařování, rychlost posuvu drátu, čas a vnesené teplo jsou v průběhu svařování ukládány na disk počítače a jsou k dispozici pro pozdější vyhodnocení.

Jednou z nejmodernějších metod pro stanovení parametrů procesu obloukového svařování a kvality pro specifické aplikace je metoda ARCWISE vyvinutá v EWI.

Metoda poskytuje koncepční přístup k řešení a určení podmínek svařovacího procesu, stanoví vztahy mezi svařovacími parametry, produktivitou a kvalitou svaru. Spočívá v udržování konstantního poměru tavného výkonu ke svařovací rychlosti. Tímto je zaručena konstantní plocha svaru, zatímco vzdálenost špičky, délka oblouku, ochranný plyn a další faktory jsou proměnné a posuzuje se jejich vliv. Metoda obsahuje dále uvedené kroky řešení.

#### ***Součástí metody:***

##### *1. Kriteria tvaru a kvality svaru:*

- žádná porosita větší než 3/32 in.
- žádné trhliny.
- převýšení menší než 3/32 in.
- poměr hloubky k šířce menší než 2.

##### *2. Matice testu konstantní plochy svaru.*

Zkouška konstantního tavného výkonu – plochy byla založena na hmotnostní rovnováze mezi rychlostí drátu (WFS) plochy drátu ( $A_w$ ) a efektivitou odtavování drátu ( $f_d$ ), a plochy svaru ( $DA$ ), převýšení ( $r$ ) a rychlosti svařování ( $TS$ ), kde  $WFS/TS$  poměr musí být zachován konstantní :

$$DA \times TS \times r = WFS \times A_w \times f_d$$

$$WFS/TS = (DA \times r) / (A_w \times f_d)$$



### 3. Stanovení vlivu délky oblouku.

Testy konstantního tavného výkonu jsou prováděny při dvou až třech délkách oblouku pro definování použitelného rozsahu parametrů. Skutečná délka oblouku závisí na velikosti svarové lázně, tvaru a tlaku oblouku. Během každého testu bylo napětí nastaveno na požadovanou délku oblouku. Byla sledována stabilita svarové lázně. Po svařování byl prohlédnut povrch svaru vizuálně z hlediska porosity a podříznutí. Přehled údajů byl použit pro záznam napětí, proudu, rychlosti drátu a rychlosti svařování.

### 4. Měření tvaru housenky.

Z každého svaru je zhotoven průřez v místě ustálených svařovacích podmínek. Tyto řezy svaru jsou leptány pro vyhodnocení svarové makrostruktury. Analýzou byla zjištěna délka strany svaru, velikost závaru a zápalu, velikost navařené a svarové plochy atd. Měření pak byla srovnána s kritérii přijatelnosti.

### 5. Grafické zpracování výsledků testů (tzv. okno produktivity svařování).

Okno produktivity svařování – grafická závislost: napětí-proud, napětí-rychlost drátu, proud-rychlost drátu.

Metoda umožňuje rychlé vytvoření postupů svařování pro poloautomatické i automatické aplikace svařování výběrem tvaru svaru, nebo požadovanou produktivitou a znázorněním formou grafu preferované parametry : délka oblouku, napětí, rychlost drátu, a rychlost svařování. V budoucnu se předpokládá, že bude vytvořena ucelená databáze. Použití optimalizovaných svařovacích procesů vyvinutých touto metodou může snížit náklady při vývojovém procesu.

Na katedře KSP byla vyvinuta vlastní metoda hodnocení efektivity svaru, viz. kapitola 3.4.1. Šítek ve své práci zmapoval dosažitelnou oblast parametrů v synergickém režimu svařování a provedl přiblížení souboru parametrů pro optimální hodnotu efektivit provedení koutového svaru. Bylo určeno, že ve sprchové oblasti přenosu kovu dochází při vyšších rychlostech svařování k zápalu po stranách svaru.



Maximální hodnoty rychlosti drátu, při kterých svar splňuje normu jsou okolo 14 m/min. Pro svary v horní části stanoveného rozmezí ploch návaru je charakteristické, že s klesající velikostí plochy dosažitelná hodnota rychlosti drátu a tedy i proudu klesá. Limitujícím faktorem se zde ukázala zejména rychlost svařování, kde u svarů přijatelné kvality nebyly překročeny hodnoty kolem 85 cm/min, což odpovídá rychlostem drátu max. 12 m/min. a ploše max. 14 mm<sup>2</sup>. Efektivita provedení koutového svaru byla dosažena i při nižších hodnotách (10,5 m/min. a 13 mm<sup>2</sup>).

Pro srovnání bylo provedeno několik svarů v oblasti zrychleného zkratu (24 m/min.). I když technické podmínky, potřebné pro tento režim nebyly úplně splněny, byly výsledky velmi zajímavé.

S ohledem na tyto závěry se ve své diplomové práci zaměřím do oblasti zkratu, přechodové oblasti a pokračováním až do oblasti zrychleného zkratu mimo oblast synergie – při použití stejného ochranného plynu a geometrie hořáku. Teprve při dosažení oblasti nestability procesu a nebo geometricky nepřijatelného tvaru svaru bude technologie změněna dle dostupných informací o procesu RapidArc od fy. AGA.



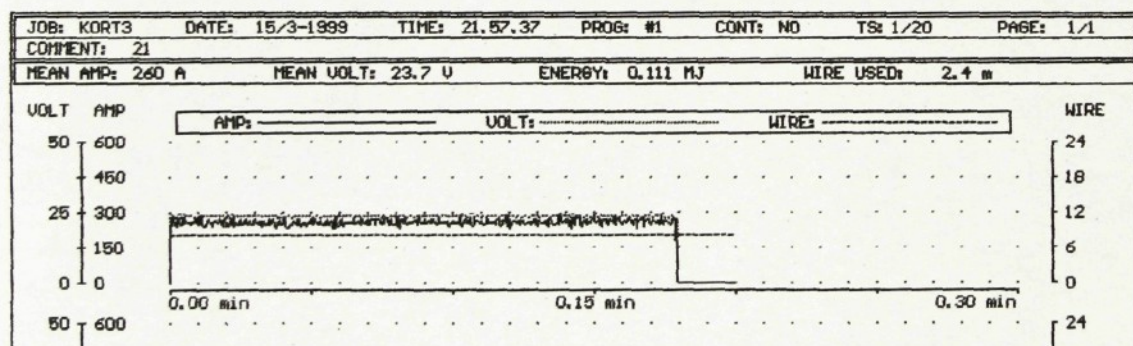
### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Základní cíle experimentální části práce jsou stanoveny na základě výsledků předchozích prací provedených na KSP (stručně popsáno v části 2.5.1.). Cílem práce je stanovení parametrických závislostí hlavních svařovacích parametrů a geometrie koutových svarů při zkratovém režimu přenosu kovu. Rozsah a obsah experimentální části práce bude upřesňován podle postupně vyhodnocovaných souborů měření tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší efektivity provedení koutového svaru posuzované podle metodického postupu popsaného v části práce 3.4.1.

#### 3.1 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ

Pro zhotovení zkušebních svarů byl použit invertorový zdroj BDH 550 od firmy Migatron. Na tomto zdroji se nastaví základní svařovací parametry: rychlost posuvu přídatného drátu (svařovací proud) a napětí.

Ke zvýšení užitečných vlastností je ke zdroji dodáván monitorovací program Infoweld, který umožňuje dokumentovat svařovací proces. Dokumentace je pořizována pro jednotlivé svary ve formě grafické závislosti hlavních svařovacích parametrů na čase a doplněna úplným výpisem nastavených hodnot obr.18 a 19.



Obr. 18 Záznam parametrů v průběhu svařování programem Infoweld  
(zkratový režim)

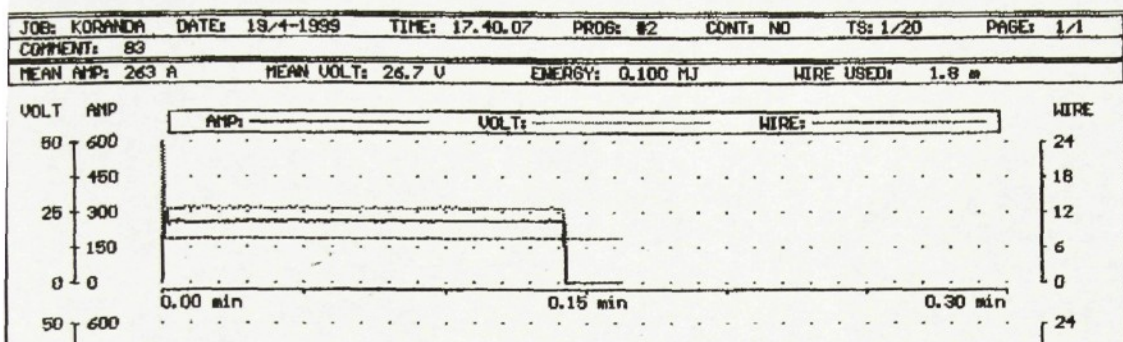
Mean AMP – střední hodnota proudu

Mean VOLT – střední hodnota napětí

Energy – množství tepla vyvinutého v elektrickém oblouku

Wire Used – délka vytaveného drátu





Obr. 19 Záznam parametrů v průběhu svařování programem Infoweld (sprchový režim)

Ze sledovaných záznamů procesních veličin je možno zpětně zjišťovat velikosti svařovacího proudu, napětí, rychlost posuvu drátu, délku vytaveného drátu, čas svařování a stanovit hodnotu měrného tavného výkonu. Z charakteru průběhu svařovacího proudu a napětí se dá posuzovat stabilita svařovacího procesu a místa možného výskytu vad.



Obr. 20 Uspořádání svařovacího pracoviště

Pro optimalizaci svařování koutových svarů je nutné, z důvodu zaručení stability všech svařovacích parametrů, použít mechanizované nebo automatizované



vařování tj. kde je nosičem hořáku strojní zařízení (svařovací robot nebo pojízdný ozík). V našem případě byl použit lineární svařovací automat firmy MIGATRONIC.

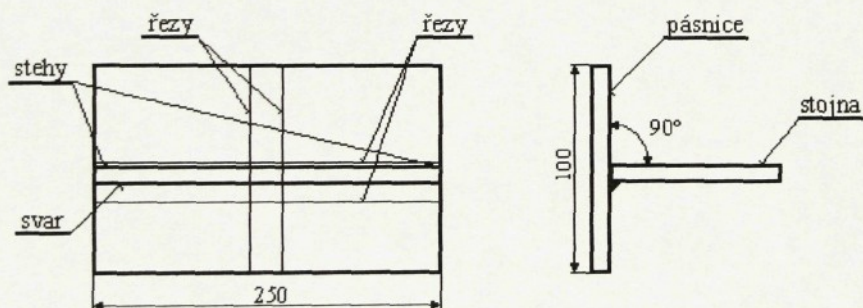
Při svařování byl použit ochranný plyn Corgon 18 od firmy LINDE. Ke svařování se používal plný svařovací drát průměru 1,2 mm firmy ESAB Vamberg.

Celkové uspořádání svařovacího pracoviště je na obr. 20.

## 3.2 POSTUP EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

### 3.2.1 Příprava vzorků

Pro přípravu zkušebních vzorků byla použita plochá tyč z oceli 11 373 o šířce 100 mm, tloušťce 8 mm a délce 6000 mm. Tato tyč byla rozřezána na díly o délce 250 mm. Svarové plochy se brousily, aby mezera při sestavení byla minimální, viz. teoretická část 2.5. obr.16 (vliv mezery na efektivní provedení svaru) a odstranily se případné nečistoty. Takto připravené dílce byly sestaveny a sestehovány dle obr. 21.



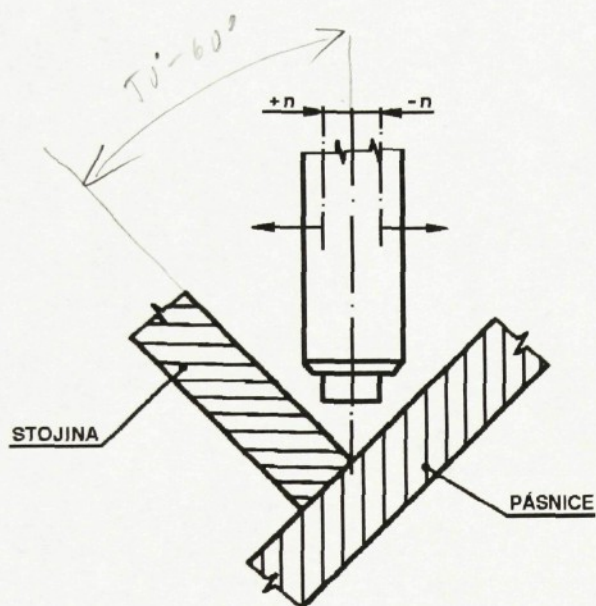
Obr. 21 Svařenec s vyznačenými řezy pro zkušební vzorek na zhotovení metalografického výbrusu

### 3.2.2 Metodika výroby svarů

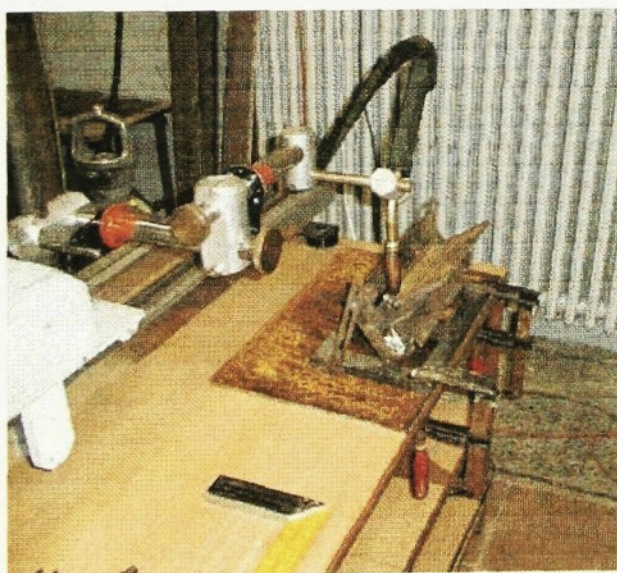
Svařování vzorků bylo prováděno ve zkratovém režimu ve svařovacím přípravku v poloze PA podle ISO 6947. Průtok ochranného plynu byl udržován v rozsahu 12 až 15 l.min<sup>-1</sup>. Před svařováním byla nastavena vzájemná poloha hořáku



přípravku podle obr. 22 a obr. 23. Polohování svarku, resp. hořáku, je v souladu návrhem metodického postupu prováděno s cílem získat co největší závar ve ykové ploše stojiny a pásnice.



Obr. 22 Schéma polohování svarku a hořáku



Obr. 23 Polohování svarku a hořáku – celkový pohled



V souladu se závěry v rešeršní části práce bude výběr parametrů svařování a sledovaných hodnot omezen na [2]:

- úhel náklonu svarku – dle předpokládané hloubky závaru – mezi  $50^\circ$  a  $60^\circ$
- úhel náklonu hořáku –  $10^\circ$  dopředu
- excentricita hořáku – 0,6 mm ve směru stojiny (podle obr. 22)
- vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem materiálu – 15 mm (u některých vzorků zvýšena na 18 nebo 21 mm, viz. tabulka naměřených hodnot)
- napětí – v celém rozsahu proudu držet pod hranicí přechodu na sprchový přenos kovu
- proud – min. 240 A, zvyšovat na maximální hodnotu ve zkratovém režimu
- rychlost svařování – vypočítat pro rozsah velikosti plochy návaru mezi 9 a 13 mm<sup>2</sup> pro celý rozsah měřeného proudu (rychlosti drátu).

V experimentální části práce byly nakonec realizovány následující soubory měření:

1. *série měření* - rozsah rychlosti drátu 7,6 – 9,8 m/min

- úpravy hodnot napětí dle režimu přenosu kovu
- plocha návaru 10 – 11 mm<sup>2</sup>.

- vyhodnocení – stanovení sklonu ploché charakteristiky zdroje a horní hranice zkratového režimu pro určování hodnot napětí v dalších měřeních.

Vyhodnocení základních hodnot a efektivity provedení svarů podle metodiky

uvezené v kapitole 3.4.1. Po vyhodnocení 1. série měření byly stanoveny podmínky dalších sérií měření.

2. *série měření* - rozsah rychlosti drátu 8,4 – 10,4 m/min

- zvětšení rozsahu ploch návaru na 9 – 13 mm<sup>2</sup>
- stanovení parametrické matice  $v_D - v_S - P_S$
- vyhodnocení efektivity

3. *série měření* - rozsah rychlosti drátu 7 – 13 m/min.

- opravy a upřesnění parametrů na základě předchozích výsledků
- vyhodnocení efektivity.



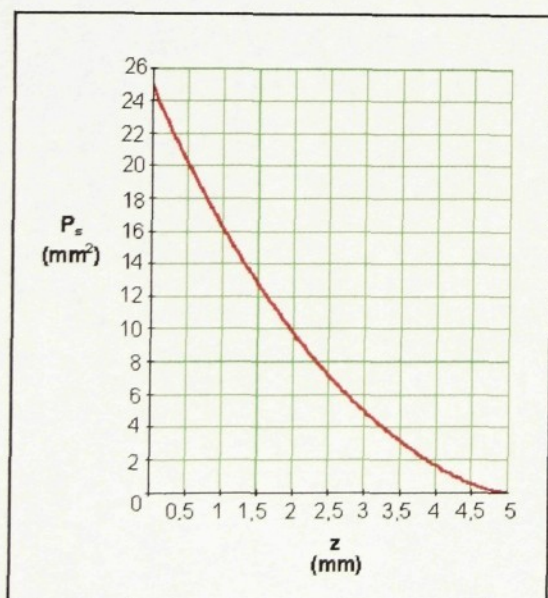
4. série měření – vzhledem k tomu, že nebylo dosaženo optimální hodnoty efektivity provedení koutového svaru za daných podmínek, byl proveden průzkum extrémních hranic parametrů vzhledem k dostupné technice ve směru předpokládaného optima.

### 3.3 POSTUP PŘI URČOVÁNÍ PERAMETRŮ SVAŘOVÁNÍ

Při řešení optimalizace svařování koutových svarů se postupovalo v souladu s normou ČSN 05 0120, která sice umožňuje započítat hloubku závaru do nosné velikosti svaru, přitom však vychází stále z vnějšího tvaru svaru pravoúhlého rovnoramenného trojúhelníku.

Zidealizovaný tvar svaru bude uvažován ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku, jehož vrcholem je bod závaru na rozhraní pásnice a stojiny. Při změně závaru a zachování nosné velikosti dojde ke změně vnějšího tvaru koutového svaru podle obr. 17. Z tohoto předpokladu byla určena matematická závislost mezi hloubkou závaru  $z$  a velikostí vnější plochy průřezu svaru  $P_s$  (plocha návaru) obr. 24.

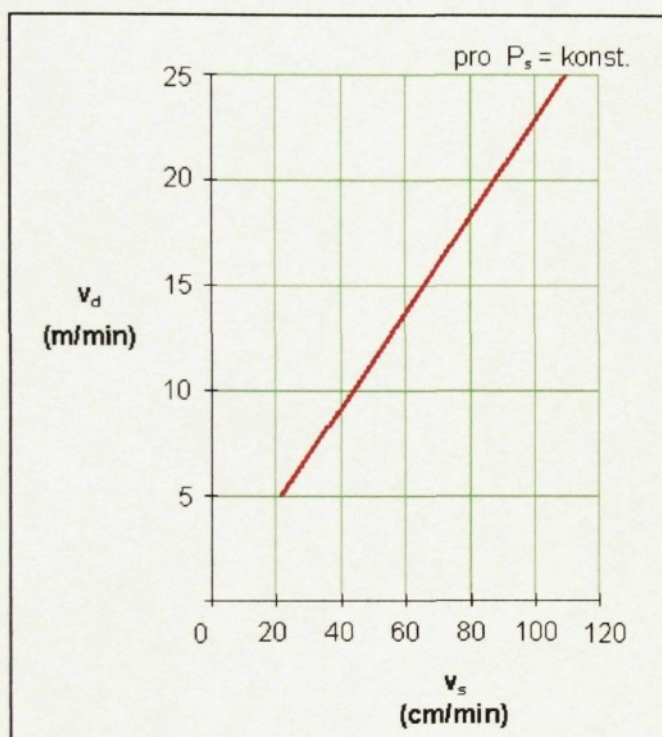
Za optimální bude považován takový svar, který bude vytvořen při co nejmenším množství vytaveného přídavného materiálu a bude mít co největší hloubku závaru.



Obr. 24 Grafická závislost plochy návaru na hloubce závaru  $P = f(z)$   
pro  $v = 5$  mm



Pro určení matice svařovacích parametrů a stanovený rozsah měření byl  
strojen graf závislosti  $v_d = f(v_s, P_s)$  podle obr. 25.



Obr. 25 Závislost rychlosti posuvu drátu na rychlosti svařování  
pro  $P_s = \text{konst.}$

Stanovení závislosti  $v_d = f(v_s, P_s)$  je provedeno na základě rovnosti objemů  
vytaveného přídavného materiálu a objemu navařené vnější části svaru podle vztahu

$$\pi \cdot r^2 \cdot k \cdot L_D = P_s \cdot L_s \quad (9)$$

le :

$r$  ..... poloměr drátu [mm]

$k$  ..... koeficient  $k = 0,96$

(v tomto koeficientu je zahrnut rozstřík a využití drátu)

$L_D$  ..... vytavená délka drátu [mm]

$L_s$  ..... délka svaru [mm]



Z rovnosti času vytvoření svaru o délce  $L_S$  a času vytavení délky drátu  $L_D$  lze novit rychlost svařování ze vztahu (10), neboť platí:

$$\frac{L_S}{v_S} = \frac{L_D}{v_D} \quad (10)$$

sledný vztah pro určení  $v_S$  je dán rovnicí (11).

$$v_S = \frac{L_S}{L_D} \cdot v_D \quad (11)$$

Poměr  $L_S/L_D$  dosadíme do rovnice (11) z rovnice (9) a získáme tak závislost rychlosti svařování jako funkci rychlosti drátu a vnější plochy svaru ve tvaru (12). Podobně můžeme vyjádřit i závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování a vnější ploše svaru – rovnice (13).

$$v_S = \frac{v_D}{P_s} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot k \quad (12)$$

$$v_D = \frac{v_S}{\pi \cdot r^2 \cdot k} \cdot P_s \quad (13)$$

### 3.4 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pomocí programu Excel byl vytvořen graf, ve kterém jsou vyznačeny závislosti rychlosti posuvu drátu na rychlosti svařování s vyznačenými přímkami, které odpovídají určité vnější ploše svaru  $P_s$  – graf podle obr. 25. Do tohoto grafu pak byly zaneseny skutečné hodnoty  $v_S$ ,  $v_D$  všech zhotovených svarů – graf č.1. Z tohoto grafu je zřejmé do jaké míry byly u skutečně provedených svarů vnější plochy svaru shodné s předem uvažovanými hodnotami.

Při zanesení výsledků postupně realizovaných sérií měření do grafu závislosti podle obr. 25 byly podmínky dalších měření stanoveny vždy tak, aby pro každou hodnotu uvažovaných vnějších ploch svaru byl získán dostatek hodnot pro vytvoření



metrických závislostí. Z vyhodnocených záznamů monitorovacího zařízení jsou  
né výsledky uvedené v tabulkách č.1, č.2, č.3.

### 3.4.1 Vizuální kontrola a rozměrová analýza svaru

Limitující hodnotou tvaru svaru jsou kritéria jakosti - mezních hodnot vad stupně  
ti svaru B a C (vysoký, střední) dle ČSN EN 25817:

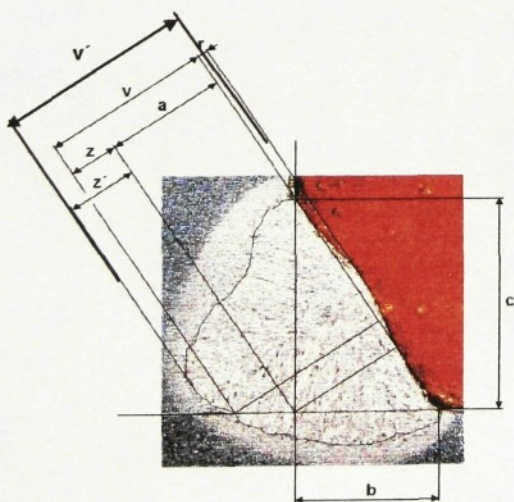
vrub  $h \leq 0,5 \text{ mm} (1 \text{ mm})$

převýšení  $h' \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b (1 \text{ mm} + 0,15 b)$

ota  $b$  je přeponou pravoúhlého trojúhelníku měřených stran svaru  $b, c$  (tabulky  
5, 6). Požadován je také pozvolný přechod svaru do základního materiálu.

Svar byl nejdříve vyhodnocen vizuálně s cílem posoudit makroskopické vady,  
ou a tvar svarové housenky, rovnoměrnost svaru po celé délce a plynulost  
rodu do základního materiálu. Byla změřena délka svaru  $L_s$ .

Následně bylo provedeno vyhodnocení makrostruktury svaru u zkušebních  
ů, které byly získány z příčných řezů v místě typickém pro celý svar podle obr.  
ovrch řezné plochy vzorku, která byla blíže k počátku svařování se zarovnal na  
í brusce a vzniklé otřepy na hranách vzorku se odstranily pilníkem. Vzorek se  
do dentakrylu, byl vybroušen a vyleštěn na metalografické brusce. Po naleptání  
litem byla plocha vzorku snímána RGB kameru (objektiv Nikon) do počítače.  
z byl vyhodnocen pomocí programu Lucia. Byly změřeny rozměry svaru:  $a$   
 $a$  svaru),  $b$  a  $c$  (odvěsny svaru),  $v$  (nosná velikost svaru  $v = a + z$ ),  $z'$   
imální hodnota závaru),  $z$  (skutečný závar),  $r$  (převýšení svaru) podle obr. 26.

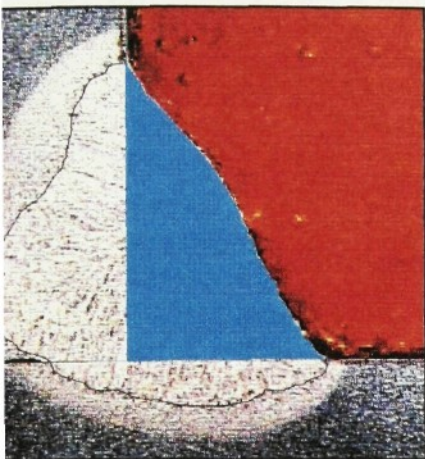


Obr. 26 Zjišťované rozměry svaru

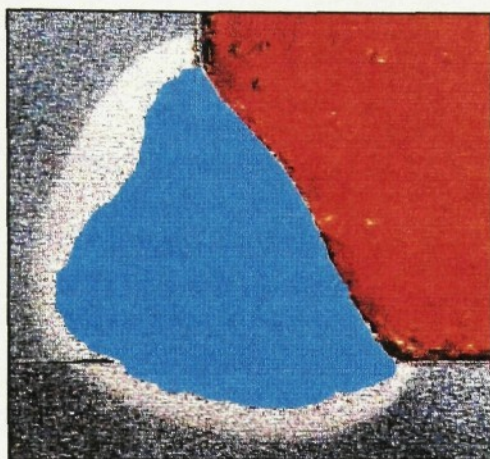


Dále byly v souladu s obr. 28 určeny velikosti ploch  $P_c$  (celková plocha svaru) a  
. 27 velikosti vnějších ploch  $P_s$  (plocha svaru). Získané hodnoty jsou uvedeny  
. č.4, č.5, č.6.

(vnější)



Obr. 27 Vnější plocha  $P_s$



Obr. 28 Celková plocha  $P_c$



| vzorek | $v_D$<br>m/min | $I$<br>A | $U$<br>V | $T$<br>s | $E$<br>kW | $L_s$<br>cm | $d$<br>mm | alfabeta<br>° | $L_D$<br>m | $v_s$<br>cm/min | $L_D$<br>mm | $P_1$<br>mm <sup>2</sup> | $Q_1$<br>kJ/cm |
|--------|----------------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-----------|---------------|------------|-----------------|-------------|--------------------------|----------------|
| 1      | 8,4            | 251      | 25,4     | 16,95    | 6,37      | 21,3        | 21        | 10 60         | 2,37       | 75,4            | 11,1        | 11,7                     | 5,07           |
| 2      | 8,4            | 253      | 25,9     | 15       | 6,55      | 21          | 21        | 10 60         | 2,10       | 84,0            | 10,0        | 10,5                     | 4,68           |
| 3      | 8,4            | 253      | 26,4     | 14,05    | 6,67      | 20,9        | 21        | 10 60         | 1,97       | 89,3            | 9,4         | 9,9                      | 4,49           |
| 4      | 8,4            | 254      | 26,6     | 12,6     | 6,75      | 19,8        | 21        | 10 60         | 1,76       | 94,3            | 8,9         | 9,4                      | 4,30           |
| 5      | 8,4            | 266      | 26,5     | 13,9     | 7,04      | 21,7        | 18        | 10 60         | 1,95       | 93,7            | 9,0         | 9,4                      | 4,52           |
| 6      | 8,4            | 265      | 26,2     | 11,85    | 6,94      | 20,2        | 18        | 10 60         | 1,66       | 102,3           | 8,2         | 8,6                      | 4,07           |
| 7      | 8,4            | 264      | 26,25    | 11,1     | 6,93      | 19,5        | 18        | 10 60         | 1,55       | 105,4           | 8,0         | 8,4                      | 3,94           |
| 8      | 8,8            | 273      | 26,2     | 12,8     | 7,15      | 19,4        | 18        | 10 60         | 1,88       | 90,9            | 9,7         | 10,2                     | 4,72           |
| 9      | 8,8            | 274      | 26,4     | 12,1     | 7,23      | 19,2        | 18        | 10 60         | 1,77       | 95,2            | 9,2         | 9,7                      | 4,56           |
| 10     | 8,8            | 272      | 26,4     | 11,2     | 7,18      | 19,7        | 18        | 10 60         | 1,64       | 105,5           | 8,3         | 8,8                      | 4,08           |
| 11     | 9,2            | 274      | 26,4     | 12,3     | 7,23      | 18,4        | 18        | 10 60         | 1,89       | 89,8            | 10,3        | 10,8                     | 4,84           |
| 12     | 9,2            | 282      | 26,3     | 11,7     | 7,41      | 19,9        | 18        | 10 60         | 1,79       | 102,1           | 9,0         | 9,5                      | 4,36           |
| 13     | 9,2            | 283      | 26,3     | 11,75    | 7,44      | 20,6        | 18        | 10 60         | 1,80       | 105,2           | 8,7         | 9,2                      | 4,25           |
| 14     | 9,6            | 296      | 26,2     | 12,3     | 7,75      | 20,3        | 18        | 10 60         | 1,97       | 99,0            | 9,7         | 10,2                     | 4,70           |
| 15     | 9,6            | 297      | 26,2     | 11,2     | 7,78      | 19,7        | 18        | 10 60         | 1,79       | 105,5           | 9,1         | 9,6                      | 4,42           |
| 16     | 10             | 300      | 26,4     | 12,4     | 7,92      | 21          | 18        | 10 60         | 2,07       | 101,6           | 9,8         | 10,4                     | 4,68           |
| 17     | 10             | 296      | 26,4     | 9,7      | 7,81      | 17          | 18        | 10 60         | 1,62       | 105,2           | 9,5         | 10,0                     | 4,46           |
| 18     | 10             | 296      | 26,4     | 11,4     | 7,81      | 20          | 18        | 10 60         | 1,90       | 105,3           | 9,5         | 10,0                     | 4,45           |
| 19     | 10,4           | 308      | 26,55    | 12,35    | 8,17      | 20,6        | 18        | 10 60         | 2,14       | 100,1           | 10,4        | 10,9                     | 4,90           |
| 20     | 10,4           | 306      | 26,55    | 11,5     | 8,12      | 20,2        | 18        | 10 60         | 1,99       | 105,4           | 9,9         | 10,4                     | 4,63           |
| 21     | 8,2            | 260      | 23,7     | 17,9     | 6,16      | 21,4        | 15        | 10 55         | 2,45       | 71,7            | 11,4        | 12,0                     | 5,15           |
| 22     | 8,2            | 260      | 25,2     | 17,75    | 6,55      | 21,2        | 15        | 10 55         | 2,43       | 71,7            | 11,4        | 12,0                     | 5,49           |
| 23     | 8,9            | 273      | 25,3     | 17,4     | 6,9       | 20,8        | 15        | 10 55         | 2,58       | 71,7            | 12,4        | 13,1                     | 5,78           |
| 24     | 7              | 242      | 25,3     | 15,05    | 6,12      | 20,45       | 15        | 10 55         | 1,76       | 81,5            | 8,6         | 9,0                      | 4,51           |



Tab. č.2

| vzorek | $v_D$<br>m/min | $T$<br>A | $U$<br>V | $T$<br>s | $E$<br>kW | $L_s$<br>cm | $d$<br>mm | alfabet<br>° | $L_D$<br>m | $v_s$<br>cm/min | $L_D$<br>mm | $P_1$<br>mm <sup>2</sup> | $Q_1$<br>kJ/cm |
|--------|----------------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-----------|--------------|------------|-----------------|-------------|--------------------------|----------------|
| 25     | 7,7            | 252      | 25,6     | 15,05    | 6,45      | 20,45       | 15        | 10           | 55         | 81,5            | 9,4         | 9,9                      | 4,75           |
| 26     | 8,5            | 272      | 25,6     | 15,85    | 6,96      | 21,55       | 15        | 10           | 55         | 81,6            | 10,4        | 11,0                     | 5,12           |
| 27     | 8,5            | 272      | 25,9     | 14,85    | 7,04      | 20,2        | 15        | 10           | 55         | 81,6            | 10,4        | 11,0                     | 5,18           |
| 28     | 9,3            | 287      | 26       | 14       | 7,46      | 19,05       | 15        | 10           | 55         | 81,6            | 11,4        | 12,0                     | 5,48           |
| 29     | 10             | 297      | 26       | 15,8     | 7,72      | 21,5        | 15        | 10           | 55         | 81,6            | 12,2        | 12,9                     | 5,67           |
| 30     | 7,8            | 255      | 25,6     | 13,95    | 6,52      | 21,65       | 15        | 10           | 55         | 93,1            | 8,4         | 8,8                      | 4,21           |
| 31     | 8,7            | 272      | 25,8     | 13,3     | 7,01      | 20,65       | 15        | 10           | 55         | 93,2            | 9,3         | 9,8                      | 4,52           |
| 32     | 9,5            | 287      | 26       | 13,05    | 7,46      | 20,25       | 15        | 10           | 55         | 93,1            | 10,2        | 10,7                     | 4,81           |
| 33     | 10,4           | 312      | 26       | 13,1     | 8,11      | 20,3        | 15        | 10           | 55         | 93,0            | 11,2        | 11,8                     | 5,23           |
| 34     | 11,3           | 325      | 26,2     | 13,15    | 8,51      | 20,4        | 15        | 10           | 55         | 93,1            | 12,1        | 12,8                     | 5,49           |
| 35     | 11,3           | 329      | 26,6     | 13,1     | 8,75      | 20,3        | 15        | 10           | 55         | 93,0            | 12,2        | 12,8                     | 5,65           |
| 36     | 11,3           | 327      | 27,1     | 13,15    | 8,86      | 20,4        | 15        | 10           | 55         | 93,1            | 12,1        | 12,8                     | 5,71           |
| 37     | 11             | 320      | 26,6     | 11,1     | 8,51      | 19,9        | 15        | 10           | 55         | 107,6           | 10,2        | 10,8                     | 4,75           |
| 38     | 12             | 338      | 26,7     | 11,55    | 9,02      | 20,7        | 15        | 10           | 55         | 107,5           | 11,2        | 11,8                     | 5,04           |
| 39     | 13             | 355      | 27,2     | 11,7     | 9,65      | 21          | 15        | 10           | 55         | 107,7           | 12,1        | 12,7                     | 5,38           |
| 40     | 9,8            | 297      | 25,8     | 12,2     | 7,66      | 23,4        | 15        | 10           | 55         | 115,1           | 8,5         | 9,0                      | 4,00           |
| 41     | 10,9           | 328      | 26,6     | 11,35    | 8,72      | 21,8        | 15        | 10           | 55         | 115,2           | 9,5         | 10,0                     | 4,54           |
| 42     | 12             | 348      | 27       | 10       | 9,39      | 19,2        | 15        | 10           | 55         | 115,2           | 10,4        | 11,0                     | 4,89           |
| 43     | 13,1           | 364      | 26,9     | 10,5     | 9,79      | 20,2        | 15        | 10           | 55         | 115,4           | 11,3        | 12,0                     | 5,09           |
| 44     | 14,2           | 383      | 27,2     | 11,05    | 10,4      | 21,25       | 15        | 10           | 55         | 115,4           | 12,3        | 13,0                     | 5,42           |
| 45     | 9              | 288      | 25,3     | 11,8     | 7,28      | 21,1        | 15        | 20           | 55         | 107,3           | 8,4         | 8,8                      | 4,07           |
| 46     | 11             | 324      | 26,9     | 11,2     | 8,71      | 20,05       | 15        | 20           | 55         | 107,4           | 10,2        | 10,8                     | 4,87           |
| 47     | 13             | 351      | 27,2     | 10,6     | 9,54      | 19          | 15        | 20           | 55         | 107,5           | 12,1        | 12,7                     | 5,33           |
| 48     | 13             | 357      | 27,7     | 10,55    | 9,88      | 18,9        | 15        | 20           | 55         | 107,5           | 12,1        | 12,7                     | 5,52           |
| 49     | 9,8            | 285      | 26,1     | 10,75    | 7,43      | 21,2        | 15        | 20           | 55         | 118,3           | 8,3         | 8,7                      | 3,77           |



Tab. č.3

| vzorek | $v_D$<br>m/min | I<br>A | U<br>V | T<br>s | E<br>kW | $L_s$<br>cm | d<br>mm | alfabeta<br>° | $L_D$<br>m | $v_s$<br>cm/min | $L_D^1$<br>mm | $P_1$<br>mm <sup>2</sup> | $Q_1$<br>kJ/cm |
|--------|----------------|--------|--------|--------|---------|-------------|---------|---------------|------------|-----------------|---------------|--------------------------|----------------|
| 50     | 12             | 333    | 26,7   | 9,05   | 8,89    | 17,85       | 15      | 20            | 55         | 118,3           | 10,1          | 10,7                     | 4,51           |
| 51     | 14,2           | 377    | 27,5   | 7      | 10,3    | 13,8        | 15      | 20            | 55         | 118,3           | 12,0          | 12,6                     | 5,26           |
| 52     | 16,4           | 393    | 28,1   | 10,5   | 11,04   | 20,7        | 15      | 20            | 55         | 118,3           | 13,9          | 14,6                     | 5,60           |
| 81     | 8              | 266    | 24,8   | 15     | 6,59    | 19,9        | 15      | 10            | 50         | 79,6            | 10,1          | 10,6                     | 4,97           |
| 82     | 8              | 277    | 26,7   | 14,7   | 7,39    | 19,5        | 15      | 10            | 50         | 79,6            | 10,1          | 10,6                     | 5,58           |
| 83     | 7,6            | 265    | 26,8   | 14,1   | 7,1     | 18,7        | 15      | 10            | 50         | 79,6            | 9,6           | 10,1                     | 5,35           |
| 84     | 7,6            | 250    | 23,9   | 14,7   | 5,97    | 19,5        | 15      | 10            | 50         | 79,6            | 9,5           | 10,1                     | 4,50           |
| 85     | 7,6            | 250    | 23,9   | 14,7   | 5,97    | 19,5        | 15      | 10            | 50         | 79,6            | 9,5           | 10,1                     | 4,50           |
| 86     | 7,8            | 265    | 24,2   | 14,9   | 6,41    | 19,8        | 15      | 10            | 50         | 79,7            | 9,8           | 10,3                     | 4,83           |
| 87     | 8,4            | 280    | 25,2   | 16,4   | 7,05    | 20,8        | 15      | 10            | 50         | 76,1            | 11,0          | 11,6                     | 5,56           |
| 88     | 8,8            | 297    | 25,4   | 15,8   | 7,54    | 20,1        | 15      | 10            | 50         | 76,3            | 11,5          | 12,1                     | 5,93           |
| 89     | 8,8            | 282    | 25,5   | 15,1   | 7,19    | 21,3        | 15      | 10            | 50         | 84,6            | 10,4          | 10,9                     | 5,10           |
| 90     | 9,2            | 290    | 25,5   | 14,5   | 7,39    | 20,4        | 15      | 10            | 50         | 84,4            | 10,9          | 11,5                     | 5,26           |
| 91     | 9,5            | 292    | 25,5   | 13,3   | 7,44    | 20          | 15      | 10            | 50         | 90,2            | 10,5          | 11,1                     | 4,95           |
| 92     | 9,5            | 298    | 25,8   | 13,3   | 7,68    | 20          | 15      | 10            | 50         | 90,2            | 10,5          | 11,1                     | 5,11           |
| 93     | 9,5            | 302    | 26,1   | 14,15  | 7,88    | 21,3        | 15      | 10            | 50         | 90,3            | 10,5          | 11,1                     | 5,24           |
| 94     | 9,5            | 300    | 26,4   | 13,3   | 7,92    | 20          | 15      | 10            | 50         | 90,2            | 10,5          | 11,1                     | 5,27           |
| 95     | 9,5            | 302    | 26,8   | 12,1   | 8,09    | 18,2        | 15      | 10            | 50         | 90,2            | 10,5          | 11,1                     | 5,38           |
| 96     | 9,8            | 310    | 26,7   | 13,3   | 8,27    | 20,9        | 15      | 10            | 50         | 94,3            | 10,4          | 10,9                     | 5,27           |
| 97     | 9,8            | 312    | 27     | 10,3   | 8,42    | 16,2        | 15      | 10            | 50         | 94,4            | 10,4          | 10,9                     | 5,36           |
| 98     | 9,6            | 310    | 26,8   | 10,3   | 8,3     | 16,2        | 15      | 10            | 50         | 94,4            | 10,2          | 10,7                     | 5,28           |
| 99     | 9,5            | 304    | 26,6   | 12,2   | 8,08    | 19,2        | 15      | 10            | 50         | 94,4            | 10,1          | 10,6                     | 5,14           |

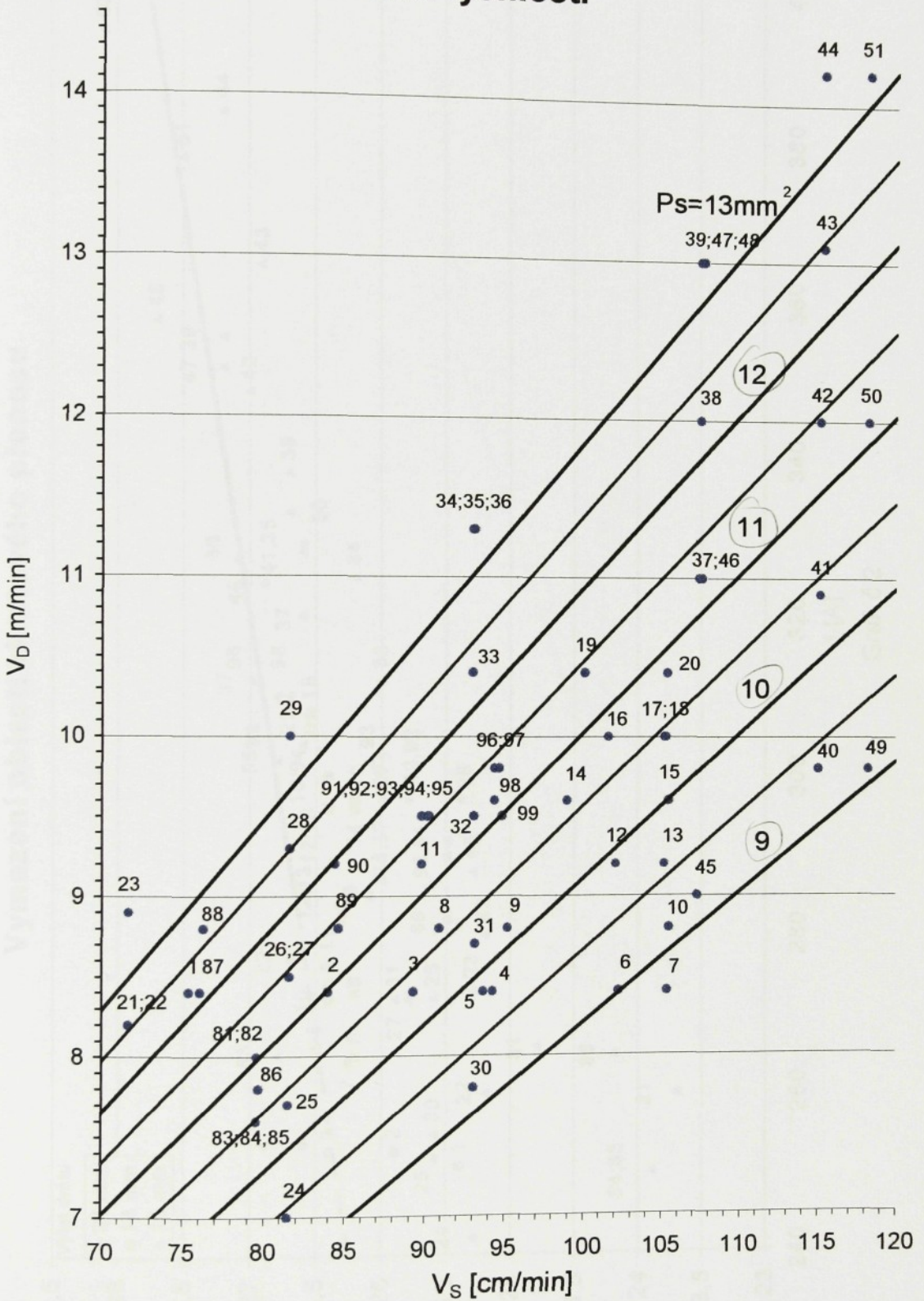


Tab. č.6

| vzorek | Pc<br>(mm <sup>2</sup> ) | Ps<br>(mm <sup>2</sup> ) | P <sup>1</sup><br>(mm <sup>2</sup> ) | D<br>(%) | v<br>(mm) | v'<br>(mm) | a<br>(mm) | z<br>(mm) | z'<br>(mm) | b<br>(mm) | c<br>(mm) | r<br>(mm) |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 81     | 18,76                    | 9,84                     | 10,60                                | 0,48     | 4,33      | 4,38       | 3,03      | 1,30      | 1,35       | 3,85      | 4,64      | 0,37      |
| 82     | 21,91                    | 9,92                     | 10,60                                | 0,55     | 4,51      | 4,51       | 2,79      | 1,73      | 1,73       | 3,27      | 4,99      | 0,54      |
| 83     | 18,75                    | 9,33                     | 10,10                                | 0,50     | 3,28      | 3,86       | 2,44      | 0,84      | 1,42       | 6,43      | 2,49      | 0,77      |
| 84     | 17,86                    | 9,68                     | 10,10                                | 0,46     | 3,78      | 3,91       | 2,87      | 0,92      | 1,04       | 4,66      | 3,57      | 0,51      |
| 85     | 17,95                    | 9,56                     | 10,10                                | 0,47     | 3,84      | 3,86       | 3,01      | 0,82      | 0,85       | 4,48      | 3,97      | 0,35      |
| 86     | 20,98                    | 11,12                    | 10,30                                | 0,47     | 4,17      | 4,28       | 3,29      | 0,86      | 0,99       | 4,71      | 4,31      | 0,43      |
| 87     | 24,13                    | 12,32                    | 11,60                                | 0,49     | 4,66      | 4,82       | 3,46      | 1,19      | 1,36       | 4,99      | 4,52      | 0,45      |
| 88     | 27,56                    | 13,18                    | 12,10                                | 0,52     | 5,47      | 5,56       | 3,30      | 2,16      | 2,26       | 5,81      | 3,82      | 0,53      |
| 89     | 23,60                    | 11,77                    | 10,92                                | 0,50     | 4,87      | 4,90       | 3,30      | 1,55      | 1,60       | 5,46      | 4,00      | 0,45      |
| 90     | 24,37                    | 11,60                    | 11,50                                | 0,52     | 4,93      | 5,15       | 3,27      | 1,67      | 1,88       | 5,22      | 4,07      | 0,43      |
| 91     | 22,43                    | 11,56                    | 11,10                                | 0,48     | 4,85      | 4,97       | 3,26      | 1,58      | 1,71       | 3,91      | 5,32      | 0,45      |
| 92     | 24,48                    | 12,38                    | 11,10                                | 0,49     | 5,19      | 5,33       | 3,29      | 1,90      | 2,04       | 5,27      | 3,95      | 0,56      |
| 93     | 23,26                    | 11,07                    | 11,10                                | 0,52     | 4,88      | 4,98       | 3,13      | 1,73      | 1,85       | 5,06      | 3,81      | 0,51      |
| 94     | 24,10                    | 11,95                    | 11,10                                | 0,50     | 5,16      | 5,27       | 3,19      | 1,96      | 2,08       | 5,34      | 3,77      | 0,79      |
| 95     | 25,23                    | 11,76                    | 11,10                                | 0,53     | 5,03      | 5,30       | 3,23      | 1,80      | 2,07       | 3,93      | 5,44      | 0,40      |
| 96     | 22,85                    | 10,72                    | 10,90                                | 0,53     | 4,70      | 5,04       | 3,06      | 1,61      | 1,98       | 4,79      | 3,88      | 0,56      |
| 97     | 25,84                    | 11,33                    | 10,90                                | 0,56     | 4,79      | 5,19       | 2,98      | 1,81      | 2,21       | 3,91      | 4,40      | 0,80      |
| 98     | 21,64                    | 11,06                    | 10,70                                | 0,49     | 4,25      | 4,37       | 3,25      | 1,00      | 1,12       | 4,23      | 4,75      | 0,38      |
| 99     | 22,26                    | 10,52                    | 10,60                                | 0,53     | 4,60      | 4,75       | 2,89      | 1,86      | 1,86       | 4,74      | 3,48      | 0,87      |



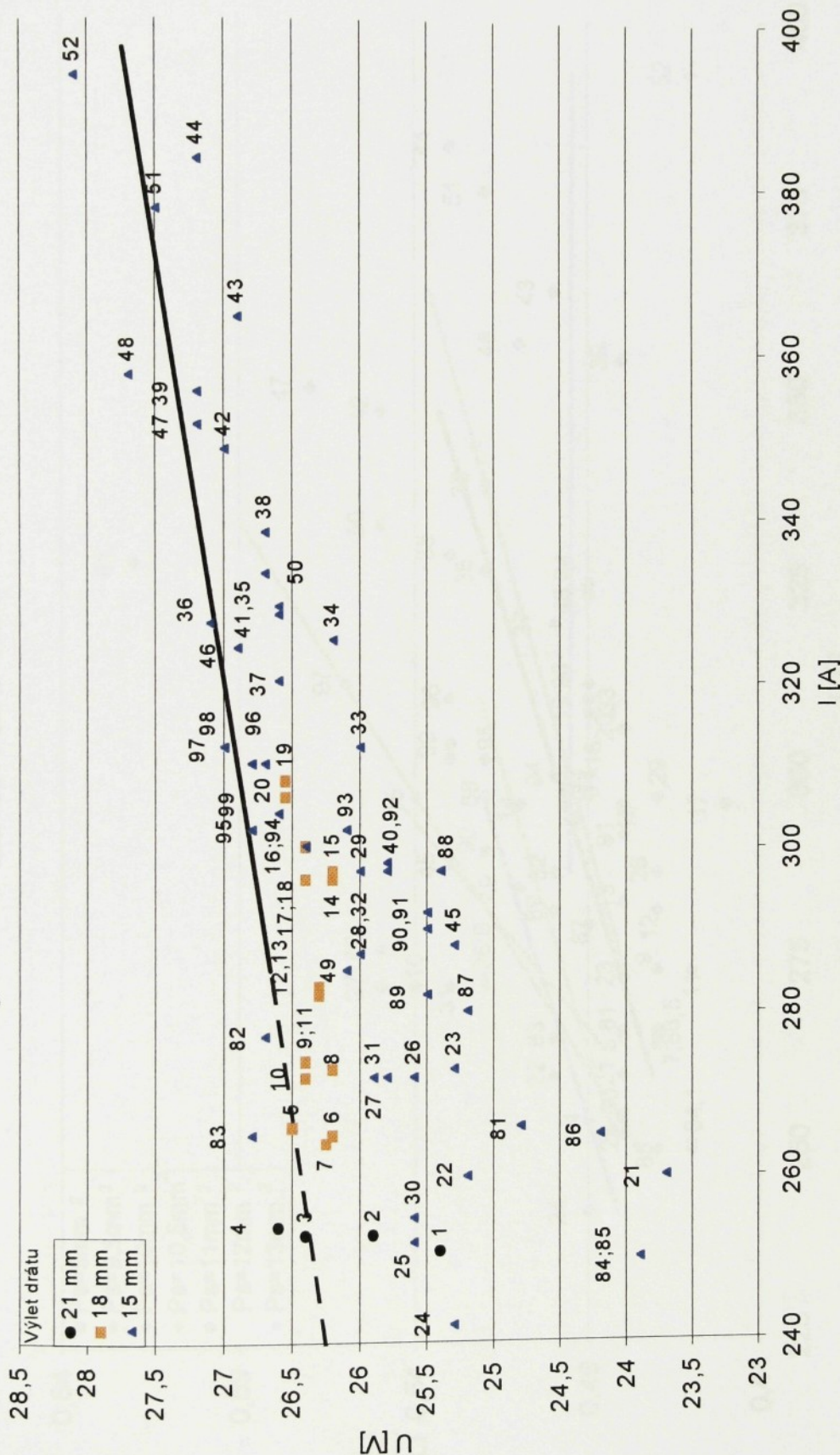
## Graf rychlostí



Graf č.1



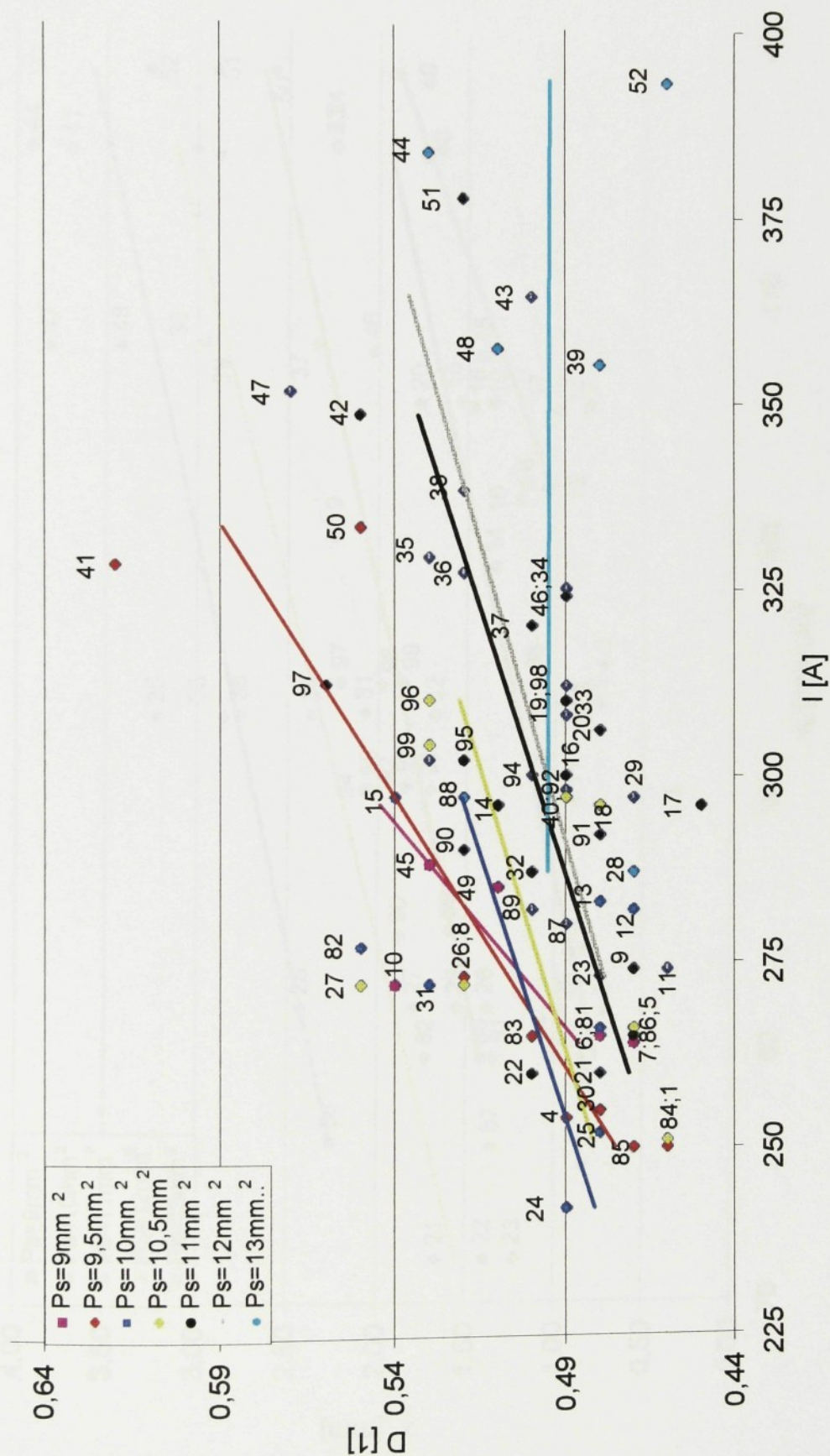
# Vymezení oblasti zkratového přenosu



Graf č.2



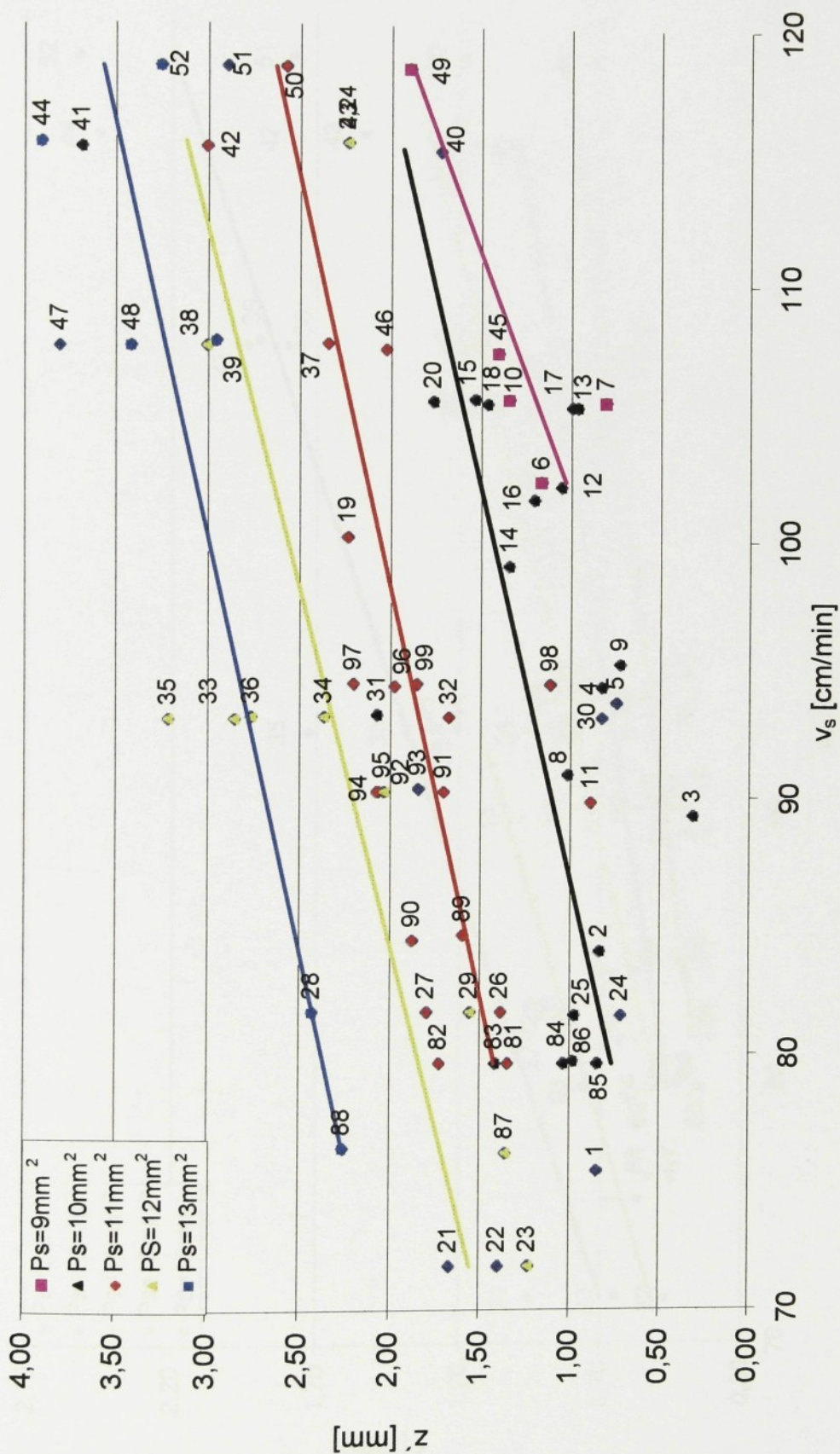
# Závislost D na I



Graf č.3



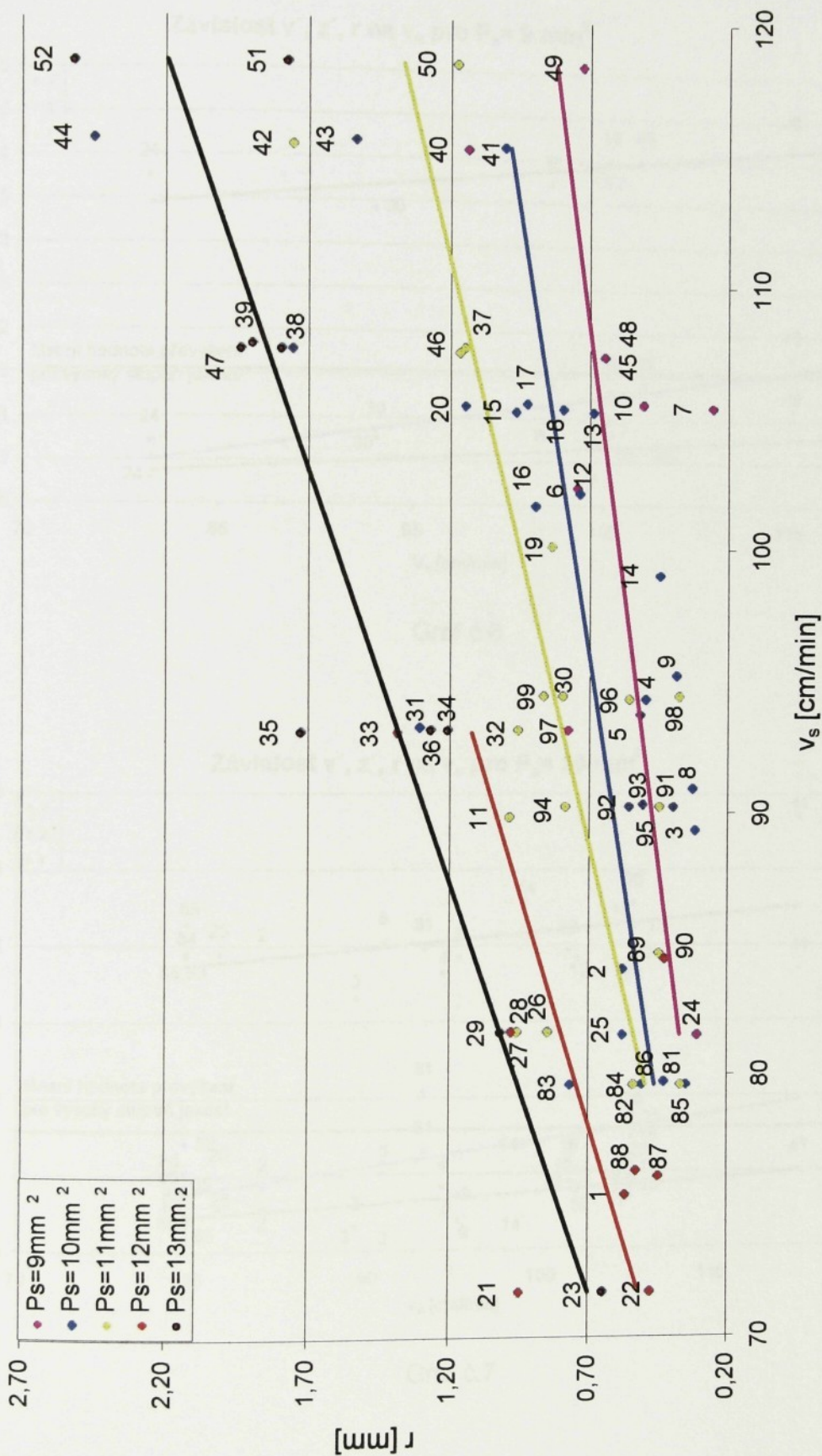
# Závislost $z'$ na $v_s$



Graf č.4



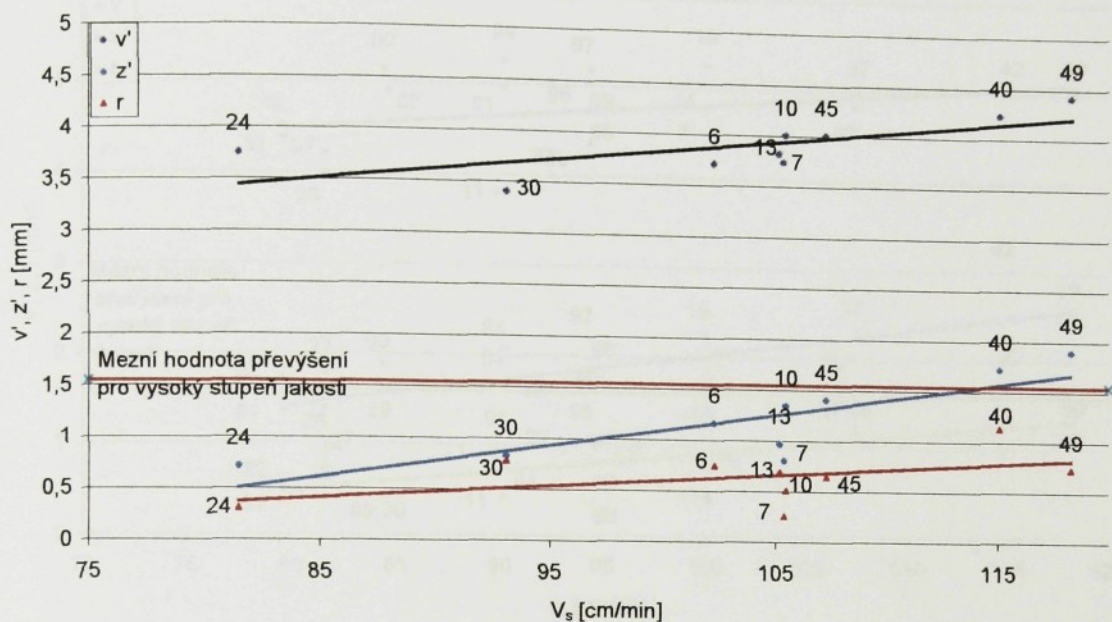
# Závislost r na $v_s$



Graf č.5

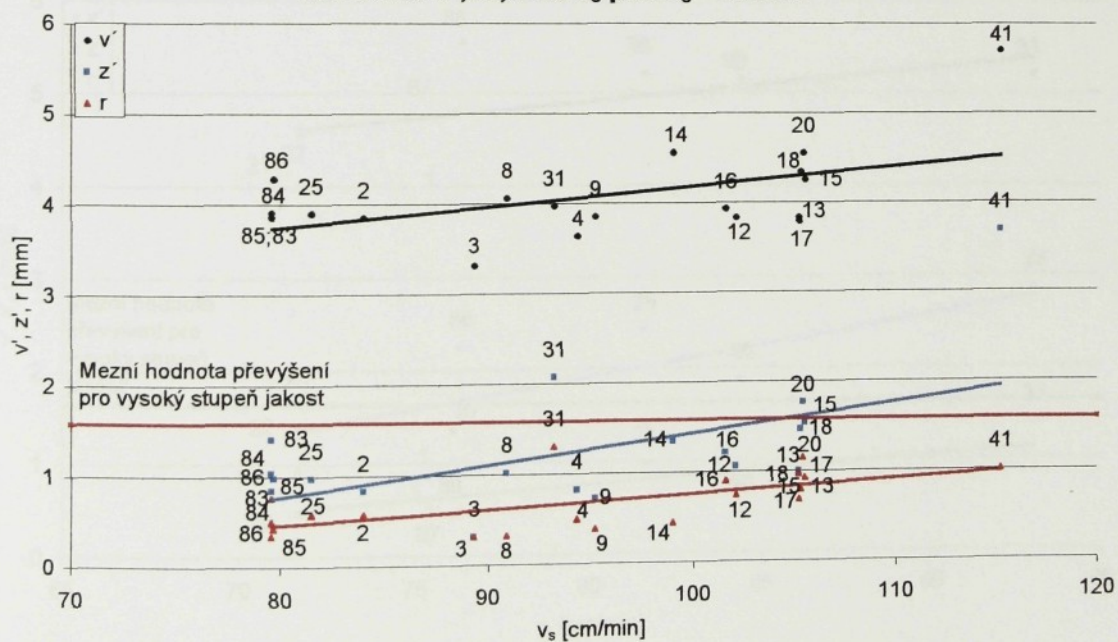


**Závislost  $v'$ ,  $z'$ ,  $r$  na  $v_s$  pro  $P_s = 9 \text{ mm}^2$**



**Graf č.6**

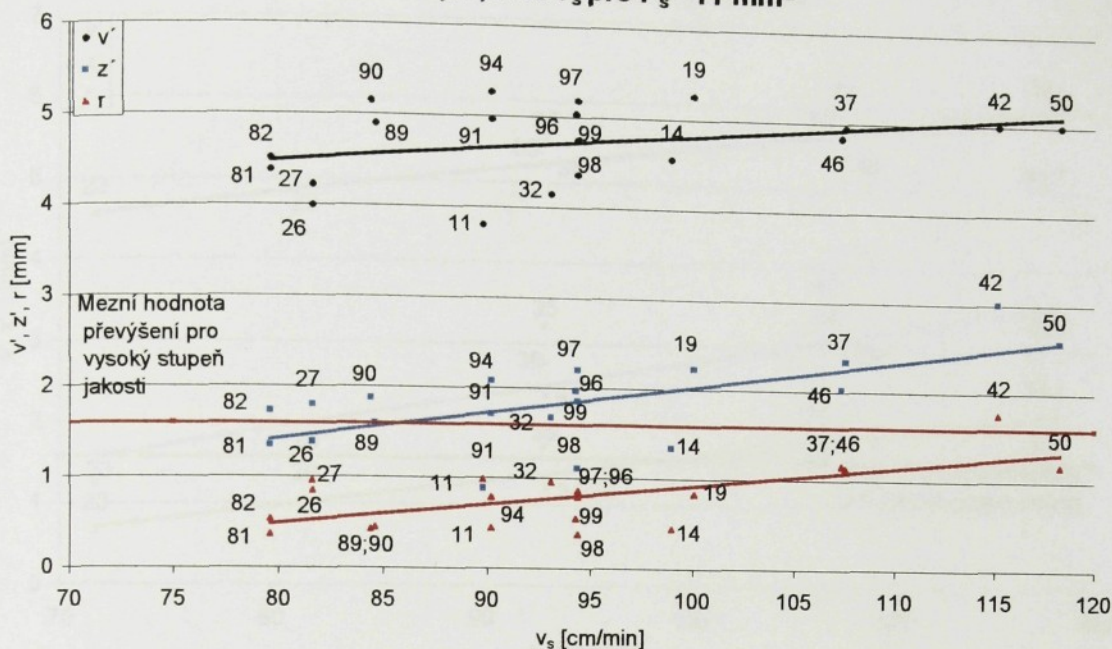
**Závislost  $v'$ ,  $z'$ ,  $r$  na  $v_s$  pro  $P_s = 10 \text{ mm}^2$**



**Graf č.7**

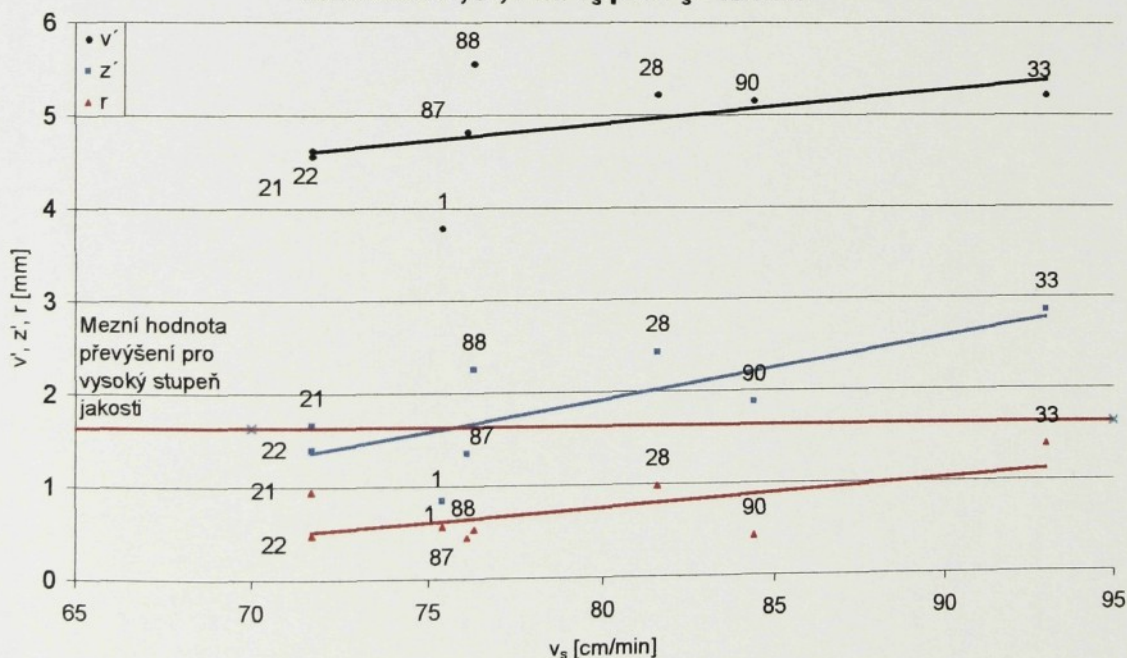


**Závislost  $v'$ ,  $z'$ ,  $r$  na  $v_s$  pro  $P_s = 11 \text{ mm}^2$**



Graf. 8

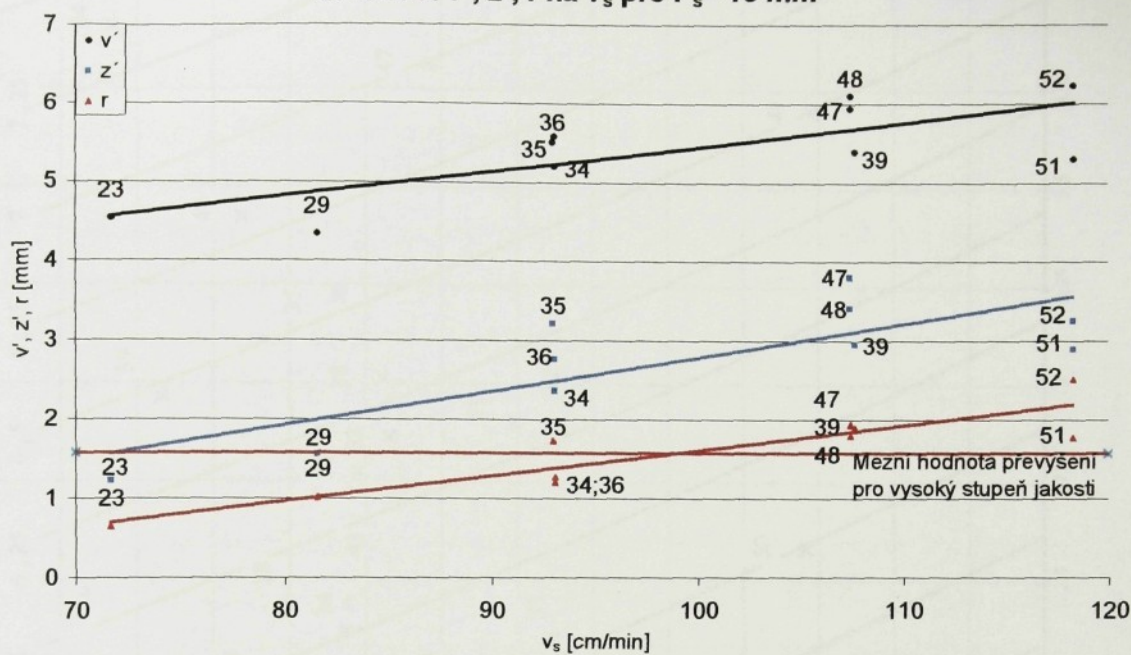
**Závislost  $v'$ ,  $z'$ ,  $r$  na  $v_s$  pro  $P_s = 12 \text{ mm}^2$**



Graf. 9

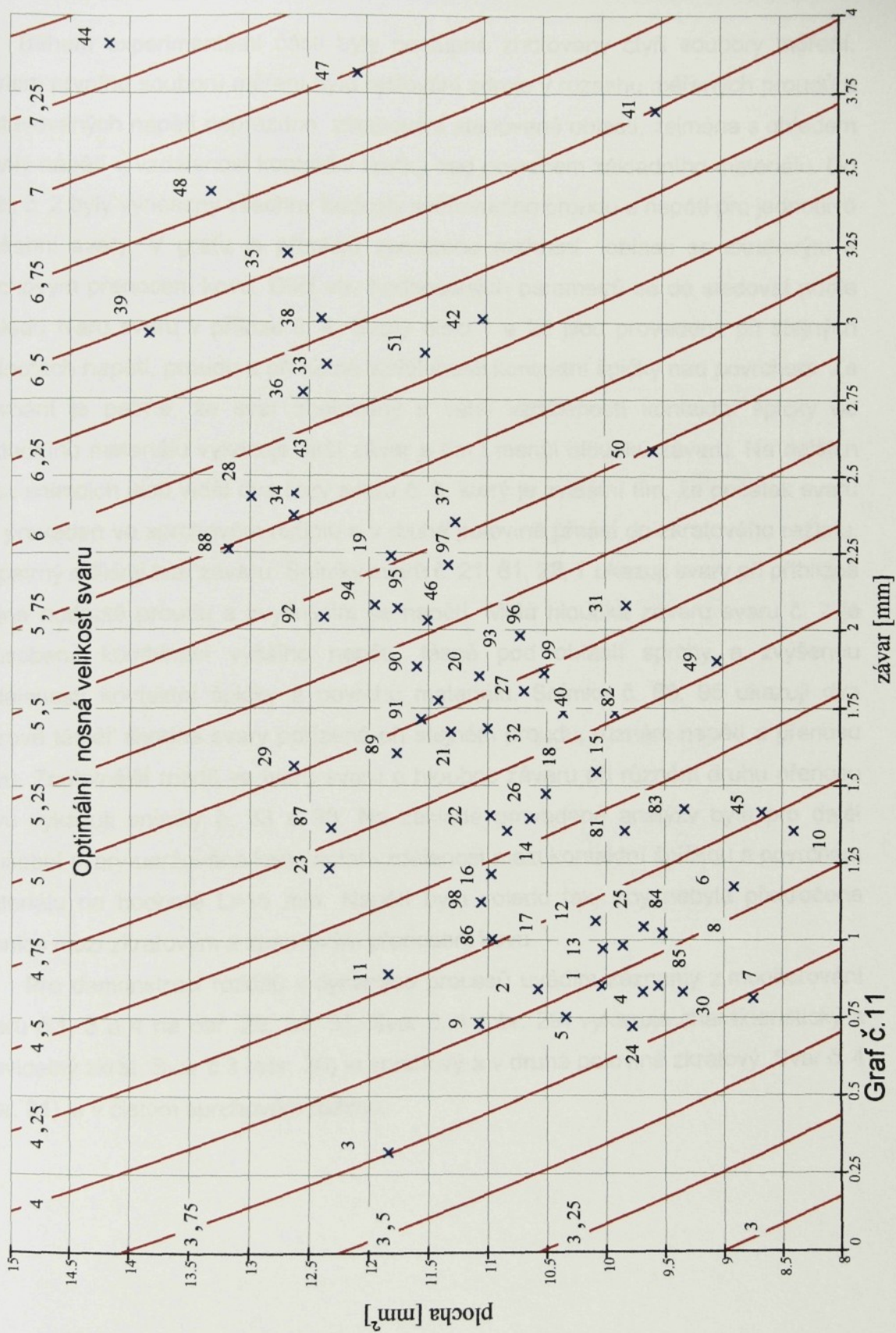


# Závislost $v'$ , $z'$ , $r$ na $v_s$ pro $P_s = 13 \text{ mm}^2$



Graf. č.10





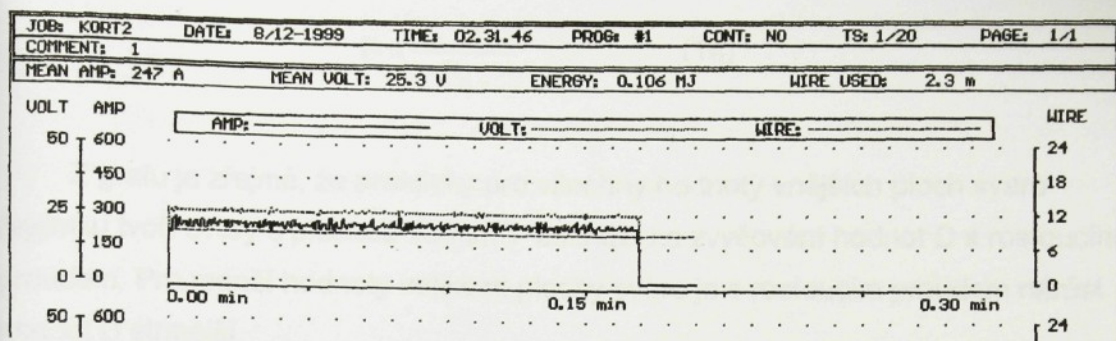


### 3.6 DISKUSE VÝSLEDKŮ

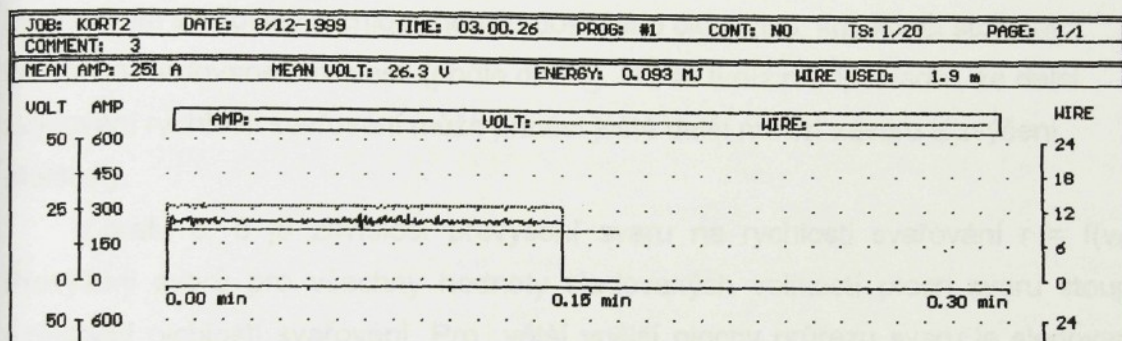
Během experimentální části byly postupně zhotoveny čtyři soubory měření. Úkolem prvního souboru měření bylo testování zdroje v rozsahu měřených proudů a nastavovaných napětí naprázdno, zmapování stanovené oblasti, zejména s ohledem na vliv napětí a vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem základního materiálu. Do grafu č. 2 byly vyneseny všechny hodnoty svařovacího proudu a napětí pro jednotlivé zkušební svary. V grafu je přímkou vymezeno rozhraní oblastí se zkratovým a sprchovým přenosem kovu. Dílčí vliv hodnocených parametrů se dá sledovat podle vzhledu tvaru svaru v příloze č. 4. Svary číslo 1 a 25 jsou provedeny při stejných hodnotách napětí, proudu a při různé vzdálenosti kontaktní špičky nad povrchem. Ze srovnání je patrné, že svar zhotovený s větší vzdáleností kontaktní špičky od základního materiálu vykazuje širší závar a tím i menší hloubku závaru. Na dalších dvou snímcích jsou vidět dva řezy svaru č. 3, který je zvláštní tím, že počátek svaru byl proveden ve sprchovém režimu a v druhé polovině přešel do zkratového režimu. Je patrný odlišný tvar závaru. Snímky svarů č. 21, 81, 22, 7 ukazují svary při přibližně stejné hodnotě proudu a zvyšujícím se napětí. Malá hloubka závaru svaru č. 7 je způsobena kombinací vyššího napětí, těsně pod oblastí sprchy a zvýšenou vzdáleností kontaktní špičky a povrchu materiálu. Snímky č. 88, 95 ukazují dva tvarově téměř shodné svary pořízené při stejném proudu, různém napětí a přenosu kovu. Znatelnější rozdíl ve tvaru svaru a hloubce závaru při různém druhu přenosu kovu vykazují snímky č. 33 a 98. Na základě provedené analýzy byla pro další zkušební svary udržována konstantní vzdálenost mezi kontaktní špičkou a povrchem materiálu na hodnotě  $L=15$  mm. Napětí bylo voleno tak, aby nebyla překročena hranice mezi zkratovým a sprchovým přenosem kovu.

Pro demonstraci rozdílů v dynamice procesů uvádím záznamy z monitorování svaru č. 1, 3 a 4 na obr. 29, 30, 31. Svar č. 1 (obr. 29) vykazuje charakteristický a pravidelný zkrat. Svar č. 3 (obr. 30) je sprchový a v druhé polovině zkratový. Svar č. 4 (obr. 31) je v čistém sprchovém režimu.

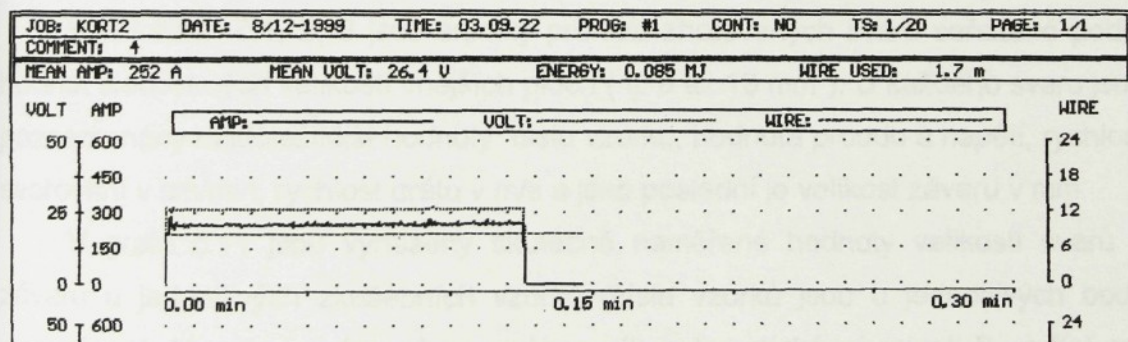




Obr.29 Zkratový režim



Obr. 30 Přechod sprchového do zkratového režimu



Obr. 31 Sprchový režim

V grafu č. 3 je vyhodnocena závislost podílu základního materiálu ve svarovém kovu spoje na velikosti svařovacího proudu (odpovídá rychlosti drátu). Podíl základního materiálu ve svarovém kovu spoje je vyjádřen vztahem (14).



$$D = \frac{P_c - P_s}{P_c} \quad (14)$$

Z grafu je zřejmé, že prakticky pro všechny hodnoty vnějších ploch svaru (výjimku tvoří svary s plochou 13 mm<sup>2</sup>) dochází ke zvyšování hodnot D s rostoucím proudem. Pro menší hodnoty velikosti plochy svaru je s rostoucím proudem nárůst hodnot D strmější.

Na grafu č. 4 je zpracována závislost maximálních hodnot závaru na rychlosti svařování  $z' = f(v_s)$ . Pro všechny sledované velikosti ploch svaru je strmost závislosti prakticky stejná. Z grafu je patrné, že pro žádnou sledovanou velikost svaru se zvyšováním svařovací rychlosti nebylo dosaženo okamžiku, kdy končí stoupající tendence sledované závislosti (podle obr. 4). Dá se tudíž předpokládat, že další zvyšování rychlosti svařování může přinést ještě další nárůst závaru a zvýšení efektivity.

V grafu č. 5 je závislost převýšení svaru na rychlosti svařování  $r = f(v_s)$ . Převýšení svarů pro všechny hodnoty sledovaných velikostí ploch svaru stoupá s rostoucí rychlostí svařování. Pro větší vnější plochy průřezu svaru je sledovaná závislost strmější. Pro jednotlivé velikosti ploch svaru jsou tyto závislosti znázorněny v grafech č. 6 až 10 s vyznačením mezní hodnoty převýšení svaru pro vysoký stupeň jakosti. Mezní hodnota převýšení byla překročena pouze u svarů s velikostí 13 mm<sup>2</sup> – graf č. 10.

V přílohách č. 1, 2, 3 jsou snímky průřezu zhotovených svarů seřazené podle hodnot sledovaných velikostí vnějších ploch (tj. 9 až 13 mm<sup>2</sup>). U každého svaru jsou poznamenány nejdůležitější hodnoty: číslo vzorku, hodnota proudu a napětí, rychlost svařování v cm/min, rychlost drátu v m/s a jako poslední je velikost závaru v mm.

V grafu č. 11 jsou vyneseny skutečně naměřené hodnoty velikosti svarů a závaru u jednotlivých zkušebních vzorků (čísla vzorků jsou u jednotlivých bodů vyznačena). V grafu je zároveň vyznačena sít' matematické závislosti  $P_s = f(z)$  pro konstantní nosné velikosti svaru  $v$  (viz. obr. 24). Porovnáním polohy jednotlivých svarů v grafu a skutečné nosné velikosti svaru (uvedena v tabulkách č. 4, 5, 6) s teoretickou hodnotou velikosti svaru pro příslušnou velikost ploch svaru můžeme posoudit efektivnost provedení svaru. Pro určitou velikost plochy svaru bude svar zhotoven s vyšší efektivitou čím větší bude dosažený závar. Z grafu č. 6 je patrné, že maximální efektivita v našem souboru měření byla dosažena u svaru č. 41, který byl



zhotoven při rychlosti svařování 115,2 cm/min, rychlosti drátu 10,9 m/min, proudu 328 A, napětí 26,6 V s plochu 9,55 mm<sup>2</sup>.

Z přehledu obrazové dokumentace k tomuto grafu (příloha č. 5 a 6) je vidět variabilnost parametrů svařování a příslušné geometrie svarů, které mají stejnou nosnou velikost. Z přehledu je zřejmé, že svar se stejnou nosnou velikostí bude zhotoven s vyšší efektivitou s rostoucí hodnotou závaru při současném poklesu velikosti vnější plochy.

Přehled je doplněn o hlavní parametry svařování. Plocha svaru  $P_s$  je v mm<sup>2</sup> a závar  $z'$  je v mm.

#### 4. ZÁVĚR

Smyslem práce bylo pro dané vstupní podmínky tj. materiál, přídavný materiál, ochranná atmosféra a proces přenosu kovu nalézt, nebo alespoň se přiblížit k optimální nosné velikosti koutového svaru s použitím dané optimalizační metody, která zároveň touto prací měla být otestována. Hlavním specifickým požadavkem vstupních podmínek bylo svařování ve zkratovém režimu v rozsahu proudů 260 – 400 A, tedy v oblasti tzv. „zrychleného zkratu“, ale za běžných podmínek aplikovaných pro svařování zkratovým procesem v synergické oblasti.

Prvním poznatkem této práce je skutečnost, že při použití daného invertorového svařovacího zdroje s velmi dobrými dynamickými vlastnostmi, kvalitního 5-ti kolečkového podavače a strojního hořáku se zkráceným bowdenem, je v dané oblasti běžný zkratový režim přenosu kovu stabilní a vykazuje přijatelnou míru rozstříku i při použití plynu Ar-CO<sub>2</sub> 82/18 (doporučený 92/8).

Dalším překvapivým poznatkem je skutečnost, že do rychlosti svařování 120 cm/min nebylo dosaženo očekávaného zlomu závislosti hloubky závaru na rychlosti svařování. V celém rozsahu námi sledovaných ploch svarů hloubka závaru s rychlostí svařování v uvedené oblasti stále stoupá.

Očekávaným poznatkem byl nepříznivý růst převýšení s rostoucí rychlostí svařování, zejména u větších ploch svarů. Pozitivní skutečností je však stále ještě prokazatelná rezerva k normou přípustné hodnotě převýšení zejména u malých ploch svarů (9 a 10 mm<sup>2</sup>) při nejvyšší dosažené rychlosti svařování.

Z posledně uvedených poznatků vyplývá závěr, že optimální hodnota efektivity koutového svaru zhotoveného za daných vstupních podmínek leží v oblasti rychlostí







## 5. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KUNCIPÁL, J., PILOUS, V., DUNOVSKÝ, J. : Nové technologie ve svařování. Praha, SNTL. 1984.
- [2] ŠÍTEK, R. : Optimalizace svařování koutových svarů metodou MAG. /Diplomová práce/. TU Liberec, 2000.
- [3] SAMEK, E., STRINKA, R.: Zváranie v ochrannej atmosfére taviacou sa elektrodou. Bratislava, ALFA 1982.
- [4] BLAŠČÍK, F. a kol.: Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvárania. Bratislava, ALFA, 1988.
- [5] KADLEC, V., ŤOPEK, V.,: Svařování v ochranných atmosférách. Pardubice, ČSVTS, 1989.
- [6] TMĚJ, J., NEUMANN, H., JENŠÍ, S.: Teorie svařování. TU Liberec, 1990.
- [7] Propagační materiál firmy AGA
- [8] Propagační materiály firmy Linde
- [9] KUNCIPÁL, J. a kol.: Teorie svařování. Praha, SNTL, 1986
- [10] HUDEC, Z.: Efektivita obloukového svařování. Sborník přednášek Zváranie 98. Bratislava, 1998.
- [11] WELDING JOURNAL 2001



## 6. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 ÷3 Svary řazené podle ploch

Příloha č. 4 Porovnávací album

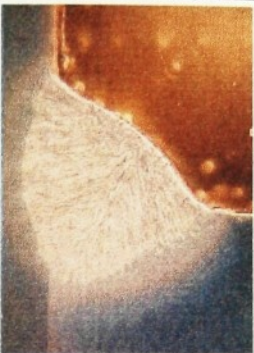
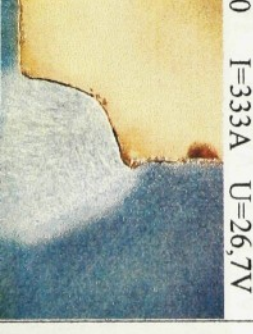
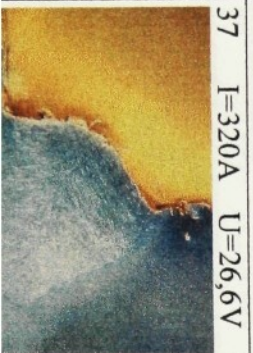
Příloha č.5 ÷ 6 Album efektivity



| PLOCHA SVARU-Ps [mm <sup>2</sup> ]                                                                                                         |                                                                                                                                             |                                                                                                                                              |                                                                                                                                              |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 10                                                                                                                                         | 10                                                                                                                                          | 9                                                                                                                                            |                                                                                                                                              |  |
| <p>10 I=272A U=26,4V</p>  <p>Vs=105,5 Vd=8,8 z'=1,35</p> | <p>45 I=288A U=25,3V</p>  <p>Vs=107,4 Vd=8,7 z'=1,41</p> | <p>40 I=297A U=25,8V</p>  <p>Vs=115,1 Vd=9,8 z'=1,73</p> | <p>49 I=285A U=26,1V</p>  <p>Vs=118,3 Vd=9,8 z'=1,9</p>  |  |
| <p>86 I=265A U=24,2V</p>  <p>Vs=79,7 Vd=7,8 z'=1,35</p>   | <p>85 I=250A U=23,9V</p>  <p>Vs=79,6 Vd=7,6 z'=0,85</p>   | <p>25 I=252A U=25,6V</p>  <p>Vs=81,5 Vd=8,7 z'=0,98</p>   | <p>8 I=273A U=26,2V</p>  <p>Vs=90,9 Vd=8,8 z'=1,02</p>    |  |
| <p>9 I=274A U=26,4V</p>  <p>Vs=95,2 Vd=8,8 z'=0,73</p>    | <p>14 I=296A U=26,3V</p>  <p>Vs=99 Vd=9,6 z'=1,35</p>     | <p>18 I=296A U=26,4V</p>  <p>Vs=105,3 Vd=10 z'=1,47</p>   | <p>41 I=328A U=26,6V</p>  <p>Vs=115,2 Vd=10,9 z'=3,69</p> |  |



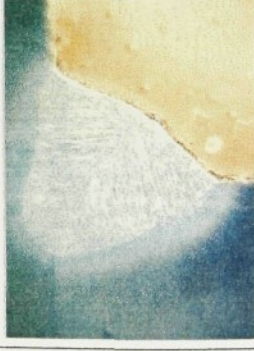
PLOCHA SVARU-Ps [mm<sup>2</sup>]

|    |    |                |                                                                                     |                          |
|----|----|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 11 | 81 | I=266A U=24,8V |    | Vs=79,6 Vd=8 z'=0,85     |
|    | 82 | I=277A U=26,4V |   | Vs=79,6 Vd=8 z'=1,73     |
|    | 89 | I=282A U=25,5V |  | Vs=84,6 Vd=8,8 z'=1,6    |
|    | 90 | I=290A U=25,5V |  | Vs=84,4 Vd=9,2 z'=1,88   |
| 11 | 94 | I=300A U=26,4V |    | Vs=90,2 Vd=9,5 z'=2,08   |
|    | 91 | I=292A U=25,5V |   | Vs=90,2 Vd=9,5 z'=1,71   |
| 12 | 42 | I=348A U=27V   |    | Vs=94,4 Vd=9,8 z'=2,21   |
|    | 50 | I=333A U=26,7V |    | Vs=100,1 Vd=10,4 z'=2,24 |
|    | 37 | I=320A U=26,6V |      |                          |
|    | 36 | I=327A U=27,1V |     |                          |





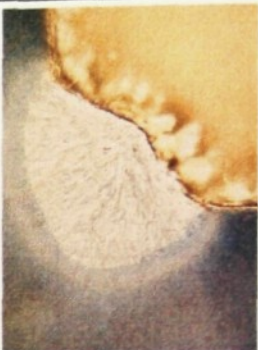
PLOCHA SVARU-Ps [mm<sup>2</sup>]

|    |    |                                           |                                                                                     |
|----|----|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 | 22 | I=260A U=25,2V<br>Vs=71,7 Vd=8,2 z'=1,40  |    |
| 87 | 87 | I=280A U=25,2V<br>Vs=76,1 Vd=8,4 z'=1,36  |   |
| 88 | 88 | I=297A U=25,4V<br>Vs=76,3 Vd=8,8 z'=2,26  |  |
| 33 | 33 | I=312A U=26V<br>Vs=93 Vd=10,4 z'=2,86     |  |
| 13 | 23 | I=273A U=25,3V<br>Vs=71,7 Vd=8,9 z'=1,23  |    |
| 29 | 29 | I=297A U=26V<br>Vs=81,6 Vd=10 z'=1,56     |   |
| 34 | 34 | I=325A U=26,2V<br>Vs=93,1 Vd=11,3 z'=2,37 |  |
| 36 | 36 | I=327A U=27,1V<br>Vs=93,1 Vd=11,3 z'=2,77 |  |
| 13 | 39 | I=355A U=27,2V<br>Vs=71,7 Vd=8,9 z'=1,23  |      |
| 47 | 47 | I=351A U=27,2V<br>Vs=81,6 Vd=10 z'=1,56   |     |
| 48 | 48 | I=357A U=27,7V<br>Vs=93,1 Vd=11,3 z'=2,37 |    |
| 51 | 51 | I=377A U=27,5V<br>Vs=93,1 Vd=11,3 z'=2,77 |    |



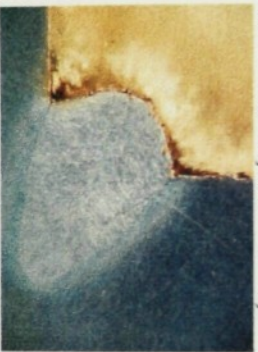


Kombinace vlivu vzdálenosti špičky nad povrchem  $L$  [mm], napětí  $U$  [V]  
a druhu přenosu kovů

|    |                                                                                      |                                                                                      |                                                     |                                                                                     |                                           |                           |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|
| 1  | $I=251A$ $U=25,4V$                                                                   |    | $L=21$ mm $z'=0,85$<br>21 $I=267A$ $U=23,9V$        |    | $L=15$ $z'=1,67$<br>88 $I=297A$ $U=25,4V$ | $L=15$ zkrat $z'=2,26$    |
| 25 | $I=252A$ $U=25,6V$                                                                   |   | $L=15$ mm $z'=0,98$<br>81 $I=266A$ $U=24,8V$        |   | $L=15$ $z'=1,35$<br>95 $I=302A$ $U=26,8V$ | $L=15$ (sprcha) $z'=2,07$ |
| 3  | $I=253A$ $U=26,4V$                                                                   |  | $L=21$ mm sprcha $z'=0,27$<br>22 $I=260A$ $U=25,2V$ |  | $L=15$ $z'=1,4$<br>33 $I=312A$ $U=26V$    | $L=15$ zkrat $z'=2,65$    |
| 3  |  | zkrat                                                                                | 7 $I=264A$ $U=26,3V$                                |  | $L=18$ $z'=0,81$<br>98 $I=310A$ $U=26,8V$ | $L=15$ sprcha $z'=1,12$   |



# Nosné velikosti koutového svaru – $v'$ [mm]

| $v'=5,5$ |                                                                                                            | $v'=5,25$ |                                                                                                           | $v'=4,5$ |                                                                                                          |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 39       | Ps=13,84 $z'=2,96$<br>   | 88        | Ps=13,18 $z'=2,26$<br>   | 23       | Ps=12,34 $z'=1,23$<br>  |
|          | Vs=107,7cm/min    I=355A                                                                                   |           | Vs=76,3cm/min    I=297A                                                                                   |          | Vs=71,7cm/min    I=273A                                                                                  |
| 47       | Ps=12,05 $z'=3,81$<br>  | 34        | Ps=12,63 $z'=2,37$<br>  | 22       | Ps=10,98 $z'=1,40$<br> |
|          | Vs=107,5cm/min    I=351A                                                                                   |           | Vs=93,1cm/min    I=325A                                                                                   |          | Vs=71,7cm/min    I=260A                                                                                  |
| 35       | Ps=12,68 $z'=3,22$<br> | 19        | Ps=11,81 $z'=2,24$<br> | 82       | Ps=9,92 $z'=1,73$<br> |
|          | Vs=93,0cm/min    I=329A                                                                                    |           | Vs=100,1cm/min    I=308A                                                                                  |          | Vs=79,6cm/min    I=277A                                                                                  |
| 41       | Ps=9,55 $z'=3,69$<br>  | 50        | Ps=9,59 $z'=2,58$<br>  | 49       | Ps=9,05 $z'=1,90$<br> |
|          | Vs=115,2cm/min    I=328A                                                                                   |           | Vs=118,3cm/min    I=333A                                                                                  |          | Vs=118,3cm/min    I=285A                                                                                 |



Nosná velikost koutového svaru –  $v'$  [mm]

| $V'=4,0$ |                    | $V'=3,7$                                                                             |                                                    |
|----------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 86       | Ps=11,12 $z'=0,99$ |    | 3    Ps=9,45 $z'=0,32$<br>Vs=89,3cm/min    I=253A  |
| 84       | Ps=9,68 $z'=1,04$  |   | 5    Ps=10,34 $z'=0,75$<br>Vs=93,7cm/min    I=266A |
| 6        | Ps=8,91 $z'=1,17$  |  | 85    Ps=9,56 $z'=0,85$<br>Vs=79,6cm/min    I=250A |
| 45       | Ps=8,67 $z'=1,41$  |  | 7    Ps=8,75 $z'=0,81$<br>Vs=105,4cm/min    I=264A |



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a §35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce 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 mohou jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do její skutečné výše).

Datum: 25.5. 2001

Podpis: 