



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV PARAMETRŮ SVAŘOVÁNÍ (U, I) NA PŘENOS KOVU PŘI MIG/MAG SVAŘOVÁNÍ OCELI

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS (U,I) ON METAL TRANSFER DURING MIG/MAG
WELDING OF STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETER LEŽOVIČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Peter Ležovič

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv parametrů svařování (U, I) na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli

v anglickém jazyce:

Influence of welding parameters (U,I) on metal transver during MIG/MAG welding of steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velikost napětí a proudu významně ovlivňuje chování kovu elektrody v průběhu jejího tavení a přenosu obloukem do svarového kovu spoje. Ovlivňuje vzhled, geometrii a kvalitu svaru.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor sil působících na kapku roztaveného kovu v elektrickém oblouku.

Základní typy přenosu kovu.

Závislosti přenosu na svařovacích parametrech.

Profil svarové housenky a rozstřík.

Seznam odborné literatury:

- 1.AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
- 2.ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov. Bratislava. ETERNA PRESS 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5
- 3.ESSAB, FRONIUS, KEMPPI, firemní materiály
- 4.ASM Handbook. Welding,Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM,2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
- 5.KŘÍŽ, R. a P. VÁVRA. Strojírenská příručka. Praha: SCIENTIA. 1998. Svazek 8. 251 s. ISBN 80-7183-054-2
- 6.MESSLER, R. W. Jr..Principless of Welding. New York, USA. 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
7. LINDE, MESSER, firemní materiály

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 15.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Zaoberal som sa metódou zvarovania elektrickým oblúkom taviacou sa elektródou v ochrannej atmosfére plynu inertného alebo aktívneho (MIG/MAG). Po charakteristike samotného procesu zvarovania MIG/MAG sú rozobraté sily pôsobiace na kvapku kovu. Ďalej nasleduje rozdelenie typov prenosu kovu, súhrn faktorov ovplyvňujúcich tvar húsenice a rozstrek. V poslednej časti sú popísané výsledky experimentálneho overenia zistených faktov.

Kľúčové slová

GMAW, MIG, MAG, prenos kovu, zvarovanie, zvarací prúd, zvaracie napätie, kvapka kovu, zvarová húsenica

ABSTRACT

I was concerned about gas metal arc welding in atmosphere of inert or active gas. After basic characteristics of MIG/MAG welding process, forces affecting drop of metal are described. Then types of metal transition and summary of factors affecting shape and size of welding joint are explained. Last chapter describes results of experimental test and compares them to theoretical results expected.

Keywords

GMAW, MIG, MAG, metal transfer, welding, welding current, welding voltage, metal drop, welding joint

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

LEŽOVIČ, P. *Vliv parametrů svařování (U,I) na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 29 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že predkladanú bakalársku prácu na tému *Vliv parametrů svařování (U, I) na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli* som vypracoval samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry a prameňov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

Dátum

.....

Meno a priezvisko bakalára

POĎAKOVANIE

Ďakujem doc. Ing. Ladislavovi Daněkovi, CSc. za odborné konzultácie, motivujúci prístup, rady, pripomienky a poskytnutie odborného materiálu pre vypracovanie bakalárskej práce.

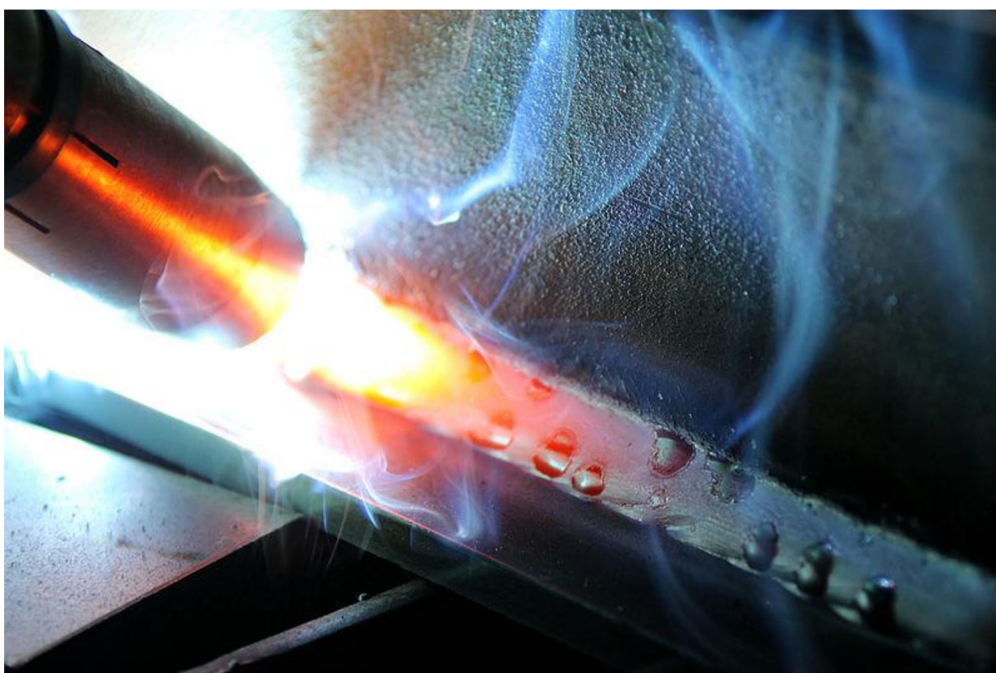
OBSAH

Abstrakt.....	3
Bibliografická citácia	4
Čestné prehlásenie.....	5
Poďakovanie.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1. Charakteristika procesu GMAW [2,3].....	10
1.1 Popis zariadenia pre zváranie MIG/MAG [5]	11
1.2 Zváranie typu MIG	12
1.3 Zváranie typu MAG.....	12
2. Rozbor síl pôsobiacich na kvapku roztaveného kovu v elektrickom oblúku [2,7].....	12
2.1 Gravitačná sila	12
2.2 Sila spôsobená tlakom prúdiaceho ochranného plynu.....	13
2.3 Elektromagnetická sila	13
2.4 Sila spôsobená vyparovaním kvapky	14
2.5 Sila povrchového napätia.....	15
3. Základné typy prenosu kovu.....	15
3.1 Prenos kovu voľným letom kvapky	16
3.1.1 Kvapkový prenos kovu.....	16
3.1.2 Sprchový prenos kovu	17
3.1.3 Impulzný prenos kovu	17
3.1.4 Moderovaný sprchový prenos	18
3.1.5 Dlhý oblúk s rotujúcim prenosom kovu	18
3.2.1 Skratový prenos.....	18
3.2.2 Zrýchlený skratový prenos	19
4. Závislosti prenosu na zváracích parametroch [4]	19
5. Profil zvarovej húsenice a rozstrek	20
5.1 Zvárací prúd a priemer drôtu	20
5.3 Prúdová hustota	21
5.2 Napätie na oblúku	21
5.3 Vyloženie elektródy	22
5.4 Druh ochranného plynu	22
5.5 Prietokové množstvo plynu	23
5.6 Rýchlosť zvárania.....	23
6. Experimentálne overenie poznatkov	24
Záver.....	28
Zoznam použitých zdrojov	29
Zoznam použitých symbolov a skratiek.....	30

ÚVOD

GMAW (gas metal arc welding), teda zváranie oblúkom pod ochranným plynom v podobe blízkej dnešnej technológii, môžeme sledovať už v tridsiatych rokoch minulého storočia. Patent z roku 1924 popisuje zváranie typu MIG systémom, aký poznáme aj dnes [1]. Pri použití oxidu uhličitého boli však výsledkom krehké zvary, pravdepodobne kvôli nevhodným podmienkam, ako napríklad nevhodná charakteristika zdroja energie. Dnes má zváranie oblúkom najväčšie zastúpenie medzi metódami zvárania kvôli výhodám, ktoré v technologickej praxi ponúka. Zváranie oblúkom je dostupné pri pomerne nízkych vstupných nákladoch, pričom zvary dosahujú vysokej kvality. Široké možnosti automatizácie a robotizácie robia zo zvárania oblúkom proces vhodný pre širokú paletu priemyselného zamerania a objemov produkcie.

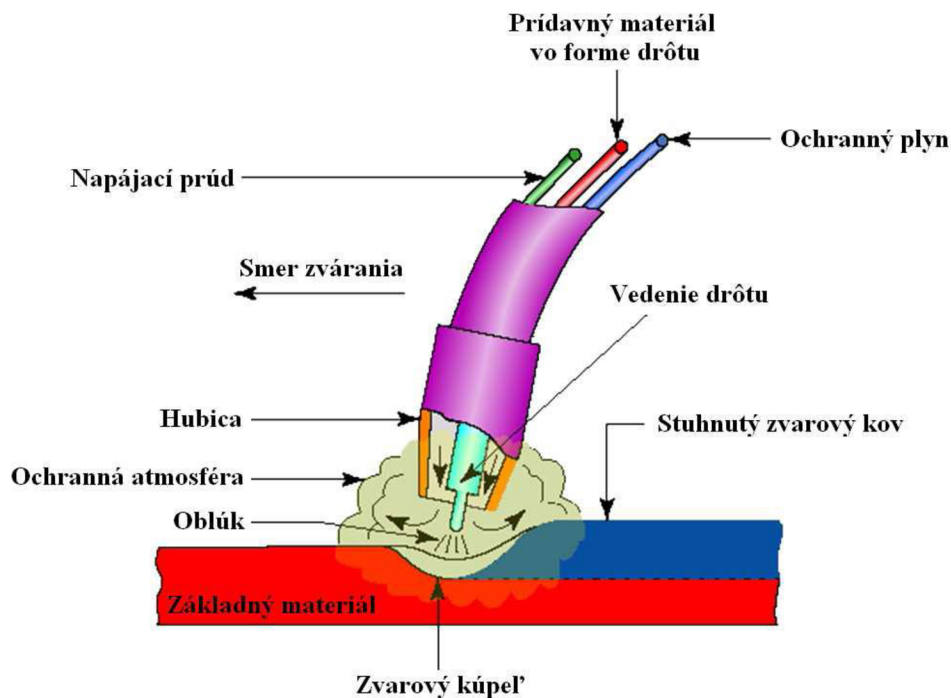
V tejto bakalárskej práci sa budem zaoberať vplyvom zmien napätia a elektrického prúdu na zváranie metódami MIG a MAG, silami pôsobiacimi na kvapku roztaveného kovu v elektrickom oblúku a spôsobmi prenosu kvapky z elektródy do zvarového kúpeľa cez oblúk.



Obr. 1 Oblúkové zváranie v ochrannej atmosfére plynu taviacou sa elektródou [3].

1. CHARAKTERISTIKA PROCESU GMAW [2,3]

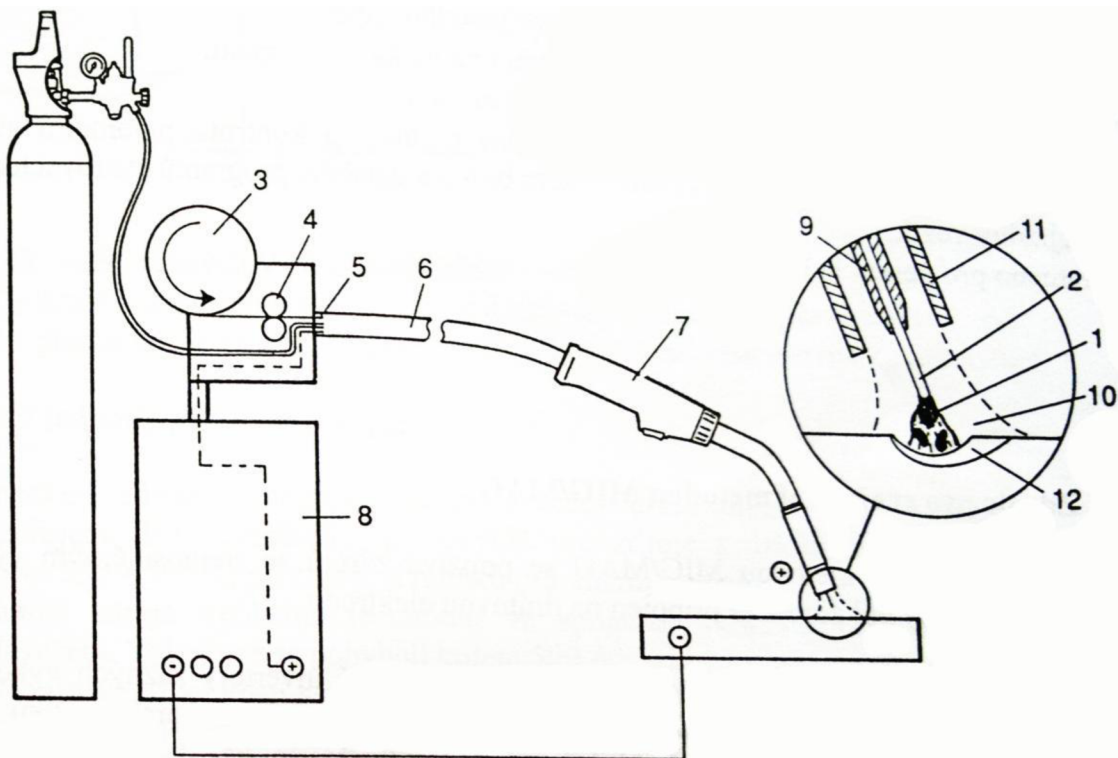
Oblúkové zváranie pod ochranným plynom prebieha horením elektrického oblúka medzi základným materiálom a prídavným materiálom, ktorým je tavná elektróda (Obr. 2). Tá je podávaná odvíjaním z cievky obvykle o hmotnosti 15 kg. Materiál tavnej elektródy je volený podľa zváraného materiálu, drôt môže byť plný alebo dutý s práškovou výplňou. Oblasť zvárania je prúdiacim ochranným plynom, podávaným z tlakových fľaš, chránená proti nečistotám z okolitého vzduchu. Ochranný plyn je volený podľa zváraného materiálu a tiež na základe požadovaných teplotných pomerov, prenose kvapky kovu, rozstreku a rozsahu prebiehajúcich chemických reakcií v oblúku.



Obr. 2 Princíp zvárania MIG/MAG [4].

Teplo vznikajúce vplyvom vysokého elektrického prúdu a odporu taví elektródu a časť základného materiálu, ktorých čiastočným zmiešaním a stuhnutím vzniká zvar. Podľa druhu ochranného plynu rozdeľujeme oblúkové zváranie na typy MIG a MAG. Medzi výhody oblúkového zvárania pod ochranným plynom patrí poloautomatický proces podávania prídavného drôtu, možnosť vysokej úrovne automatizácie procesu a veľký výber prídavných materiálov a ochranných plynov. Vďaka ochrannému plynu nie je nutné odstraňovanie trosky z vyhotoveného zvaru, pri použití vysokých prúdov a napätí po dlhšiu dobu však treba chladíť zvariaciu hubicu.

1.1 Popis zariadenia pre zváranie MIG/MAG [5]



Obr. 3 Schéma zvaracieho zariadenia MIG/MAG pre ručné zváranie [5].

Na Obr. 3 je znázornené prepojenie jednotlivých častí zvaracieho zariadenia v prevedení pre poloautomatické zváranie. Vedenie hubice (11) je ručné, drôt je podávaný automaticky podávacím kladkovým mechanizmom (4). Odvíja sa z cievky (3) a do hubice je vedený horákovým káblom (6), uchyteným pomocou rýchchloupínacieho mechanizmu (5) k mechanizmu odvíjaciemu. V horákovom kábli je do zvaracej hubice zároveň vedený prívod ochranného plynu (10) z tlakovej fľaše a vodič, zabezpečujúci prívod elektrického prúdu z elektrického zdroja (8) do hubice. Po stlačení tlačidla na zvaracom horáku (7) sa spustí odvin drôtu a prívod prúdu a ochranného plynu do hubice, kde sa prúd pomocou kontaktnej zvaracej špičky (9) prenáša na drôt. Dôjde k vytvoreniu oblúka (1) medzi základným materiálom a elektródou (2) a vytvára sa zvarový kúpeľ (12). Reguláciu napätia a prúdu zabezpečuje zvarací zdroj. Umožňuje tak meniť kvalitatívne vlastnosti zvaru. Modernejšie zvaracie zariadenia disponujú diaľkovým ovládaním, ktoré uľahčuje a zefektívňuje prácu zvarača. Pre zváranie MIG/MAG je obvykle používaný jednosmerný prúd a zapojenie s nepriamou polaritou. Pri zapojení s nepriamou polaritou je na elektróde zapojený kladný pól zvaracieho zdroja a základný materiál na záporný pól. Spôsobuje hlbší závar, malé prevýšenie a širšiu húsenicu. Zapojenie s priamou polaritou, kedy je na elektróde záporný pól a na základnom materiáli kladný pól, má nižší prienik do základného materiálu, teda menší závar. Šírka húsenice a návar sa oproti zapojeniu s nepriamou polaritou zväčšujú.

1.2 Zváranie typu MIG

MIG je skratka pre metal inert gas. To znamená, že horiaci oblúk bude chránený inertným plynom, ktorý nereaguje s okolím. Používanými inertnými plynmi je argón (Ar), hélium (He), alebo zmesi týchto dvoch plynov v rôznych koncentráciách. Základným materiálom je často titán, zliatiny hliníka, medi, alebo cínu.

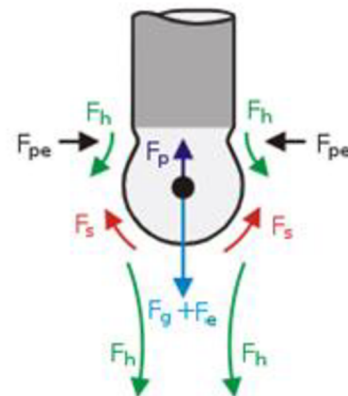
1.3 Zváranie typu MAG

Skratka MAG (metal active gas) označuje oblúkové zváranie taviacou sa elektródou v ochrannej atmosfére aktívneho plynu s oxidačnými účinkami. Najčastejšie používaným aktívnym plynom je oxid uhličitý (CO₂) samostatne, alebo v zmesi s kyslíkom (O₂). Argón ako inertný plyn oxidačné účinky CO₂ a O₂ znižuje, preto sa dá použiť na reguláciu, zmiernenie oxidačných účinkov. Metóda je rozšírená aj vďaka ľahkej dostupnosti a predovšetkým cene oxidu uhličitého, ktorý je lacnejší ako inertné plyny.

Zváranie MAG sa používa na ocele feritické, uhlíkové a ocele rôzneho rozsahu legovania (vysokolegované, nízkolegované, nelegované).

2. ROZBOR SÍL PÔSOBIACICH NA KVAPKU ROZTAVENÉHO KOVU V ELEKTRICKOM OBLÚKU [2,7]

Pri zváraní MIG/MAG na kvapku odtavovaného kovu pôsobia sily (Obr. 4), ktorých smer a veľkosť sú dané zväracími parametrami. Medzi sily spôsobujúce odtrhnutie kvapky od elektródy patrí gravitačná sila F_g , sila F_h spôsobovaná tlakom plynu a podľa vlastností oblúka aj axiálna silová zložka elektromagnetického poľa F_e . Sila F_{pe} sa ako radiálna zložka elektromagnetického poľa podieľa na zužovaní krčka a oddeľovaní kvapky od elektródy. Sily pôsobiace opačným smerom vznikajú pôsobením prúdu pár F_p a povrchového napätia F_s .



Statická rovnováha síl v momente odtrhnutia kvapky od elektródy je popísaná rovnicou:

$$F_g + F_h + F_e = F_p + F_s \quad (2.1)$$

Obr. 4 Sily pôsobiace na kvapku kovu [7].

2.1 Gravitačná sila

Gravitačná sila má na kvapku kovu dôležitejší vplyv pri zváraní v polohách a pri zváraní nízkym prúdom, keď sú elektromagnetické sily oblúka nízke. Gravitačnú silu pôsobiacu na kvapku vypočítame podľa:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g \quad (2.2)$$

kde: F_g [N] - gravitačná sila
 R [mm] - polomer kvapky
 g [m.s⁻²] - gravitačné zrýchlenie, konštanta
 ρ [kg.m⁻³] - hustota kvapky

2.2 Sila spôsobená tlakom prúdiaceho ochranného plynu

Prúdiaci ochranný plyn pôsobí na kvapku kovu silou, ktorej veľkosť závisí na rýchlosti prúdenia plynu, zloženia plynu a veľkosti kvapky.

$$F_h = 0,5 \pi v^2 \rho r_d^2 C_d \quad (2.3)$$

kde: F_h [N] - sila spôsobená tlakom plynu
 v [m.s⁻¹] - rýchlosť prúdenia plynu
 ρ [kg.m⁻³] - hustota plynu
 r_d [m] - polomer kvapky
 C_d [-] - koeficient zohľadňujúci prúdenie plynu, ako funkcia Reynoldsovho čísla
 $Re = 2 r_d \rho v / \eta$ - Reynoldsovo číslo
 η [N.s.m⁻²] - viskozita

2.3 Elektromagnetická sila

Elektromagnetická sila má na prenos kvapky kovu najväčší vplyv. Je účinkom elektromagnetického poľa, ktoré vzniká pri prechode elektrického prúdu elektródou. V mieste natavenia elektródy, teda v mieste vzniku kvapky, spôsobuje vzniknuté magnetické pole tlak kolmý na os elektródy a prispieva k oddeleniu kvapky. Tento jav sa nazýva pinch-efekt. Veľkosť pôsobiaceho tlaku je:

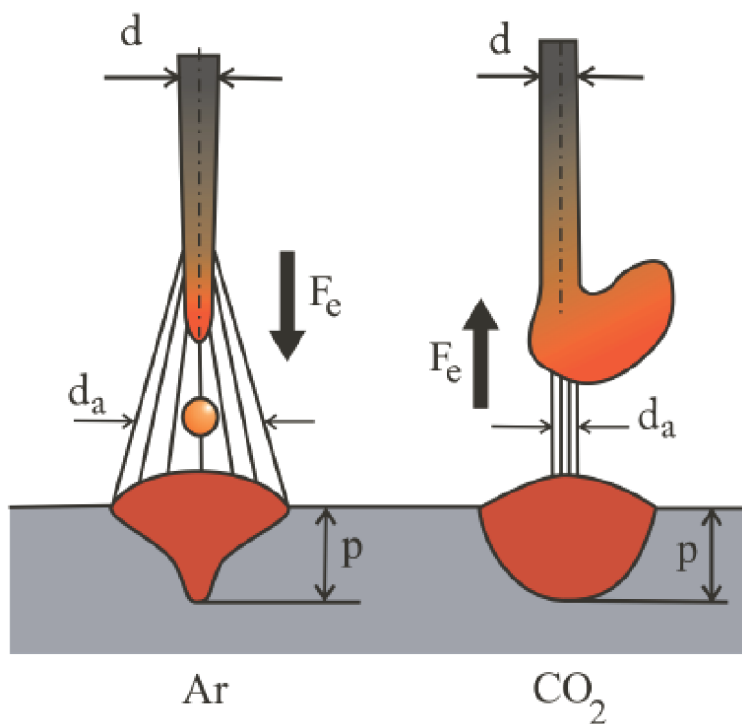
$$p = \frac{I^2(x^2 - r)}{100 \pi x^4} \quad (2.4)$$

kde: p [dyn.cm⁻²] - veľkosť tlaku
 I [A] - prúd
 x [m] - vzdialenosť od vodiča
 r [m] - polomer vodiča

Radiálnou zložkou síl vzniknutých v elektromagnetickom poli je sila F_e . Môže pôsobiť smerom od elektródy, alebo k elektróde, v závislosti na pomere priemeru elektródy d k priemeru zvarového oblúka d_a (Obr. 5). Veľkosť sily F_e závisí od veľkosti prúdu a permeability podľa vzťahu:

$$F_e = \frac{\mu I^2}{4 \pi} \ln \frac{d_a}{d} \quad (2.5)$$

kde: F_e [N] - elektromagnetická sila
 μ [N.A⁻²] - permeabilita vákua
 I [A] - prúd
 d_a [mm] - priemer oblúkového stĺpca
 d [mm] - priemer elektródy



Obr. 5 Vplyv priemeru oblúkového stĺpca na elektromagnetickú silu F_e .
 d_a - priemer oblúkového stĺpca, d - priemer elektródy, p - hĺbka prievaru [4].

Priemer oblúkového stĺpca sa môže meniť v závislosti na použitom ochrannom plyne. Napríklad pri zvaraní v ochrane prúdu CO_2 sa priemer oblúkového stĺpca zužuje, kvôli vysokej tepelnej vodivosti plynu. Následkom toho je sila F_e pôsobiaca proti smeru odtrhnutia kvapky. Tak dochádza k odstrkovaciemu prenosu kovu a jeho nepravidelnému prenosu cez oblúk. Zvaraním v ochrane zmesí bohatých na argón sa naopak oblúkový stĺpec voči priemeru elektródy rozširuje. Elektromagnetická sila pôsobí v smere odtrhania kvapky, umožňuje napríklad sprchový prenos a prehĺbuje prievary v základnom materiáli.

2.4 Sila spôsobená vyparovaním kvapky

Sila spôsobená vyparovaním kovu z kvapky F_p do prúdu plazmy oblúka pôsobí proti oddeleniu kvapky. Pokiaľ však nie sú použité vysoké elektrické prúdy, jej veľkosť nie je významná. Dá sa približne stanoviť podľa vzťahu:

$$F_p = \frac{m'}{\rho_p} I \quad (2.6)$$

kde: F_p [N] - sila vyvolaná tlakom kovových pár
 m' [kg] - celková hmotnosť výparu za sekundu na ampér
 ρ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] - hustota výparu
 I [A] - zvarací prúd

2.5 Sila povrchového napätia

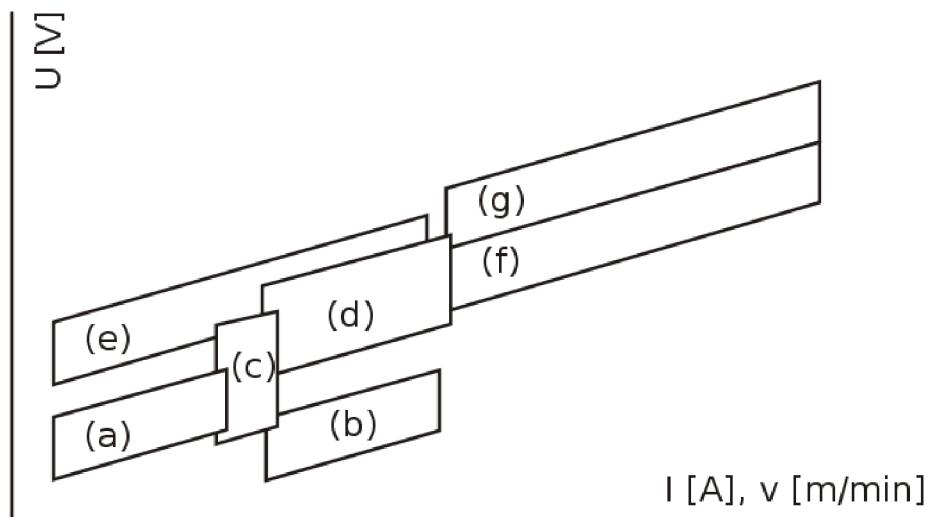
Zohráva významnú úlohu v správaní kvapky kovu v oblúku po odtrhnutí od elektródy. Vzniká dôsledkom gradientu teplôt a povrchových napätí na tekutom povrchu kvapky. Je závislá na mnohých premenných, vyjadriť sa dá empirickým vzťahom:

$$F_s = \frac{m \cdot g}{f(r/a)} \quad (2.7)$$

kde F_s [N] - sila povrchového napätia
 m [kg] - hmotnosť kvapky
 g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] - gravitačná konštanta
 r [m] - polomer elektródy
 a - kapilárna konštanta $a = (2\gamma/\rho_m g)^{1/2}$
 ρ_m [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] - hustota tekutej kvapky
 $f(r/a)$ je funkcia polomeru elektródy a kapilárnej konštanty
 $f(r/a) = 1 - 0,4(r/a)$

3. ZÁKLADNÉ TYPY PRENOSU KOVU

V závislosti na zvaracích podmienkach sa prídavný materiál môže v oblasti oblúka šíriť rôznymi spôsobmi, ktoré sa odlišujú veľkosťou, tvarom a frekvenciou prenosu kvapiek do zvarového kúpeľa. Typ prenosu kovu závisí na dodávanom ochrannom plyne, napätí, prúde, výslednom tepelnom príkone.



Obr. 6 Spôsob prenosu kvapky kovu elektrickým oblúkom v závislosti na prúde, rýchlosti podávania drôtu a napätí. (a) skratový prenos, (b) zrýchlený skratový prenos, (c) kvapkový prenos, (d) sprchový prenos, (e) impulzný sprchový prenos, (f) moderovaný sprchový prenos, (g) rotujúci oblúk [6].

Obrázok (Obr. 6) znázorňuje vplyv prúdu, napätia a rýchlosti posuvu drôtu na typ prenosu kovu. Typ prenosu kovu významne vplyva na tvar zvarovej húsenice a teda aj na prievar, priechod prídavného kovu do základného materiálu. Pri zváraní MIG/MAG môžeme typy prenosu kovu rozdeliť do dvoch skupín. Prenos:

- voľným letom kvapky
- premostením elektródy s kúpeľom - skratom

3.1 Prenos kovu voľným letom kvapky

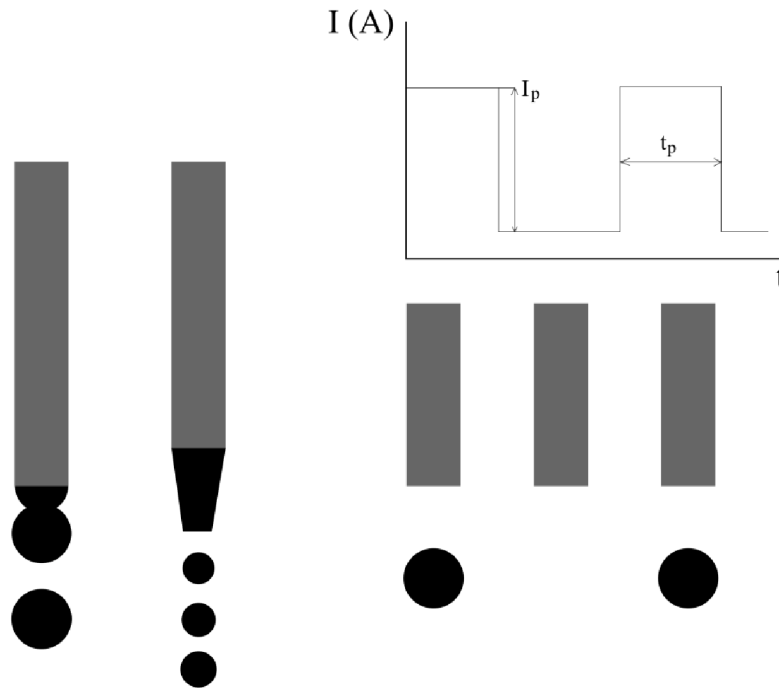
Pri prenose kovu voľným letom kvapky je oblúk medzi elektródou a základným materiálom stále udržiavaný a kov sa v oblúku prenáša vo forme kvapiek. Prenos môže byť kvapkový, sprchový, alebo impulzný (Obr. 7, Obr. 8).



Obr. 7 Prenos kovu zľava: kvapkový, sprchový, impulzný [6].

3.1.1 Kvapkový prenos kovu

Kvapkový prenos prebieha pri vysokých hodnotách prúdu od 140 do 300 A a napätí od 22 do 28 V, ktoré s dĺžkou oblúku neumožňuje skratový prenos. Horiaci oblúk je dlhý s nepravidelnými skratmi. Koniec elektródy sa nataví do veľkej kvapky, ktorá môže byť aj väčšia ako elektróda. Pri nižšom prúde sa kvapky oddeľujú predovšetkým gravitačnými silami silnejšími ako sily povrchového napätia brániaceho oddeleniu kvapky od elektródy. Elektromagnetické sily pri nižších prúdoch nie sú príliš veľké. So zvyšujúcim sa prúdom sa priemer kvapiek znižuje a zvyšuje sa frekvencia ich oddeľovania od elektródy, čo spôsobuje prechod do sprchového prenosu. Kvapkový prenos spôsobuje pomerne široký rozstrek a hrubé zvarové húsenice. Dobré použiteľný je v ochrannej atmosfére CO₂, v zmesiach argónu sú výsledky výrazne horšie.



Obr. 8 Prenos kovu z elektródy do kúpeľa zľava: kvapkový prenos, sprchový prenos, impulzný prenos.

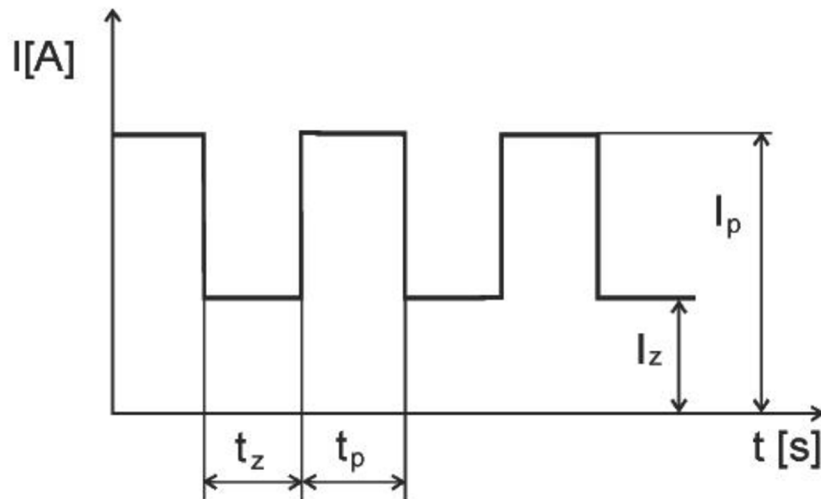
3.1.2 Sprchový prenos kovu

Sprchový prenos prebieha pri vyšších prúdoch a napätiach ako kvapkový, vzniká teda vyšší tepelný príkon. Ten spôsobuje rozmerný kúpeľ a tento typ prenosu kovu je preto vhodný pre zváranie pri vyšších rýchlostiach. Vplyvom vysokého prúdu sa nestíhajú tvoriť väčšie kvapky, pôsobením elektromagnetických síl vznikajú malé kvapky s vysokou frekvenciou od 150 až do 350 Hz.

Výhodou sprchového prenosu je malý rozstrek. Je veľmi výkonný a používaný prevažne v polohe vodorovnej zhora, pri zváraní v polohách sú možnosti obmedzené.

3.1.3 Impulzný prenos kovu

Impulzný prenos kovu je riadeným procesom. Bol vyvinutý pre obmedzenie rozstreku a zníženie vád v zvaroch a je dosiahnuteľný aj pri zváracích prúdoch nižších ako zodpovedajúce tranzitné hodnoty. Horenie oblúka je udržiavané pri nižších prúdoch a v riadených intervaloch sa zvyšuje zvárací prúd a napätie. Oddelenie kvapky je riadené impulzmi, ktoré kontroluje mikroprocesor. Pri ideálnom priebehu (Obr. 9) sa kvapka oddeľuje pri nadkritickej hodnote prúdu a po jej oddelení prúd klesá na hodnotu udržiavania oblúka. Počas jedného impulzu sa oddeľuje jedna kvapka. Frekvencia impulzov sa pohybuje od 25 do 500 Hz, výnimočne až 1 kHz. Používané ochranné plyny sú obdobné sprchovému prenosu.



Obr. 9 Priebeh prúdu pri impulznom prenose kovu.

Výhodou tohto procesu je vysoký výkon odtavenia ako u sprchového prenosu pri nižšom vnesenom teple. Kombinuje teda výhody kvapkového a sprchového prenosu. Zariadenia sú však drahšie kvôli potrebnej riadiacej elektronike a oblúk emituje vyššie elektromagnetické žiarenie, proti ktorému je nutné zabezpečiť vyšší stupeň ochrany zvaračov a osôb v blízkosti.

3.1.4 Moderovaný sprchový prenos

Moderovaný sprchový prenos je modifikáciou sprchového prenosu pri zvýšenom zvaracom prúde na 450 až 750 A. Zvaracie napätie sa zvyšuje na 40 až 50 V. Ochranným plynom je zmes Ar + 8% CO₂ s vysokým prietokom až 25 l/min. Tvoria sa veľké kvapky, môžu dosahovať až priemer drôtu. Pri vysokej frekvencii sú prenášané rýchlo prúdiacou plazmou do zvarového kúpeľa.

Táto metóda môže byť použitá pri zvaraní väčších hrúbok základného materiálu jednovrstvovým zvarom s vysokou rýchlosťou. Metóda zabezpečuje hlboký priedar.

3.1.5 Dlhý oblúk s rotujúcim prenosom kovu

Pri hodnotách prúdu ako pri moderovanom sprchovom prenose, no vyššom napätí, je drôt zahrievaný odporom takmer na teplotu tavenia a intenzívne magnetické pole roztáča taviaci sa koniec elektródy. Odtavujúce sa kvapky tvoria kužeľovú plochu. Dlhý oblúk s rotačným prenosom kovu tvorí hlboký a široký závar.

3.2.1 Skratový prenos

Ku skratovému prenosu dochádza, keď vznikne premostenie medzi elektródou a základným materiálom, teda skrat. Ak je elektróda do oblúka podávaná rýchlejšie ako sa stíha taviť, dostáva sa do zvarového kúpeľa a spôsobuje skrat. Následne sa zvyšuje elektrický prúd a spôsobuje rast odporového tepla, ktoré odtaví časť elektródy do kúpeľa. Skratové spojenie sa preruší, oblúk sa znova zapáli a cyklus sa opakuje. Frekvencia skratov môže presiahnuť 100 Hz. Je regulovateľná prúdom a napätím. So zvyšujúcim sa prúdom frekvencia oddeľovania kvapiek klesá, kvapky sa zväčšujú a zvyšuje sa rozstrek. Zároveň sa zvyšuje množstvo privedeného tepla do zvaru.

Skratový prenos je dosiahnuteľný v ľubovoľnej ochrannej atmosfére. Vďaka nízkym hodnotám zvaracieho prúdu vzniká v horiacom oblúku pomerne málo tepla. Táto vlastnosť skratového procesu sa využíva pri zvaraní v polohách a zvaraní tenkých plechov, pretože zvarový kov nie je veľmi tekutý a rýchlo tuhne.

3.2.2 Zrýchlený skratový prenos

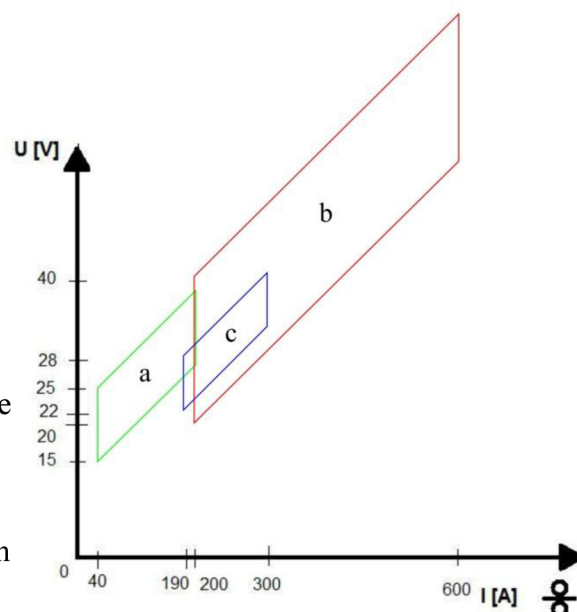
Zrýchlený skratový prenos je vhodný pre zvaranie tenkých plechov vysokou rýchlosťou a veľkým výkonom zvarania. Dosiahne sa zvýšením zvaracieho prúdu nad 200A a tomu zodpovedajúcej rýchlosti podávania drôtu. Treba tiež zvýšiť prietok ochranného plynu, zatiaľ čo napätie zostáva nezmenené. Nedochádza k vytvoreniu veľkých kvapiek, pretože vyššia frekvencia ich tvorby to nedovoľuje.

4. ZÁVISLOSTI PRENOSU NA ZVÁRACÍCH PARAMETROCH [4]

Po zvolení ochranného plynu ovplyvňujeme typ prenosu kvapky kovu oblúkom zvaracím prúdom a napätím. Pri dobrom nastavení zvaracích parametrov je horiaci elektrický oblúk stabilný. Jeho nestabilita spôsobuje nekludné horenie a zvyšuje rozstrek, veľkosť a polohu vhodnej pracovnej oblasti určuje voľba plynu (Obr. 10).

Pri nastavení nižších hodnôt napätia a prúdu je prenos kovu skratový s krátkym oblúkom. Správne nastavený vydáva praskavý zvuk. Napríklad pre zvaranie v ochrane CO₂ sú napätia ohraničujúce oblasť krátkeho skratového prenosu v rozmedzí 15 - 25 V a prúd sa pohybuje v rozsahu od 40 do 200 A. Najvhodnejšia kombinácia U a I sa nachádza uprostred danej pracovnej oblasti. Zmenou jedného z parametrov sa ocitáme mimo pracovnej oblasti a oblúk je nestabilný.

Súčasným zvyšovaním prúdu aj napätia sa dostávame do pracovnej oblasti sprchového, prípadne kvapkového prenosu. Sprchový prenos vydáva syčivý zvuk, je veľmi stabilný a umožňuje vysokú produktivitu. Napätie je potrebné nastaviť medzi 20 a 40 V, vhodný prúd sa pohybuje medzi 200 až 600 A. Kvapkový prenos prebieha pri nastavení pracovnej oblasti na rozmedzí medzi sprchovým a skratovým prenosom. Kvapkový prenos je nestabilný, a spôsobuje veľký rozstrek. Prebieha v oblasti medzi 22 až 28 V a od 190 do 300 A.



Obr. 10 Pracovné oblasti pre zvaranie pod ochranou CO₂.

- a - krátky oblúk so skratovým prenosom,
- b - dlhý oblúk so sprchovým prenosom,
- c - prechodná oblasť s kvapkovým prenosom [3].

5. PROFIL ZVAROVEJ HÚSENICE A ROZSTREK

Na tvar zvarovej húsenice vplyvajú všetky parametre zvárania MIG/MAG. Sú nimi:

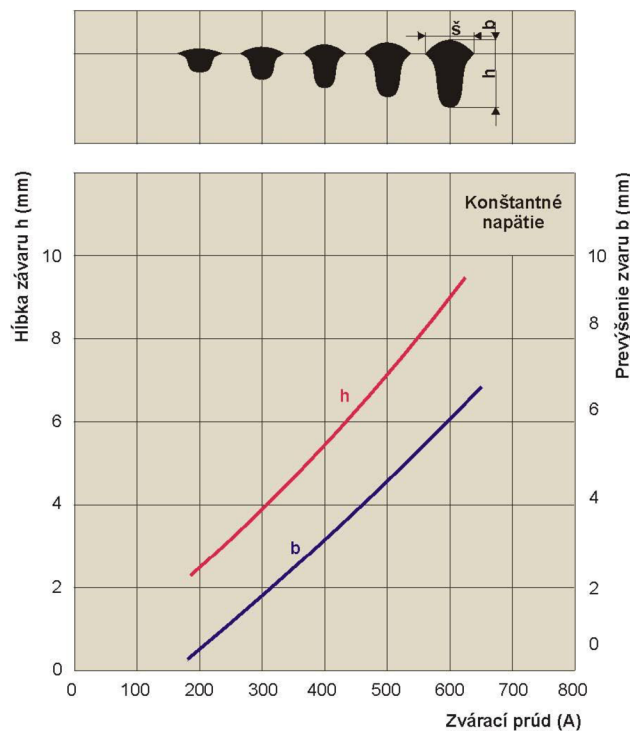
- zvarací prúd
- priemer drôtu
- napätie na oblúku
- vyloženie elektródy a vzdialenosť zvaracej hubice od povrchu základného materiálu
- druh ochranného plynu
- rýchlosť zvárania

Okrem týchto, sú dôležité ešte:

- sklon zvaracej hubice voči rovine povrchu základného materiálu
- tvar a rozmery zvarových plôch
- druh prenosu kovu v oblúku
- teplota predohrevu základného materiálu
- poloha zvárania

5.1 Zvarací prúd a priemer drôtu

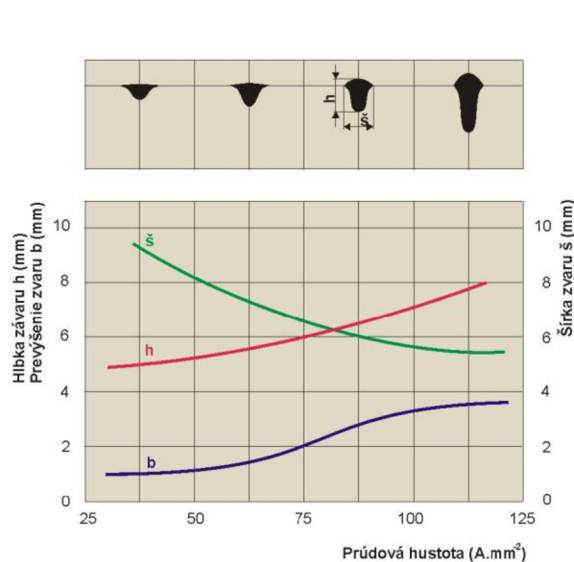
Zvarací prúd nastavujeme podľa druhu a hrúbky základného materiálu, hmotnosti zvarku a polohy zvárania. Má vplyv na hĺbku závaru a prevýšenie zvarovej húsenice (Obr. 11). Prúd môže byť nastavený priamo zvolením požadovaného prúdu na zdroji a rýchlosť podávania drôtu je dopočítaná, alebo nepriamo, kedy na zdroji volíme rýchlosť podávania drôtu a zdroj následne dopočítava potrebný prúd. Prúd a rýchlosť podávania sú parametre na sebe závislé priamo úmerne, so zvyšujúcou rýchlosťou podávania drôtu musíme zvyšovať prúd.



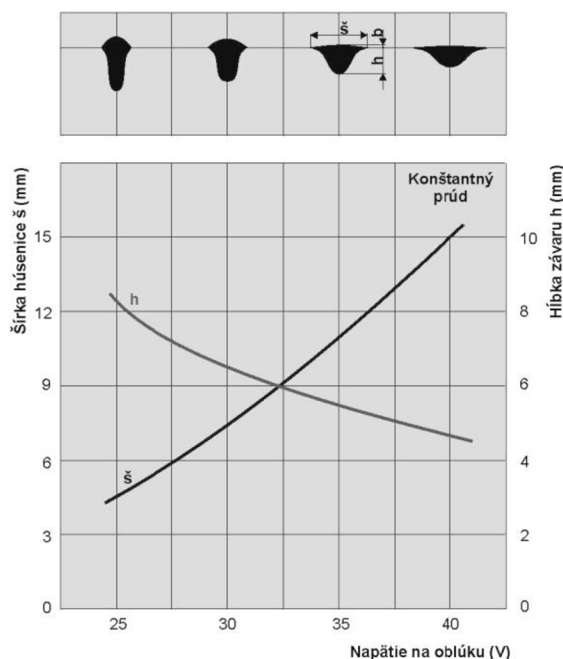
Obr. 11 Vplyv prúdu na hĺbku závaru a prevýšenie húsenice [4].

5.3 Prúdová hustota

Na spôsob prenosu kovu oblúkom má významný vplyv prúdová hustota. Je podielom prúdu a plochy prierezu zvaracieho drôtu. S rastúcou prúdovou hustotou sa prenos kovu mení zo skratového cez kvapkový na sprchový. Rastúca prúdová hustota znižuje šírku húsenice a zväčšuje hĺbku závaru a prevýšenie húsenice (Obr. 12).



Obr. 12 Vplyv prúdovej hustoty na šírku húsenice a hĺbku závaru [4].



Obr. 13 Vplyv napätia na šírku húsenice [4].

5.2 Napätie na oblúku

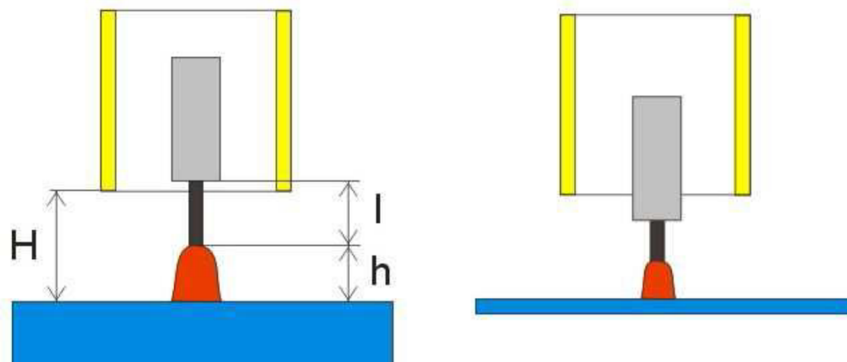
Napätie na oblúku nemá na výkon odtavenia taký vplyv ako prúd. Má nižší podiel na zmene tepelného príkonu oblúka, pretože jeho hodnoty sa pohybujú v menšom rozpätí. Má ale významný vplyv na dĺžku oblúka a výslednú šírku zvarovej húsenice. Napätie na oblúku je závislé na druhu ochranného plynu. Ochranná atmosféra CO₂ zvyšuje napätie približne o 2 až 3 V oproti zmesiam na báze argónu. Na moderných zariadeniach je napätie regulované automaticky podľa veľkosti prúdu, druhu a priemeru drôtu a podľa použitého ochranného plynu. Príliš vysoké napätie má za následok vysoký rozstrek a pórovitosť zvaru. Naopak, pri nedostatočnom napätí sa prevyšuje zvar a vzniká riziko neprievarov. Vplyv napätia na tvar zvaru je znázornený na Obr. 13.

5.3 Vyloženie elektródy

Vyloženie elektródy je dĺžka drôtu, ktorou prechádza prúd. Môže ovplyvniť výkon navarenia ohrevom konca drôtu elektródy a znížiť teplo potrebné na roztavenie konca drôtu. Volí sa podľa zväracieho plynu nasledovne:

- pre zváranie v CO_2 : $l=5+5 \cdot d$,
- pre zváranie v zmesiach: $l=8+5 \cdot d$.

kde l je dĺžka vyloženia drôtu a d je priemer elektródy, ako to znázorňuje Obr. 14.



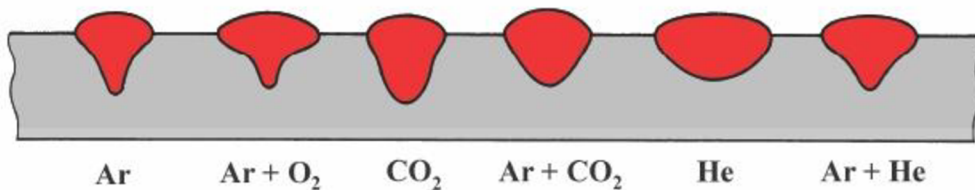
Obr. 14 Vyloženie elektródy. l - vyloženie elektródy, h - vzdialenosť drôtu od povrchu základného materiálu, H - vzdialenosť dýzy od povrchu základného materiálu [4].

Príliš veľké vyloženie drôtu spôsobuje zníženie efektivity plynovej ochrany, zhoršuje stabilitu drôtu a zvyšuje rozstrek. Nedostatočné vyloženie je príčinou zvýšeného tepelného namáhania hubice. So zvyšujúcou sa vodivosťou elektródy vplyv vyloženia na priebeh zvárania klesá.

Optimálna vzdialenosť medzi čelom plynovej dýzy a povrchom základného materiálu je 15 - - 25 mm podľa priemeru dýzy a typu zvaru. Na potrebné vyloženie drôtu, dĺžku elektrického oblúka a dostatočnú plynovú ochranu je treba vhodne polohovať kontaktnú koncovku drôtu voči čelu plynovej dýzy.

5.4 Druh ochranného plynu

Voľba ochranného plynu veľmi významne ovplyvňuje tvar zvaru, ako aj zvarovej húsenice. Jeho úlohou popri ochrane pred nečistotami z okolitej atmosféry je aj vytvorenie dobrého ionizačného prostredia pre zapálenie a horenie oblúka, ovplyvňuje metalurgické procesy počas prenosu kvapky oblúkom a procesy v zvarovom kúpeli. Vytvárajú a ovplyvňujú sily pôsobiace na kvapku počas jej oddeľovania a letu oblúkom, ovplyvňujú tvar, rozmer kvapiek a ich spôsob prenosu oblúkom, vplývajú na tvar zvaru (Obr. 15), kvalitu jeho povrchu a mechanické vlastnosti zvaru.



Obr. 15 Vplyv voľby ochranného plynu na tvar prierezu zvaru [4].

5.5 Prietokové množstvo plynu

Po zvolení vhodného ochranného plynu je potrebné určiť dostatočné prietokové množstvo, ktoré ale nesmie byť príliš vysoké. Okrem zbytočnej neekonomickosti procesu by príliš rýchlo prúdiaci plyn z hubice nárazmi na základný materiál vytváral turbulentné prúdenie, vírenie, ktoré môže spôsobiť nasávanie okolitej atmosféry do oblasti oblúka. Nedostatočný prietok plynu tiež nezaistí potrebnú ochranu oblúka pred okolitou atmosférou.

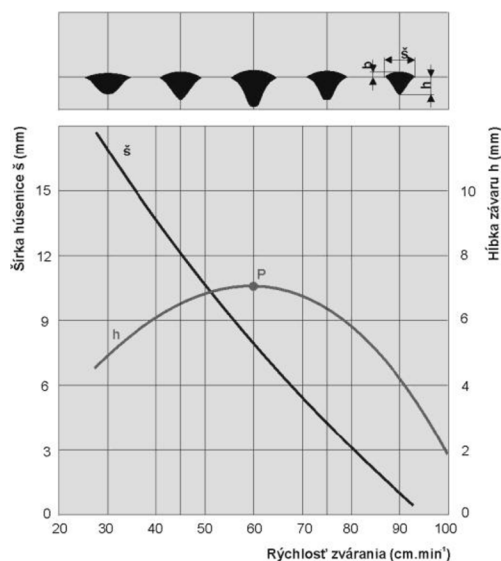
Zle zvolené množstvo prúdiaceho plynu spôsobuje výskyt pórov v zvaru, znečistenie zvaru nečistotami z okolitej atmosféry. Prietokové množstvo je určované podľa vzťahu:

$$V = 10 \cdot d \quad (5.1)$$

kde V [l/min] - prietokové množstvo plynu
 d [mm] - priemer drôtu

5.6 Rýchlosť zvarovania

Rýchlosťou zvarovania je významne ovplyvňovaná šírka zvarovej húsenice, ale aj hĺbka závaru. S rastúcou rýchlosťou zvarovania sa šírka húsenice znižuje. Hĺbka závaru rastie, no po dosiahnutí maxima začína prudko klesať (Obr. 16). Ručným zvarovaním sú dosahované rýchlosti v rozmedzí 100 až 600 mm/min, strojové zvarovanie sa môže pohybovať vo vyšších rýchlostiach, až cez meter za minútu.



Obr. 16 Vplyv rýchlosti zvarovania na šírku húsenice a hĺbku závaru [4].

6. EXPERIMENTÁLNE OVERENIE POZNATKOV

Pre posúdenie a porovnanie praktických výsledkov s teoretickými predpokladmi o vplyvoch parametrov bolo vyhotovených päť návarov na plech o hrúbke 8 mm. Vzorky boli po navarení rozrezané a profily vybrúsené a naleptané pre lepšiu viditeľnosť pásiem zvaru, návaru a tepelne ovplyvnenej oblasti. Hodnotenými vlastnosťami bude súčiniteľ formy zvaru a zmiešanie návaru a zvaru. Súčiniteľ formy zvaru je závislý na hĺbke zvaru do základného kovu a šírke húsenice, počíta sa podľa vzťahu:

$$\phi = \frac{b}{h} \quad (6.1)$$

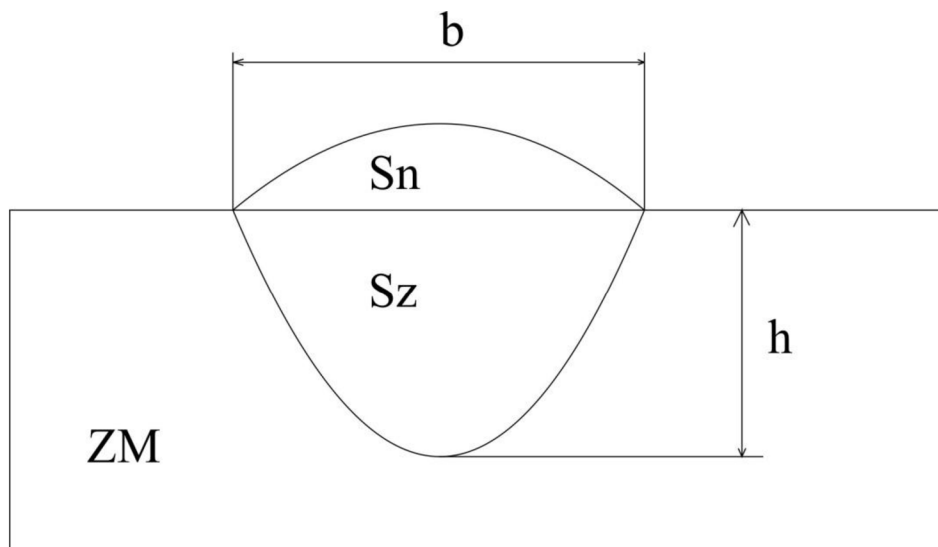
kde ϕ [-] - súčiniteľ formy zvaru
 b [mm] - šírka zvarovej húsenice
 h [mm] - hĺbka zvaru

Druhou hodnotenou vlastnosťou zvaru bude zmiešanie materiálu, počítané ako pomer plochy zvaru k celkovej ploche profilu zvaru podľa vzťahu:

$$Z = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100 \quad (6.2)$$

kde Z [%] - súčiniteľ zmiešania kovu
 S_z [mm²] - plocha zvaru
 S_n [mm²] - plocha návaru

Rozmery sú názorne zobrazené na obrázku Obr. 17.



Obr. 17 Profil zvaru.

b - šírka húsenice, h - hĺbka zvaru, S_n - plocha návaru, S_z - plocha zvaru, ZM - základný materiál.

Poslednou hodnotou je dodané teplo do oblúka Q_s . Špecifické vnesené teplo do oblúka závisí na príkone dodanom zväracím zdrojom a rýchlosti zvärania. Je to teplo spotrebované na jeden milimeter zvaru. Zistíme ho podľa vzťahu:

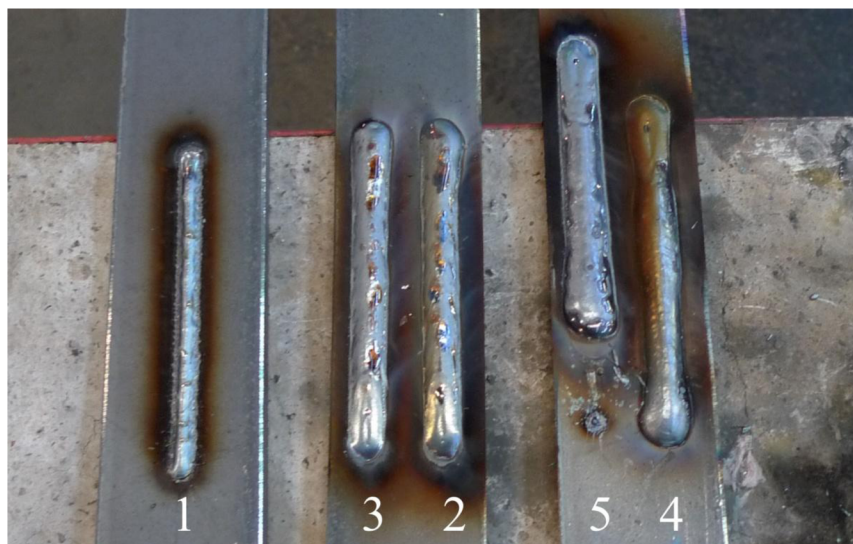
$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \quad (6.3)$$

kde Q_s [kJ.mm⁻¹] - špecifické teplo vnesené do oblúka
 η [-] - účinnosť prenosu tepla
 U [V] - elektrické napätie
 I [A] - elektrický prúd
 v_s [mm.s⁻¹] - rýchlosť zvärania

Zvary boli prevedené na zväracom zariadení Fronius so synergickou riadiacou jednotkou FRC-4 na tri pásy plechu o hrúbke 8 mm. Zväranie prebiehalo v polohe vodorovnej zhora rýchlosťou posuvu približne 30 cm/min. Ochranným plynom bola zmes argónu s CO₂ v pomere 82% Ar + 18% CO₂. Budú porovnávané tvaru profilu zvaru v závislosti od zmien zväracieho prúdu a napätia. Prehľad nameraných hodnôt je v tabuľke Tab. 1.

Tab. 1 Prehľad nameraných hodnôt na vzorkách.

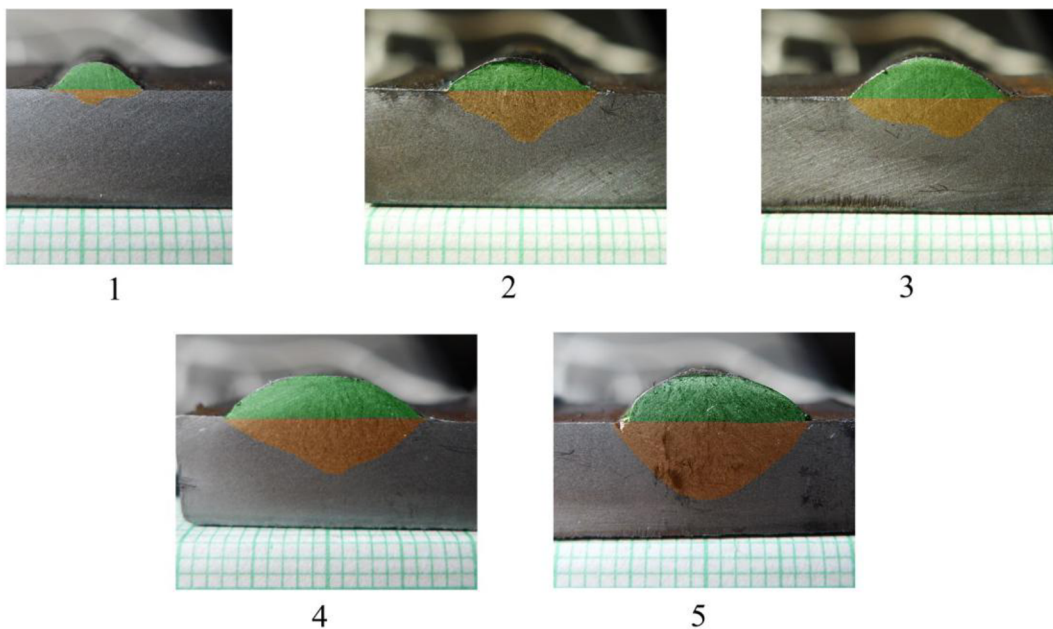
Vzorka	1	2	3	4	5
U [V]	22,1	27,7	26,1	31,3	30,3
I [A]	95	234	212	397	299
b [mm]	5,8	10	9,6	13,5	11,6
h [mm]	1,05	3,05	2,4	3,9	4,8
S _Z [mm ²]	2,62	19,16	14,8	27,5	39,6
S _N [mm ²]	6,2	11,9	16,1	25,65	25,6
ϕ [-]	5,8	3,3	4	3,4	2,4
Z [%]	29,6	61,7	47,8	51,7	60,7
Q _S [kJ.mm ⁻¹]	0,357	1,102	0,941	2,112	1,54



Obr. 18 Pohľad na zvarové húsenice vzoriek zhora.

Na Obr. 18 môžeme pozorovať rozličné šírky zvarovej húsenice a opal vznikajúci vystavením ešte horúceho zvaru okolitej atmosfére. Pohľad na profil každého zvaru s vyznačenou plochou návaru a závaru ponúka Obr. 19.

Zvárací proces bol plne automatizovaný, riadený synergickým zariadením. Preto sú návary bez negatívnych kvalitatívnych znakov, ako póry, trhliny. Jednotlivé návary sa líšia tvarom húsenice a plochou profilu a môžeme ich tak rozdeliť podľa vhodnosti použitia.



Obr. 19 Profily zvarov s vyznačenou plochou závaru a návaru.

Návar č. 1 bol vytvorený pri pomerne nízkom prúde a napätí. Má plytký závar, je úsporný na prídavný materiál a zmiešanie prídavného materiálu so základným je tu minimálne, necelých 30%. V závislosti na nízkych parametroch U a I bolo privedené tiež nízke teplo, len 357 J, proces bol teda aj energeticky nenáročný a základný materiál len minimálne tepelne ovplyvnený. Preto sú tieto podmienky vhodné predovšetkým na návary, kedy je potrebné zachovať vlastnosti prídavného materiálu a minimalizovať zmiešanie.

Pri druhom návare bolo dosiahnuté najvyššie zmiešanie. So zvýšením prúdu a napätia narástla aj húsenica a hĺbka závaru, prišlo teda k zvýšeniu spotreby prídavného materiálu. S tým súvisí aj potreba vyššieho tepla na natavenie elektródy.

Tretí návar je parametricky blízky druhému, prebehol ale pri nižšom prúde a napätí, preto bol nižší príkon a teda aj rýchlosť odtavovania elektródy. Plocha prierezu zvaru je menšia, spotrebovalo sa menej prídavného materiálu. Kvôli nižšiemu vzniknutému teplu vznikol aj plytší závar. Zmiešanie je nižšie a súčiniteľ formy zvaru, teda pomer šírky húsenice k hĺbke závaru je vyšší.

Štvrtá húsenica je najširšia, vznikol tiež dosť hlboký závar. Tento variant bol energeticky najnáročnejší, prebehol pri prúde takmer 400 A a napätí cez 31 V. V dôsledku vysokého príkonu bolo do oblúka vnesené aj najvyššie teplo, cez 2 kJ na milimetri zvaru.

Posledný návar má v priereze najväčšiu hĺbku závaru. Húsenica je široká, súčiniteľ formy zvaru je však najnižší, čo značí vysokú efektivitu využitia materiálu na zváranie hrubších plechov. Vzniklo pomerne vysoké teplo, základný materiál bude pravdepodobne značne tepelne ovplyvnený a proces je energeticky náročný. Bolo dosiahnuté vysoké zmiešanie.

ZÁVER

V tejto práci boli zhodnotené viaceré faktory ovplyvňujúce priebeh zvaracieho procesu, kvalitu a technologické parametre zvaru a typ prenosu kvapky roztaveného kovu. Elektrický prúd a napätie, hoci veľmi dôležité parametre, nie sú jediné, ktoré majú rozhodujúci vplyv na výsledný zvar, či prenos kovu. Nemenej dôležitým je typ a prietok použitého ochranného plynu, vyloženie, materiál, rýchlosť podávania a priemer elektródy, vzdialenosť zvaracej hubice od zváraného materiálu a v neposlednom rade zvaracia poloha. Experiment demonštroval rozdiely profilu zvaru pri zmenách prúdu a napätia za konštantnej zvaracej rýchlosti a bez zmeny ostatných parametrov. Automatizácia procesu nedovolila vytvoriť vadný zvar, výsledné zvary boli však dostatočne rozdielne, aby bolo možné posúdiť vhodnosť parametrov pre rôzne účely využitia a dosiahnutie požadovaných výsledkov.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. Netwelding.com [online]. [cit. 2012.05.04.]. Dostupné z: http://www.netwelding.com/History_MIG%201.htm
2. ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou*. Bratislava : ETERNA PRESS s.r.o, 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5.
3. Firemné podklady firmy AGA. [VHS kazeta] Svařování metodami MIG/MAG.
4. MARÔNEK Milan, BÁRTA Jozef. *Multimediálny sprievodca technológiou zvárania*. Slovenská technická univerzita, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, 2007. 343 s ISBN 978-80-8096-066-7
5. Kolektív autorov. *Technologie svařování a zařízení*. 1.vyd. Ostrava : ZEROSS, 2001. 395 s. ISBN 80-877-81-0
6. Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou. *Wikipedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation [cit. 2012.04.28.]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování_v_ochranné_atmosféře_tavící_se_elektrodou
7. Gas metal arc welding. *Wikipedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation [cit. 2012.04.28.]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_metal_arc_welding
8. Svařování. *Wikipedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation [cit. 2012.04.28.]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

GMAW	Gas metal arc welding - zváranie v ochrannom plyne taviacou sa elektródou
MIG	Metal inert gas - zváranie pod inertným ochranným plynom
MAG	Metal active gas - zváranie pod aktívnym ochranným plynom

označenie	jednotka	popis
F_g	[N]	gravitačná sila
F_h	[N]	sila spôsobená tlakom plynov
F_e	[N]	axiálna sila elektromagnetického poľa
F_s	[N]	sila povrchového napätia
F_p	[N]	sila vytvorená prúdom pár
F_{pe}	[N]	radiálna sila elektromagnetického poľa
I	[A]	prúd
Q_S	[kJ.mm ⁻¹]	špecifické vnesené teplo
R	[m]	polomer
S_n	[mm ²]	plocha návaru
S_z	[mm ²]	plocha závaru
U	[V]	napätie
Z	[%]	zmiešanie
b	[mm]	šírka húsenice
d	[mm]	priemer drôtu
d_a	[mm]	priemer oblúkového stĺpca
g	[m.s ⁻²]	gravitačná konštanta
h	[mm]	hĺbka závaru
m	[kg]	hmotnosť
p	[dyn.cm ⁻²]	tlak
v	[m.s ⁻¹]	rýchlosť
x	[m]	vzdialenosť
ϕ	[-]	súčiniteľ formy zvaru
η	[N.s.m ⁻²]	viskozita
μ	[N.A ⁻²]	permeabilita vákua
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota