



Spolufinancováno
z programu Evropské unie
Erasmus+



Erasmus+

MODUL H

Svařování elektrickým obloukem

Podstata elektrického oblouku



Podstata elektrického oblouku

- Svařování elektrickým obloukem je velmi rozšířený způsob svařování, v podstatě se jedná o elektrický výboj v plynech.
- Podstatou svařování je změna elektrické energie na tepelnou energii, ke svařování je nutná velká intenzita proudu až 2000 A, ovšem svařovací napětí je velmi malé, do 50 V.



Podstata elektrického oblouku

- Elektrický oblouk vznikne za předpokladu, že napětí mezi elektrodou a materiálem je vyšší než ionizační napětí plynu při dostatečné proudové hustotě a trvalý elektrický výboj nastane, když vznikající teplo zabezpečí ohřátí plynu na teplotu potřebnou pro tepelnou ionizaci obklopující atmosféry.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 32.



Podstata elektrického oblouku

- Podle zvolené technologie je možné měnit výkon elektrického oblouku, jeho tvar, či jeho teplotu. Možnosti svařování:
 - a) svařování tavící se kovovou elektrodou (ruční svařování obalenými elektrodami, svařování MOG, svařování pod tavidlem, svařování v ochranných atmosférách MIG/MAG),
 - b) svařování netavící se wolframovou elektrodou (svařování v ochraně plynu WIG).

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 32.



Podstata elektrického oblouku

- Fyzikální a metalurgické děje probíhají v oblouku velmi rychle, za vysokých teplot a jsou ovlivňovány:
 - a) geometrickým uspořádáním, polaritou a tvarem elektrod,
 - b) chemickým složením elektrod, plazmatu a okolní atmosféry,
 - c) tepelnou vodivostí plazmatu, elektrody a základního materiálu.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 32.



Charakteristiky elektrického oblouku

- Zapálení oblouku
- Při napětí zdroje nakrátko je vyšší napětí než při stálém hoření oblouku.
- Prvopočáteční zapálení elektrického oblouku lze uskutečnit:
 - Krátkodobým spojením (dotykem) elektrody se základním materiálem a následným rozpojením.
 - Dotykem elektrody s materiálem při průchodu zkratového proudu vysokým přechodovým odporem na rozhraní elektroda – materiál se konec elektrody rozžhaví a po jejím oddálení od materiálu v důsledku tepelné emise elektronů dojde k ionizaci okolního plynného prostředí a vzniku (zapálení) elektrického oblouku. Pro zapálení oblouku stačí relativně nízká intenzita proudu.
- Mezi elektrodou a svařovaným materiálem se vytvoří ionizované prostředí, které jiskrou ionizuje svoje okolí.
- Toto je obvyklé u střídavého proudu a u stejnosměrného proudu je přechod jiskrového výboje v obloukový výboj.



Základní oblasti svařovacího oblouku

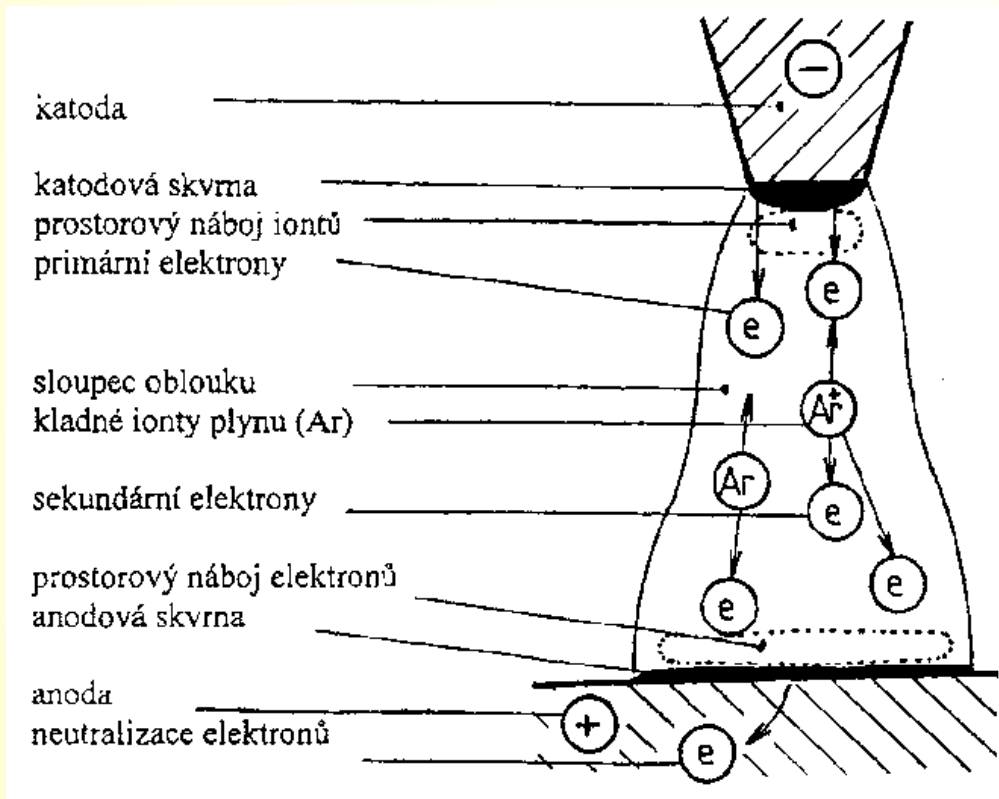
- Sloupec oblouku

- Je to největší část elektrického oblouku, má tvar mírně se rozšiřujícího komolého kužele a je zářivě svítící oblastí ionizovaného plynu ve formě plazmy o vysoké teplotě, jejíž maximální hodnota závisí na řadě faktorů, hlavně na složení plynu a s tím souvisejícím stupněm ionizace a disociace a na intenzitě proudu a hodnotě napětí.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů.* Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 33.



Části elektrického oblouku



AMBROŽ, O. A KOL. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. s. 75.



Elektrický oblouk

- Sloupec oblouku je vodivý, což způsobují elektrony.
- Ty vznikají v důsledku termické ionizace.
- Víceatomové molekuly plynů se za vysokých teplot štěpí na atomy.
- Vznikají kladné ionty, které přitahuje katoda.
- Elektrony zajišťují vedení proudu v sloupci oblouku, protože jejich hmota je menší než hmota iontů, z toho důvodu je jejich pohyb ve spádu napětí rychlejší.



Katodová oblast

- Je tvořena žhavou katodovou skvrnou, tj. ohraničenou oblastí emitující primární elektrony, která je v závislosti na geometrii a teplotě katody buď relativně stabilní, nebo má tendenci se po povrchu katody stěhovat.
- Hustota proudu v katodové skvrně je v důsledku zúžení elektrického oblouku 10^4 A.cm^2 až 10^5 A.cm^2 .
- Kladné ionty, které dopadají na povrch katodové skvrny, se neutralizují a svoji ionizační energii předávají katodě.
- Tato energie potom napomáhá k termoemisi elektronů.
- Bezprostředně ke katodové skvrně přiléhá oblast katodového úbytku napětí o tloušťce $l_k = 10^{-6} \text{ m}$ až 10^{-7} m .
- Na té bývá úbytek napětí $U_k = 10 \text{ V}$ až 16 V .
- Úbytek napětí způsobuje prostorový náboj iontů, který brzdí elektrony uvolněné z katody.



Anodová oblast

- Je tvořena anodovou skvrnou, kterou jsou odváděny (pohlcovány) a neutralizovány dopadající elektrony, jejich kinetická energie se mění na energii tepelnou.
- V oblasti anodové skvrny se nachází prostorový náboj elektronů, který způsobuje anodový úbytek napětí $U_A = 4 \text{ V}$ až 8 V při tloušťce $l_A = 10^{-5} \text{ m}$ až 10^{-6} m .
- Úbytek napětí v anodové oblasti se téměř nemění se zvyšováním proudu.
- Kritický je proud, při kterém teplota povrchu anody dosáhne bodu varu materiálu anody.
- Při nadkritickém proudu se dostávají vlivem varu do anodové oblasti páry kovu, z kterého je anoda, a to vede ke snížení ionizačního potenciálu směsi plynů a ke snížení úbytku napětí na anodové oblasti.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů.* Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 34.

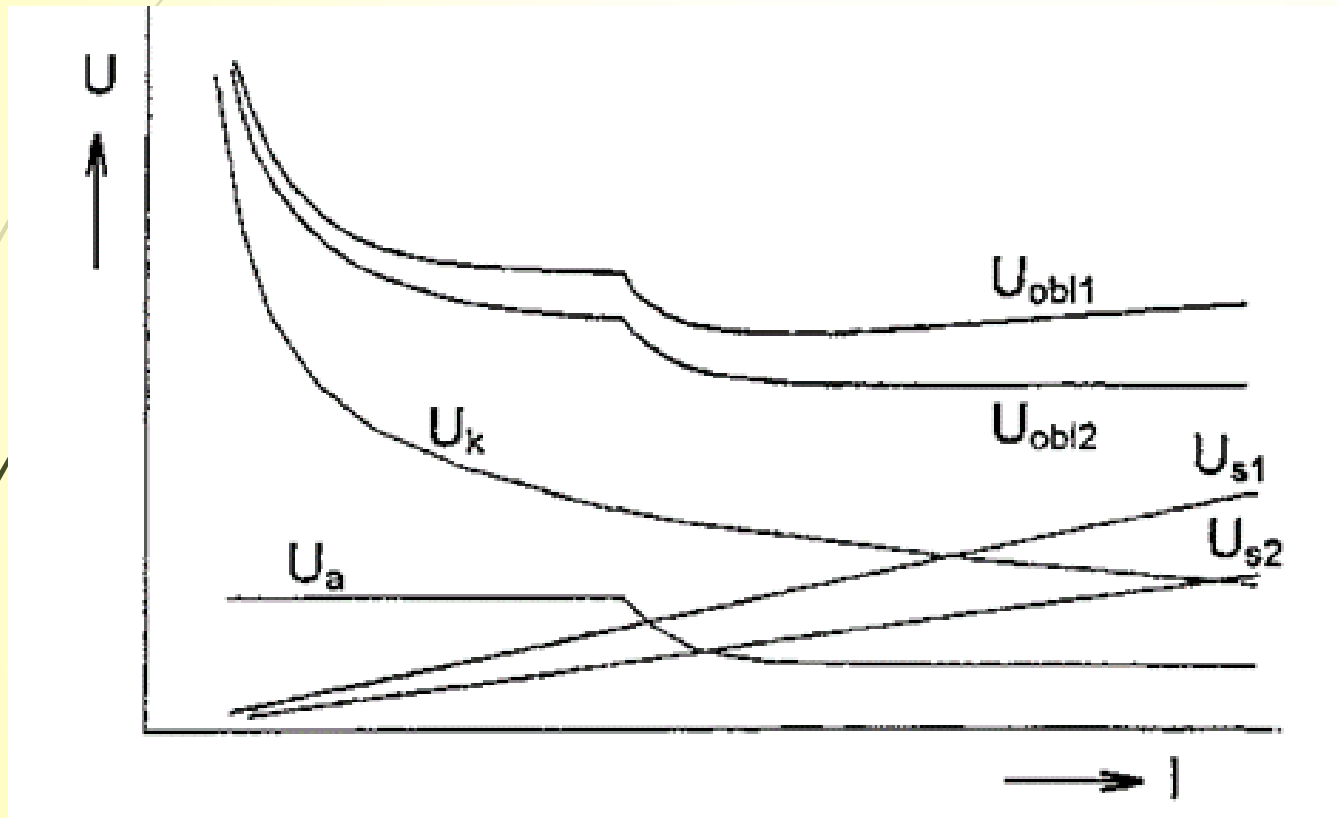


Voltampérová charakteristika oblouku

- Voltampérová charakteristika oblouku zobrazuje závislost napětí na oblouku na svařovacím proudu při konstantní délce oblouku.
- Pokud se mění délka oblouku, mění se také napětí, neboť delšímu sloupci oblouku odpovídá větší úbytek napětí při přibližně lineární závislosti.
- Na vlastní tvar, polohu a strmost tzv. statické charakteristiky oblouku má vliv chemické složení elektrody, složení plazmového plynu, geometrie hrotu elektrody i její průměr.
- Voltampérové charakteristiky oblouku se budou pro jednotlivé svařovací technologie lišit v závislosti na parametrech prostředí a podmínkách, při kterých se bude oblouk uskutečňovat.



Voltampérové charakteristiky oblouku



U_a – voltampérová charakteristika anodové oblasti

U_k – voltampérová charakteristika katodové oblasti

U_{s1}, U_{s2} – voltampérové charakteristiky sloupce oblouku pro délky l_1, l_2

U_{obl1}, U_{obl2} – voltampérové charakteristiky celého oblouku pro délky l_1, l_2 (délka oblouku $l_1 >$ délka oblouku l_2)



Stabilita oblouku

- Stabilita procesu svařování se posuzuje jako dynamické chování celého svařovacího systému a je podmíněna stabilitou elektrického oblouku, která je závislá na technologii svařování stejně jako na vlastnostech svařovacích zdrojů.
- Stabilita se projevuje tím, že je lepší případně horší housenka, dále je zajištěna rovnoměrnost hoření elektrického oblouku.
- Závisí zejména na vlastnostech svařovacího zdroje, na zvolených parametrech svařování, na druhu elektrody, případně na druhu zvoleného ochranného plynu.

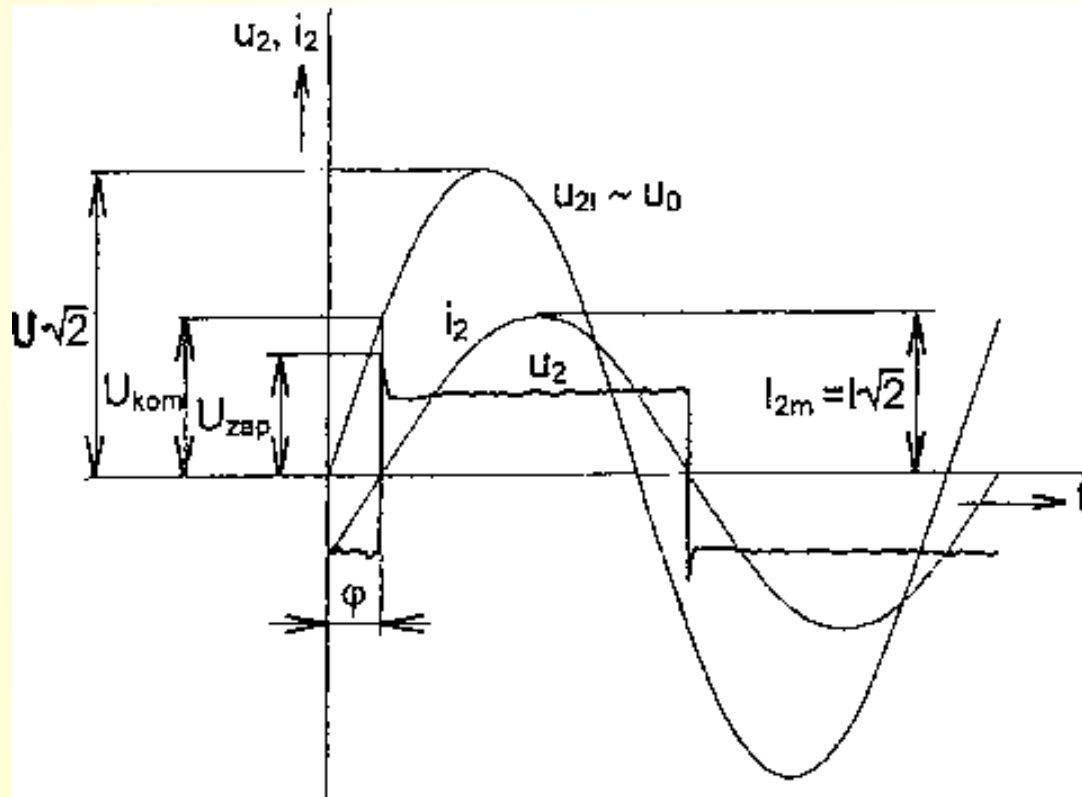


Elektrický oblouk v obvodu střídavého proudu

- Obecně platí, že se snadněji zajišťuje stabilita hoření oblouku při svařování stejnosměrným proudem než proudem střídavým.
- Oblouk napájený střídavým proudem hoří méně klidně než stejnosměrný oblouk z toho důvodu, že zhasíná po dobu, kdy napětí na oblouku klesne pod napětí ionizační a znovu se zapaluje při napětí podstatně vyšším.
- Tento fakt je způsoben tím, že jak napětí, tak i intenzita proudu mění svoji velikost a směr.
- Pro znovuzapálení oblouku je nutné zvýšit zápalné napětí.
- To je možno zajistit vytvořením fázového posuvu mezi proudem a napětím např. zapojením indukčnosti do elektrického obvodu (vřazením tlumivky do obvodu svařovacího zdroje).



Časový průběh napětí na oblouku při svařování střídavým proudem



U_2 – průběh napětí na oblouku;
 I_2 – střídavý proud jdoucí obloukem;
 U_{2t} – průběh napětí zdroje;
 U_{zap} – zápalné napětí;
 U_{kom} – komutační napětí;
 p – fázový posuv mezi proudem a napětím zdroje; $U_{kom} > U_{zap}$



Přenos materiálu elektrickým obloukem

- Faktory působící na přenos materiálu elektrickým obloukem:
 - chemické složení kovu elektrody,
 - složení obalu, tavidla, ochranného plynu,
 - délka volného konce elektrody,
 - rychlost podávání.
- Pro stabilitu hoření oblouku je nutné zachovat rovnováhu a to mezi rychlostí podávání elektrody, rychlostí tavení a přenosu kovu.



Možnosti přenosu kovu elektrickým obloukem

- Svařování elektrickým obloukem tavící se kovovou elektrodou v ochraně plynu vytváří velkou škálu možností přenosu materiálu z tavící se elektrody do svarové lázně především v závislosti na proudu, napětí na oblouku, průměru elektrody a složení ochranného plynu.



Způsoby přenosu svarového kovu

- V závislosti na výše uvedených aspektech svařování lze rozlišovat tyto způsoby přenosu kovu:
 - Sprchový přenos
 - Kapkový přenos
 - Zkratový přenos



Sprchový přenos

- Pro který je charakteristický relativně dlouhý oblouk, vysoká proudová hustota a vyšší napětí na oblouku ($U_s = 28 \text{ V}$ až 40 V ; $I_s = 200 \text{ A}$ až 500 A).
- Tekutý kov prochází obloukem jako proud oddělených drobných kapek.
- Tento způsob přenosu se vyskytuje hlavně při svařování v ochranných plynech bohatých na argon.
- Z elektrody se uvolňuje jedna kapka kovu při použití pulsního proudu.



Kapkový přenos

- Je charakteristický pro svařování v ochraně plynu CO₂, kdy při parametrech svařování ($U_s = 24 \text{ V}$ až 28 V ; $I_s = 200 \text{ A}$ až 300 A) a kratším oblouku se odtavují větší kapky kovu frekvencí 5 až 10 kapek za sekundu.
- Se zvyšujícím se proudem velikost rozměru kapek klesá a zvyšuje se frekvence jejich oddělování.

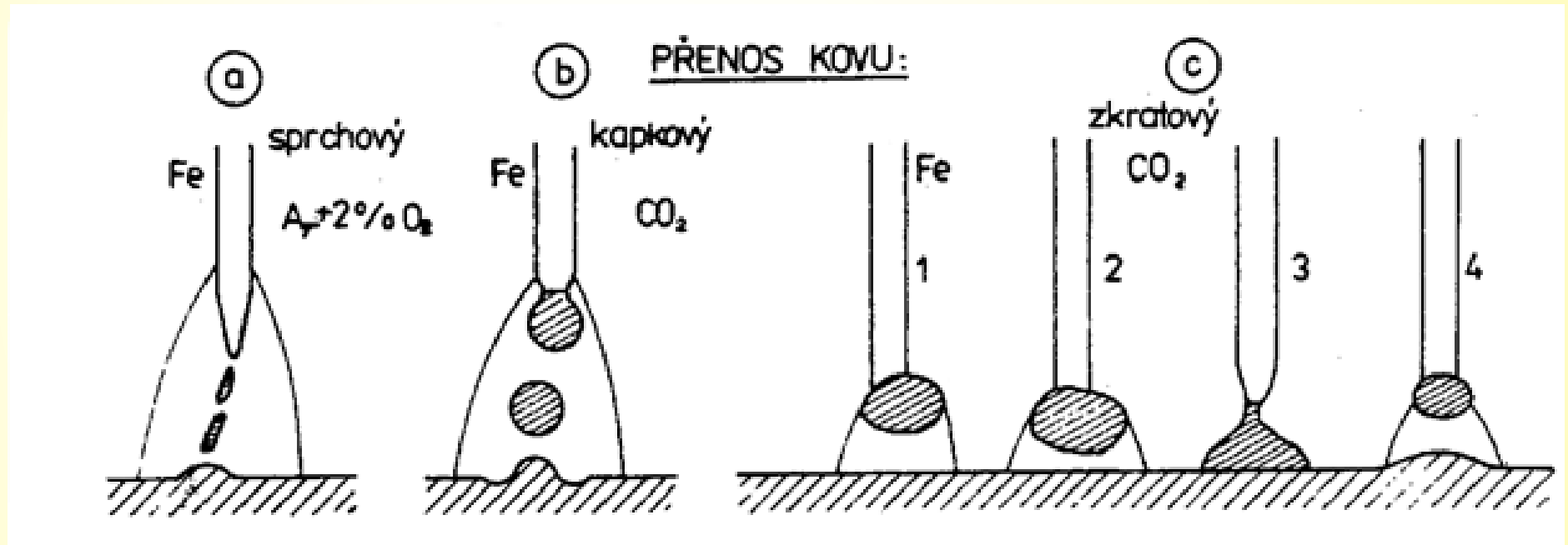


Zkratový přenos

- Při krátkém oblouku, který se vyznačuje pravidelným střídáním fáze hoření oblouku a fáze zkratu, při kterém se kapka roztaveného kovu na konci elektrody dotkne tavné lázně, vytvoří zkrat a po jeho přerušení se opět zapálí oblouk.
- Proudová hustota je střední až malá, taktéž napětí na oblouku ($U_s = 14 \text{ V}$ až 22 V ; $I_s = 50 \text{ A}$ až 200 A).



Způsoby přenosu kovu elektrody v oblouku



KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů.* Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 36.



Přenos kovu elektrody v oblouku

- Při přenosu nataveného materiálu elektrody do svarové lázně se uplatňuje složitý systém silového působení.
- Velikost, směr a výslednice sil ovlivňujících tvar, velikost a frekvenci kapek kovu elektrody jsou určovány těmito faktory:
 - technologické parametry svařování,
 - proud, napětí, proudová hustota, průměr elektrody, polarita,
 - fyzikální vlastnosti roztaveného kovu,
 - povrchové napětí, viskozita, teplota tavení, bod varu,
 - vlastnosti ochranného plynu,
 - teplota, tepelná vodivost, chemické interakce.



Účinky elektrického oblouku

- Tepelné účinky oblouku
- Mechanické účinky oblouku



Tepelné účinky oblouku

- Elektrický oblouk je intenzivním zdrojem tepla, z hlediska tavného svařování má velmi příznivé vlastnosti.
- Tepelný účinek oblouku je koncentrován na poměrně malou plochu a účinnost přenosu energie do svařovaného materiálu je dobrá.
- Prostřednictvím parametrů svařování lze v souvislosti s tepelnými a mechanickými účinky oblouku ovlivňovat i svarový spoj z hlediska jeho geometrie (šířka a hloubka průvaru, šířka tepelně ovlivněné oblasti) a také velikosti napětí a deformace ve svařovaném materiálu.



Tepelné účinky oblouku

- Množství tepla vzniklého v jednotlivých oblastech oblouku je obecně úměrné příslušnému úbytku napětí a časovému účinku proudu (např. na anodě $Q_a = U_a \cdot I_s \cdot t$).
- Nejvíce tepla se proto vyvine v anodové oblasti (kde se přeměňuje kinetická energie dopadajících nosičů nábojů – elektronů na teplo), méně v oblasti katodové (katoda je ochlazována termoemisí elektronů) a nejméně ve sloupci oblouku.
- Teplota anody je o 200 °C až 500 °C vyšší než teplota katody.



Tepelné účinky oblouku

- Teplota oblouku a roztaveného kovu elektrody a základního materiálu patří k nejdůležitějším faktorům, které určují fyzikální, chemické a metalurgické vlastnosti svařovacího procesu.
- Na teplotě závisí stupeň disociace a ionizace plynu v oblouku, rozpustnost plynů v kovu, tavení elektrody a přenos kovu obloukem.
- Na tepelnou bilanci oblouku má rozhodující vliv směr proudění plazmy a přenos tepla vedeným mezi plazmou a roztavenou svarovou lázní.
- Teplota ve sloupci oblouku závisí kromě tepelného příkonu i na tepelné vodivosti plynu, ve kterém oblouk existuje a je tím vyšší, čím je horší odvod tepla, tzn. čím je tepelná vodivost okolí nižší.



Tepelné účinky oblouku

- Z plynů běžně se vyskytujících při svařování je tepelně nejméně vodivý argon, nejvodivější je oxid uhličitý.
- Proto při stejném tepelném příkonu a stejné délce má největší průměr sloupce a nejvyšší teplotu oblouk v argonu, nejmenší průměr sloupce a nejnižší teplotu oblouk v oxidu uhličitém.
- Maximální teploty oblouku jsou ve středu a k okraji klesají.



Tepelné účinky oblouku

- Při svařování obalenou elektrodou se teplota oblouku pohybuje mezi 4200 °C až 6400 °C, při svařování pod tavidlem 6200 °C až 7800 °C, v ochranné atmosféře WIG 6500 °C až 9000 °C a u svařování MIG/MAG se teploty pohybují v rozmezí 8000 °C až 15000 °C.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. Technologie svařování a zařízení. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 38.



Tepelné účinky oblouku

- Při svařování tavící se elektrodou je tepelná účinnost procesu vždy vyšší než u metody WIG, neboť teplo vzniklé na elektrodě se neztrácí, využije se k roztavení přídavného materiálu, který přechází ve tvaru kapek do svarového kovu.



Mechanismy, které se podílejí na přenosu energie oblouku do svarového kovu

- přímé vybavení tepla na základním materiálu,
- přenos tepla proudem žhavé plazmy a pohlcení části energie záření oblouku,
- přenos tepla z elektrody do svarové lázně kapkami kovu,
- teplo získané přeměnou z kinetické energie dopadajících kapek kovu.



Mechanické účinky oblouku

- ▶ Mechanické účinky oblouku se projevují značným silovým působením na tavnou lázeň a tím dávají předpoklad dosažení hlubokého závaru.
- ▶ Nevýznamnější vlivy jsou:
 - ▶ síla proudu plazmy sloupce oblouku vytvářející tlak, který směřuje kolmo na povrch svarové lázně, stlačuje její střed a přispívá ke zvyšování poměru hloubky a šířky svarové housenky (nejvyššího tlaku se dosahuje u svařování v CO_2 , nejnižšího u He),
 - ▶ kinetická energie kapek roztaveného přídavného materiálu přenášených a urychlovaných proudem plazmy,
 - ▶ reaktivní tlak par unikajících z aktivní oblasti tavné lázně a tlak proudu kovových par z přehřátého povrchu elektrody.
- ▶ Na proudění tekutého kovu ve svarové lázni se podílejí ještě navíc elektromagnetické síly způsobené elektrickým proudem procházejícím tavnou lázní, síly povrchového napětí a vztlakové síly související s rozdílnou hustotou tekutého kovu.



Vliv magnetických polí na oblouk

- Kolem každého vodiče proudu a tedy i oblouku, kterým protéká elektrický proud, vzniká magnetické pole, které se projevuje svými silovými účinky především v oblasti elektrického oblouku.

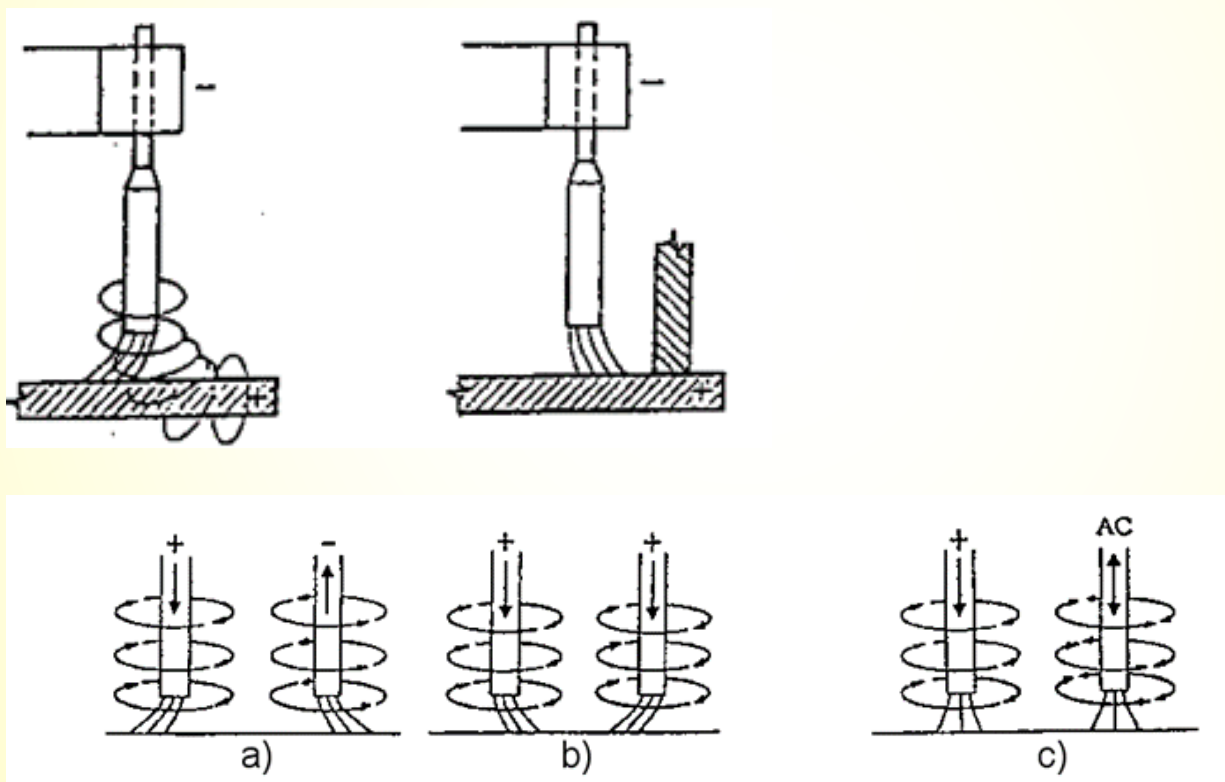


Foukání oblouku

- Vzhledem k malé tuhosti oblouku jako plynného a velmi pružného vodiče elektrického proudu mohou mít i malé síly magnetického pole, za následek vychylování elektrického oblouku od směru osy elektrody v rozsahu majícím nepříznivý vliv na tvorbu svarové housenky.
- Důsledkem je potom nevzhledný a nekvalitní svar.
- Tento jev se nazývá foukání oblouku a příčinou je jednak magnetické pole vznikající kolem každého vodiče proudu, ale též nerovnoměrné rozdělení proudu ve svařovaném předmětu a členitost svařované konstrukce. Zmírnění nepříznivých důsledků tohoto jevu se dá dosáhnout umístěním přívodní svěrky co nejbližší k místu svařování, nakloněním elektrody proti směru foukání oblouku apod.
- Při svařování střídavým proudem jsou obtíže s foukáním oblouku podstatně menší než u proudu stejnosměrného.



Magnetické foukání oblouku



Popis:

- a) při nevhodném, připojení uzemňovacího kabelu,
- b) při svařování blízko žeber,
- c) u dvou oblouků vedle sebe



Otázky k zamyšlení

1. Vysvětlete podstatu elektrického oblouku a podmínek jeho vzniku.
2. Jaké jsou způsoby zapalování elektrického oblouku?
3. Popište základní části elektrického oblouku.
4. Jak a čím hodnotíme stabilitu elektrického oblouku?
5. Popište druhy přenosu kovu elektrickým obloukem.
6. Které síly a jak působí na kapky roztaveného kovu přenášené obloukem?
7. Které faktory ovlivňují směr působení elektromagnetické síly v oblouku?
8. Jak se projevují tepelné účinky elektrického oblouku?
9. Popište mechanické účinky elektrického oblouku.
10. Co je „foukání oblouku“ a čím je způsobeno?



Doporučená literatura a informační zdroje

- AMBROŽ, O. A KOL. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. Technologie svařování a zařízení. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011, 242 s.