



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI REGULACE TEPLA VNESENÉHO DO SVARU PŘI MIG/MAG SVAŘOVÁNÍ

POSSIBILITIES OF HEAT TRANSFER REGULATION WHILE MIG/MAG WELDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PAVLA MÁŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavla Mášová

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 kkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti regulace tepla vneseného do svaru při MIG/MAG svařování

v anglickém jazyce:

Possibilities of heat transfer regulation while MIG/MAG welding

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní svařovací zdroje pro svařování v ochranných nebo aktivních atmosférách umožňují regulovat teplo vnesené do svaru nejen pomocí základních svařovacích parametrů (U, I, v), ale i změnou jejich hodnot v závislosti na čase, případně kombinací s jinými svařovacími technologiemi.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je shrnutí nejnovějších speciálních technologií umožňujících regulaci tepla vneseného do svaru u různých výrobců svařovací techniky, rozsah možností, porovnání.

Seznam odborné literatury:

1. Kolektiv autorů. 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. KŘÍŽ, R. a VÁVRA P. Strojírenská příručka. Praha:
SCIENTIA. 1998. Svazek 8. 251 s. ISBN 80-7183-054-2

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 27.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Mášová Pavla: Možnosti regulace tepla vneseného do svaru při MIG/MAG svařování.

Projekt vypracovaný v rámci bakalářského studia oboru 2307 předkládá metody, kterými je možno regulovat množství tepla vneseného do svaru při MIG/MAG svařování. K tradičním způsobům regulace tepla patří pulzní svařování. Ostatní metody byly vyvinuty firmami vyrábějícími svařovací zdroje. Firma Kemppi nabízí pro regulaci tepla metodu Fast Root, metody Rapid Arc a Rapid Melt vyvinula firma AGA AB a firma Lincoln Electric nabízí metodu Surface Tension Transfer. Snížením vneseného tepla do svaru ocel-hliník se zabývají metody Cold Metal Transfer firmy Fronius a ColdArc od firmy EWM.

Klíčová slova: MIG/MAG svařování, specifické vnesené teplo, pulzní svařování, Fast Root, Rapid Arc, Rapid Melt, Surface Tension Transfer, Cold Metal Transfer, ColdArc.

ABSTRACT

Mášová Pavla: Possibilities of heat transfer regulation while MIG/MAG welding.

The project is elaborated in terms of bachelor's studies of branch 2307. The project is submitting possibilities of heat transfer regulation while MIG/MAG welding. Energy storage welding is a conventional method of heat regulation. Other methods were developed by company producing welding unit. A company Kemppi offers a method Fast Root for the heat regulation, methods Rapid Arc and Rapid Melt were developed by AGA AB and company Lincoln Electric offers a method Surface Tension Transfer. Method Cold Metal Transfer by Fronius company and ColdArc by EWM company are used for reduction of heat transfer into the weld steel-aluminium.

Keywords: MIG/MAG welding, heat transfer, energy storage welding, Fast Root, Rapid Arc, Rapid Melt, Surface Tension Transfer, Cold Metal Transfer, ColdArc.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MÁŠOVÁ, P. *Možnosti regulace tepla vneseného do svaru při MIG/MAG svařování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 15.5.2009

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1. ÚVOD	8
2. CHARAKTERISTIKA PROCESU MIG/MAG (GMAW)	9
2.1. Definice procesu, principy	9
2.2. Výhody MIG/MAG svařování	10
2.3. Parametry svařování	11
2.4. Ochranné plyny – stručná charakteristika.....	12
3. Q_s SPECIFICKÉ VNESENÉ TEPLLO	13
3.1. Příklady výpočtů vneseného tepla u různých způsobů svařování	13
3.2. Celkový průběh šíření tepla v základním materiálu	15
3.3. Typy vad	17
4. MOŽNOSTI REGULACE Q_s	20
4.1. Pulzní svařování	20
4.2. Rapid	22
4.2.1. Rapid Arc	22
4.2.2. Rapid Melt	22
4.3. Fast Root	23
4.4. Surface Tension Transfer (STT).....	26
4.5. Cold Metal Transfer (CMT).....	29
4.6. ColdArc.....	31
5. ZÁVĚRY	34

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

1. ÚVOD:

V současné době se MIG/MAG svařování používá téměř pro všechny svařečské operace. Nejčastějšími uživateli jsou těžký a střednětěžký průmysl, například při stavbě lodí, ocelových konstrukcí, při spojování trubek a tlakových nádob, nebo v opravárenství a při údržbě. MIG/MAG se také často používá v automobilovém průmyslu při svařování karoserií.

V Evropě se pro MIG/MAG svařování používají směsi bohaté na argon, oproti tomu v Japonsku se až z 80 % používá oxid uhličitý. S výhodou se CO₂ používá pro nižší cenu, nižší tepelné záření, nižší obsah difuzního vodíku, lepší průvar atd. V argonu se lépe zapaluje oblouk a má vyšší stabilitu, teplota hoření oblouku je však vyšší. [1]

Do místa svaru a jeho okolí je vnášeno velké množství tepla, které vzniká při hoření oblouku mezi základním materiálem a koncem elektrody. Množství vneseného tepla výrazně ovlivní kvalitu svaru. Příliš velké množství tepla způsobí například zhrubnutí zrna a snížení vrubové houževnatosti. Naopak malé množství tepla vede k neprovaření svaru a vzniku trhlin.

Pro potřebu regulace množství vneseného tepla do svaru, vyvinuly firmy zabývající se výrobou svařovacích zdrojů několik způsobů regulace vneseného tepla. Práce se věnuje pulznímu svařování, metodám Rapid Arc a Rapid Melt vyvinutými firmou AGA AB, metodě Fast Root od firmy Kemppi, metodě Surface Tension Transfer firmy Lincoln Electric a metodám zaměřeným především na svařování spojů ocel-hliník Cold Metal Transfer od firmy Fronius a metodě ColdArc od firmy EWM.

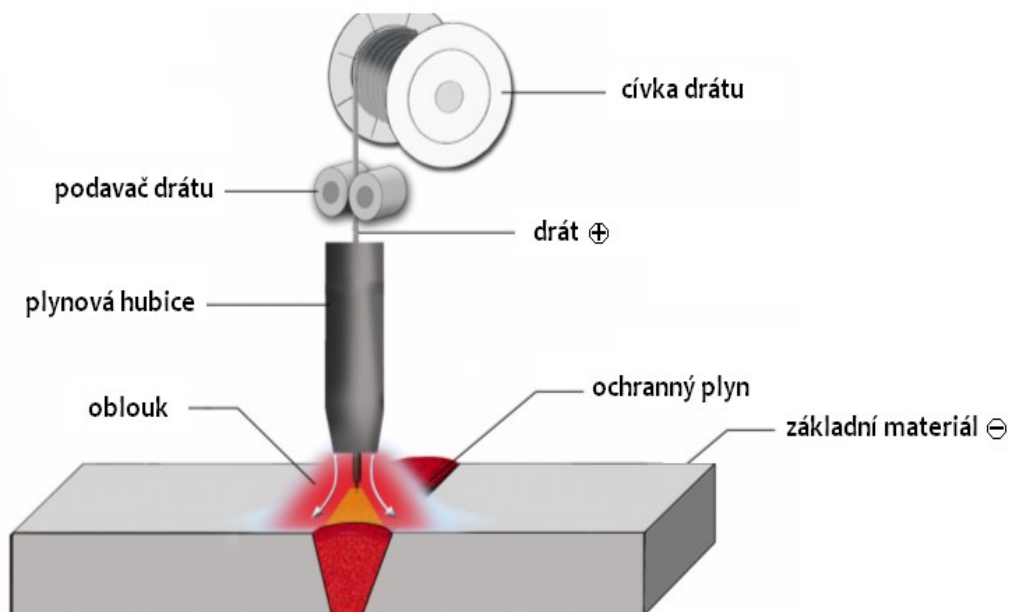
2. CHARAKTERISTIKA PROCESU MIG/MAG (GMAW)

V dnešní době se podle názvosloví AWS (American Welding Society) pro metodu MIG/MAG používá označení GMAW (Gas Metal Arc Welding) tedy obloukové svařování kovů v plynové atmosféře. Zkratka MIG (Metal Inert Gas) lze přeložit jako svařování za použití inertního neboli netečného plynu (Ar, He, ...). MAG (Metal Activ Gas) přeložíme jako svařování za použití aktivního plynu (O₂, CO₂, ...). Zkratka MIG/MAG napovídá, že se jedná o metodu svařování za použití směsi inertního a aktivního plynu. Tato metoda je nejrozšířenější metodou svařování v Evropě, USA a Japonsku.

2.1. Definice procesu, principy

IIW (International Institut of Welding) (IIW Doc. XII.-214-64) **definuje** svařování v ochranném plynu tavící se elektrodou jako: „svařovací proces, při kterém se vzájemné spojení materiálů tvoří teplem elektrického oblouku, který hoří mezi přídavným materiálem (tavící se elektrodou) s kladným elektrickým nábojem a základním materiálem se záporným nábojem. Ochrana se dosahuje plynem, směsí plynů, nebo směsí plynů a tavidlem“. [1]

V celosvětovém měřítku patří metoda MAG — svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu a svařování obalenou elektrodou k nejrozšířenějším metodám svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Do popředí se dostává metoda MIG — svařování v inertním plynu. Metody MIG/MAG se rozšiřují díky širokému výběru přídavných materiálů, ochranných plynů, svařovacích zařízení s možností využití mechanizace a automatizace.



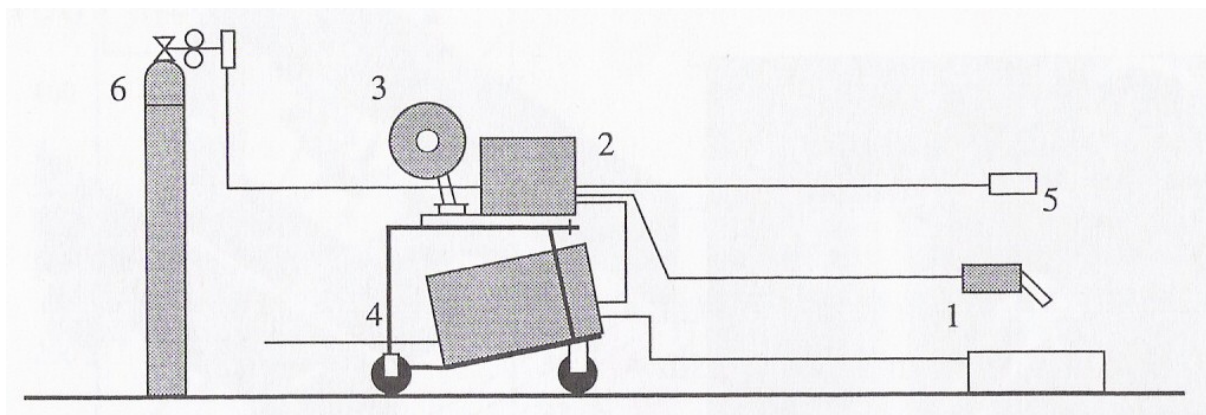
Obr. 1: Schéma svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou [2]

Princip metody MIG/MAG (obr. 1) je založen na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou v podobě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře směsi inertního a aktivního plynu. Napájení drátu elektrickým proudem s kladným nábojem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku tzv. špičce. Elektricky zatížená délka drátu (výletu) má být co nejkratší. Drát (nekonečná elektroda) je podáván např. dvoukladkovým podávacím systémem z cívky o běžné hmotnosti 15 kg.

Vedení hořáku rozděluje svařování na poloautomatizované (ruční) a automatizované.

U *poloautomatizovaného* svařování se využívají tato zařízení (obr. 2): svařovací hořák (1), podávací zařízení (2), zásobník elektrody (3), svařovací zdroj (4), řídicí jednotku (5), lahve s ochranným plynem a regulátorem, ohřívačem a průtokoměrem (6).

Plně automatizované svařování má v podstatě stejné části, jen vedení hořáku je mechanizované. Často se pro vedení hořáku využívají roboty.



Obr. 2: Schéma poloautomatického svařování [1]

Nejširší uplatnění je v současnosti při ručním a mechanizovaném svařování nízkouhlikových, nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, při použití směsného plynu argonu s oxidem uhličitým. [1]

2.2. Výhody MIG/MAG svařování: [3]

- svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm,
- minimální tvorba strusky,
- přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně,
- vysoká efektivita, nekonečná elektroda (nevznikají nedopalky),
- snadný start oblouku bez nárazu svařovacího drátu do svařence,
- velmi dobrý profil svaru a hluboký průvar,
- malá tepelně ovlivněná oblast především u vysokých rychlostí svařování,
- vysoká proudová hustota,
- vysoký výkon odtavení,
- široký proudový rozsah pro jeden průměr drátu,
- stabilní plynová ochrana (různé varianty kombinací plynů) umožňující diferencované typy přenosu kovu v oblouku a ovlivnění mechanických vlastností svarů,
- nízká pórovitost,
- malý nebo žádný rozstřík kovu elektrody,
- snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systémů svařování.

2.3. Parametry svařování

Pro metodu MIG/MAG je charakteristické vysoké proudové zatížení elektrod (\varnothing 0,8 až 1,6 mm). Měrné proudové zatížení je nejvyšší ze všech obloukových metod a pohybuje se v rozsahu 180 až 700 A.mm⁻², u tenkých plechů až 800 A.mm⁻². V porovnání s ručním svařováním obalenou elektrodou, kde dosahuje rozmezí 20 až 30 A.mm⁻². Průměr elektrod není přímo úměrný proudové hustotě, tzn. elektroda s menším průměrem je zatížena vyšší proudovou hustotou. Může se dosáhnout vysokých výkonů odtavení při použití malých průměrů elektrod, což patří k hlavním výhodám této metody. Svařováním vysokými proudy se dosáhne rychlosti svařování až 25 mm.s⁻¹.

Parametry svařování a ochranné plyny ovlivní charakter přenosu kovu v oblouku. U tenkých plechů používáme zkratového, u větších tloušťek sprchového přenosu. Charakter přenosu se vlivem elektromagnetických sil vysokého proudu změní a dosáhne rotujícího oblouku.

Teplota tavné lázně se pohybuje od 1600 do 2100 °C, ovlivňují ji vlastnosti materiálu, chemické složení, zvolená technologie a nastavené parametry svařování.

2.4. Ochranné plyny – stručná charakteristika

Ochranné plyny chrání před okolní atmosférou roztavený konec elektrody, tekutou kapku kovu a lázeň především před vzdušným kyslíkem, který ve svaru způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků. Volbu ochranného plynu výrazně ovlivní svařovaný materiál. Zvolený ochranný plyn výrazně ovlivní stabilitu oblouku, typ přenosu kovu v oblouku, vytvoření svarové housenky, chování tavné lázně, hloubku závaru, rychlost svařování, ale také všechny metalurgické reakce v oblouku, kapce, tekutém kovu a mezi tekutým kovem a struskou.

V dnešní době se používají jedno nebo vícesložkové plyny. Na svarovou lázeň působí plyny vlivem neutrálním, oxidačním nebo nahličujícím. Volbu ovlivňují jak technické, tak i ekonomické ukazatele. Dříve se používal hlavně jednosložkový, ekonomicky výhodný oxid uhličitý. Dnes jsou časté směsi argonu s oxidem uhličitým nebo kyslíkem.

Argon (Ar) je inertní plyn, chemicky nereagující, nehořlavý, netoxický a bezbarvý. Pro svařování se používá v čistotě nad 99,95%. Má velmi dobrou tepelnou vodivost a elektrický oblouk, který hoří v argonu má potom vysokou teplotu. Na svařování tavící se elektrodou se čistý argon používá zřídka, obvykle v kombinaci s jiným plynem. Při svařování v ochraně argonu je potřeba méně energie, aby se argon stal elektricky vodivým, proto se oblouk v argonu lépe zapaluje a hoří stabilněji i při nízkém napětí.

Hélium (He) podobně jako argon, je inertním plynem a na svařování se používá v čistotě minimálně 99,996 %. Hélium má na rozdíl od argonu nízkou atomovou hmotnost a tím i nízkou hustotu. Proto je při svařování potřebné aplikovat vyšší výtokovou rychlost, čímž se dosáhne odpovídající ochrany. K dalším vlastnostem hélia patří vyšší ionizační energie, vyšší než u ostatních plynů používaných při svařování, které způsobuje obtíže při zapalování oblouku. Vysoká ionizační energie je příčinou i horší stability hoření oblouku, hlavně při delším svařovacím oblouku. Prakticky se uplatňuje hlavně při procesu MIG/MAG, směs Ar + He při svařování Al, Ni, Cu a jejich slitin.

Kyslík (O₂) i když je sám nehořlavý, podporuje hoření hořlavých materiálů. Při MIG/MAG se velmi často přidává do jiných plynů, hlavně do argonu. Už 1 až 3 % O₂ v Ar má výrazný metalurgický efekt ve svarovém kovu. V obsahu do 8 % O₂ se používají při svařování konstrukčních ocelí. Protože body varu Ar a O₂ jsou velmi blízké (- 185,9 a - 183 °C), oba plyny se vyrábí i jako jejich tekutá směs. Kyslík je i součástí trojitě směsi s Ar a CO₂.

Oxid uhličitý (CO₂) je bezbarvý, netoxický a nehořlavý plyn. Může se používat samostatně nebo v kombinaci s ostatními plyny. Svařování v čistém CO₂ se s výhodou používá hlavně u zkratového procesu nižšími proudy při svařování nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí. Neumožňuje svařování sprchovým přenosem. V současnosti se používá v početných kombinacích s jinými plyny, hlavně s Ar. [1]

3. Q_s SPECIFICKÉ VNESENÉ TEPLLO

„Rychlost změny teplot vyskytující se při svařování v okolí svaru způsobuje to, že ve svarovém kovu a základním materiálu probíhají složité metalurgické procesy. Na základě transformačních diagramů je možno určit výslednou strukturu kovu po svařování. Problém je v tom, že transformační diagramy neexistují pro všechny materiály. Proto se pro některé materiály určuje přípustné množství přivedené energie při zachování určité svařovací rychlosti, která zaručuje, že docílíme požadované struktury. Kromě hodnoty specifického vneseného tepla Q_s se stanovuje např. velikost předehřívací teploty svařence a postup svařování.“ [4]

Specifické vnesené teplo Q_s:

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} [kJ \cdot mm^{-1}]$$

Q_sspecifické vnesené teplo [kJ·mm⁻¹],
 η tepelná účinnost přenosu tepla [-],
 U svařovací napětí [V],
 I svařovací proud [A],
 v_s rychlost svařování [mm·s⁻¹].

Celková tepelná účinnost η :[3]

$$\eta = \frac{Q_{sv}}{Q_{cel}}$$

Q_{sv} energie vnesená do svarového spoje [J],
 Q_{cel} celková energie oblouku [J].

Při svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře je účinnost vyšší z důvodu přenosu tepla kapkami elektrody a při vyšším obsahu CO₂ i akumulací tepla do molekul CO₂. Tepelné ztráty jsou menší také u metody ROE nebo APT, kde je oblouk krytý částečně nebo úplně tavícím se obalem nebo tavidlem. Příklady účinností jednotlivých způsobů svařování viz. tab. 1.

technologie svařování	η
MMAW (ROE)	0,70 – 0,85
GTAW (TIG,WIG)	0,48 – 0,65
GMAW (MIG,MAG)	0,66 – 0,75
APT (SAW)	0,90 – 0,99
ESS	0,90 – 0,99

Tab. 1: Hodnoty koeficientu účinnosti η pro jednotlivé technologie [5]

3.1. Příklady výpočtů vneseného tepla u různých způsobů svařování [6]

Pro porovnání jsou zde uvedeny výpočty vneseného tepla pro klasické svařování MIG/MAG, pulzní svařování a svařování obalenou elektrodou.

Pro výpočty byly zvoleny hodnoty odpovídající nejmenšímu možnému průměru elektrody pro danou technologii. Pro MIG/MAG a pulzní svařování zvolen průměr elektrody 0,8 mm, pro svařování obalenou elektrodou zvolen průměr 1,6 mm. Všechny porovnávané metody mají stejnou rychlost svařování v_s = 2 mm·s⁻¹.

Klasické svařování MIG/MAG – zvolené hodnoty pro elektrodu $\varnothing = 0,8$ mm:

tepelnou účinnost přenosu tepla	$\eta = 0,7$,
svařovací proud	$I = 100$ A,
svařovací napětí	$U = 19$ V,
rychlost svařování	$v_s = 2$ mm·s ⁻¹ .

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} = 0,7 \frac{100 \cdot 19}{10^3 \cdot 2} = 0,665 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Pulzní svařování MIG/MAG – zvolené hodnoty pro elektrodu $\varnothing = 0,8$ mm a impulz trvajících 50 % doby svařovacího cyklu:

tepelnou účinnost přenosu tepla	$\eta = 0,7$,
svařovací proud impulzu	$I_p = 100$ A,
svařovací proud základu	$I_b = 20$ A,
svařovací napětí	$U = 19$ V,
rychlost svařování	$v_s = 2$ mm·s ⁻¹ .

$$Q_{sp} = \eta \frac{U \cdot I_p}{10^3 \cdot v_s} = 0,7 \frac{100 \cdot 19}{10^3 \cdot 2} = 0,665 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad Q_{sb} = \eta \frac{U \cdot I_b}{10^3 \cdot v_s} = 0,7 \frac{20 \cdot 19}{10^3 \cdot 2} = 0,133 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$Q_s = \frac{Q_{sp} + Q_{sb}}{2} = 0,399 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Ruční svařování obalenou elektrodou – pro elektrodu $\varnothing = 1,6$ mm volíme:

tepelnou účinnost přenosu tepla	$\eta = 0,8$,
svařovací proud	$I = 40$ A,
svařovací napětí	$U = 27$ V,
rychlost svařování	$v_s = 2$ mm·s ⁻¹ .

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} = 0,8 \frac{40 \cdot 27}{10^3 \cdot 2} = 0,432 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Při klasickém způsobu je svar zatížen po celou dobu svařování proudem 100 A a vnesené teplo dosahuje hodnoty 0,665 kJ·mm⁻¹.

U pulzního svaru, se střídáním proudu impulzu $I_p = 100$ A a proudu základu $I_b = 20$ A v poměru 50 : 50 doby svařovacího cyklu, do místa svaru vnáší střídavě teplo 0,665 a 0,133 kJ·mm⁻¹. Vysledně se do svaru dodá specifické teplo o hodnotě 0,399 kJ·mm⁻¹.

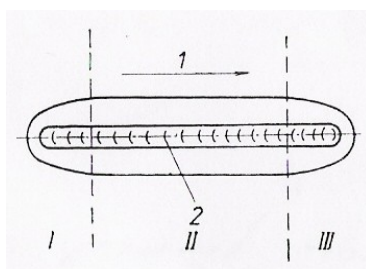
Svařování obalenou elektrodou využívá nižší hodnoty proudu a větší průměr elektrody oproti předchozím metodám. Za těchto podmínek vnesené teplo dosahuje hodnoty 0,432 kJ·mm⁻¹.

Nejméně vneseného tepla do svaru se dodá při pulzním svařování, díky střídání velikosti proudu základu a proudu impulzu.

3.2. Celkový průběh šíření tepla v základním materiálu

Průběh šíření tepla v základním materiálu probíhá ve třech etapách (obr. 3):

- I. **Tepelné sycení materiálu** – nárůst teploty.
- II. **Tepelná rovnováha** – všechna místa ve stejné vzdálenosti od osy svaru jsou stejně tepelně ovlivněné (ustálené pohyblivé teplotní pole – rychlost je rovna rychlosti svařování).
- III. **Etapa vyrovnávání teplot** – po skončení svařování dojde k vyrovnání teploty na průměrnou hodnotu v celém objemu základního materiálu.



Obr. 3: Schéma šíření tepla v okolí svaru; 1 - směr svařování, 2 - svařovací housenka; I - tepelné sycení, II - tepelná rovnováha, III - vyrovnání teplot [7]

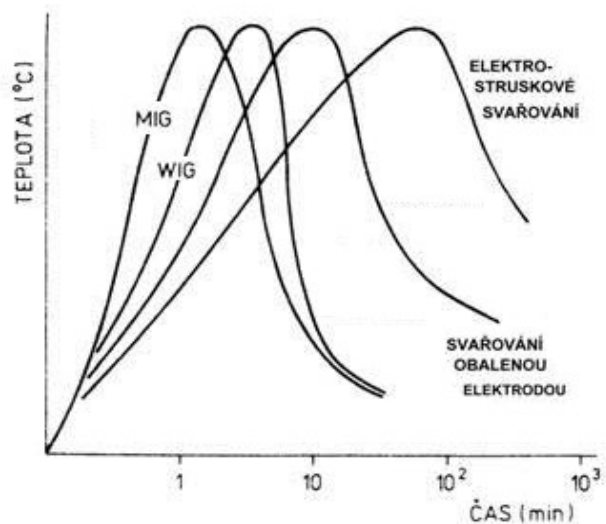
Doba sycení základního materiálu je závislá na:

- tloušťce materiálu,
- tepelně fyzikálních vlastnostech základního materiálu,
- technologii svařování.

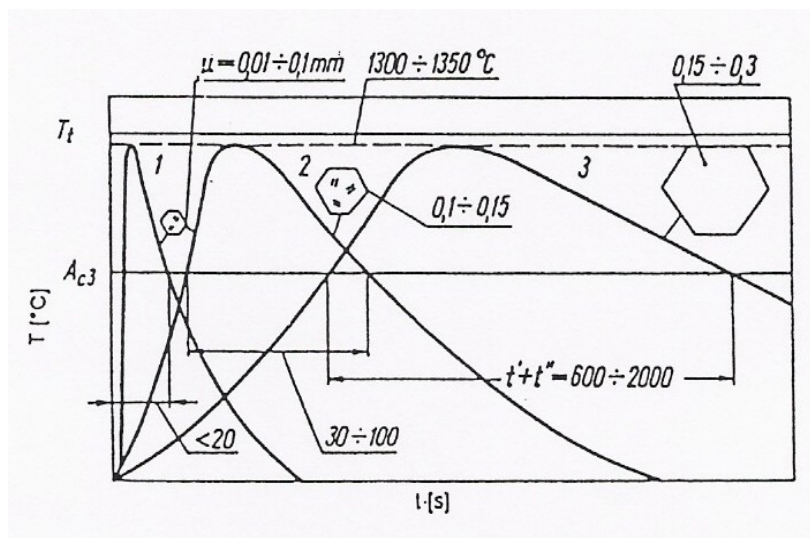
Rozhodujícími vlivy na vnesené teplo do základního materiálu jsou tepelné poměry v etapě tepelné rovnováhy. Sledování, umožní zjednodušit složité výpočty teplotního pole a teplotního cyklu.

Nejdůležitější parametry teplotního pole, které mají vliv na stanovení vlivu vneseného tepla při svařování do základního materiálu, jsou: teplota v libovolném bodě tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje, dosažená maximální teplota a okamžitá rychlost ochlazování. [7]

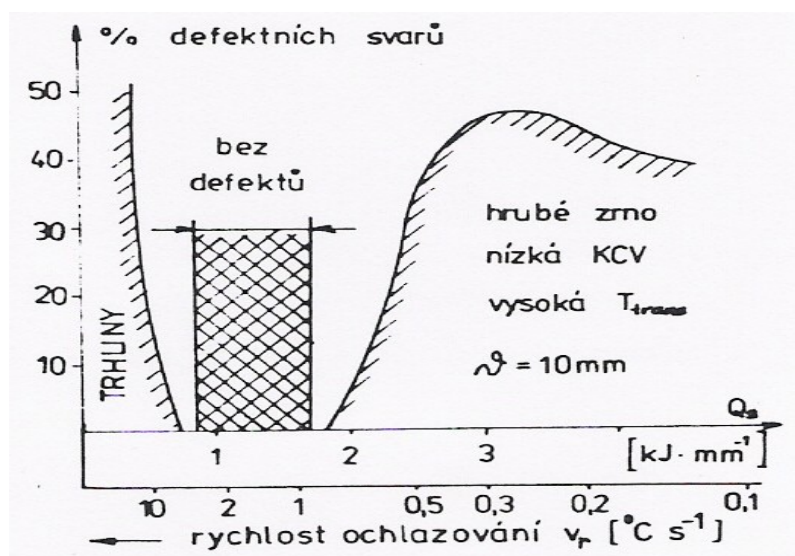
Metoda MIG má nejkratší teplotní cyklus (obr. 4). Svarový kov není izolován vrstvou strusky a průvar má malou hloubku. Není možné vždy dodržet tento krátký teplotní cyklus. Pro případy svařování větších průřezů se používají měděné nebo ocelové podložky, které pomáhají rychleji ochlazovat. Podložky se používají i při svařování tenkých plechů. Chladit se může také ofukováním kořene svaru ochranným plynem s nižší chemickou čistotou. Pomalým ochlazováním může vznikat nežádoucí hrubé zrna. Na obr. 5 je znázorněn růst hrubého zrna v porovnání s různou rychlostí ochlazování u tří způsobů svařování.



Obr. 4: Teplotní cykly pro různé způsoby obloukového svařování [4]



Obr. 5: Růst zrna při svařování; 1-ROS, 2-APT, 3-ESS [5]



Obr. 6: Vliv v_r a Q_s na jakost svaru [8]

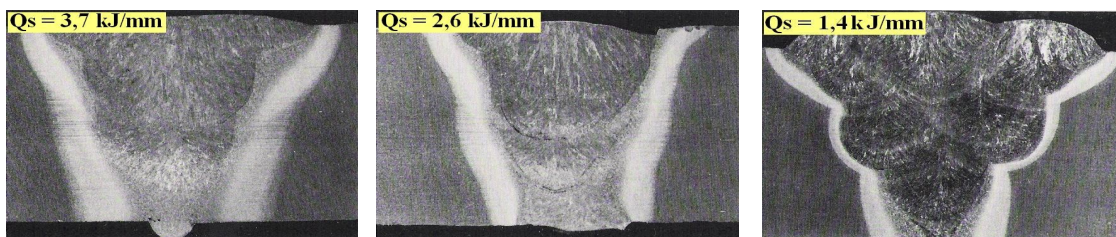
Naopak příliš rychlý krystalizační proces, je předpokladem vzniku trhlin (obr. 6). Způsobené tím, že svařovaná konstrukce je tužší než svarový kov. Ve svarovém kovu tak vznikají tepelná napětí, která vytvoří trhlinu překročením meze pevnosti ihned po svaření, nebo po mechanickém zatížení.

3.3. Typy vad

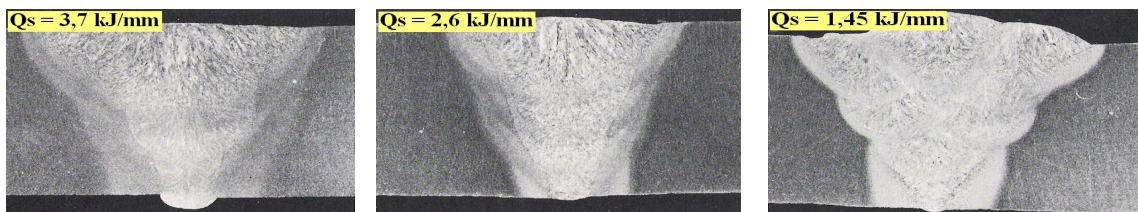
Vady vyskytující se při svařování, rozdělené podle geometrie:

- **trhliny:** vznikají v TOO základního materiálu i ve svarovém kovu,
- **dutiny:** vznikají uzavřením plynu ve svarovém kovu (malé dutiny označujeme jako póry),
- **vměstky:** pevné látky, vznikají ve svarovém kovu,
- **chyby spojů:** nedostatečné natavení svarových ploch, nedostatečný průvar (studený spoj), tvarové chyby (vruby, zářezy, zápaly, ...). [4]

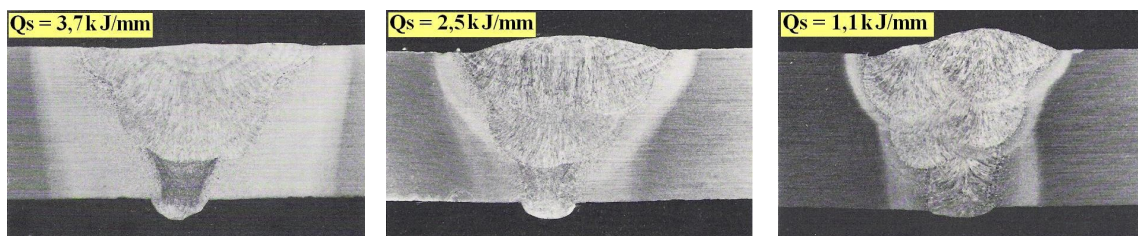
Na následujících obrázcích 7 až 9 je uvedeno několik příkladů materiálů s různými hodnotami vneseného tepla. Na obrázcích 10 a 11 jsou navíc znázorněny změny tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od osy svaru. U uvedených materiálů St E 70 (NiCrMo) a St E 70 (NiCrMoB) v oblasti tepelně ovlivněné oblasti dochází k prudkému nárůstu tvrdosti.



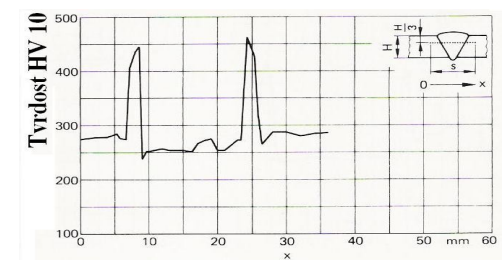
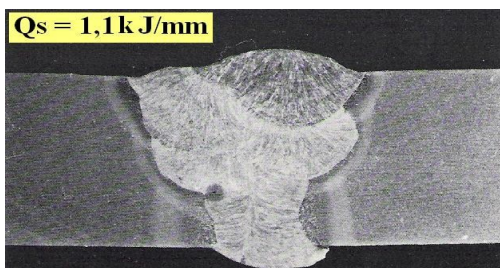
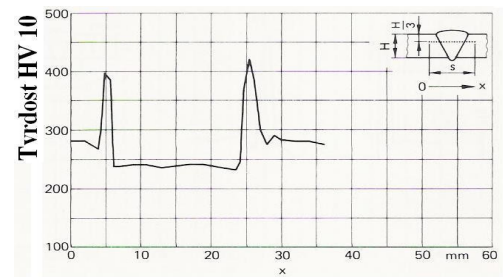
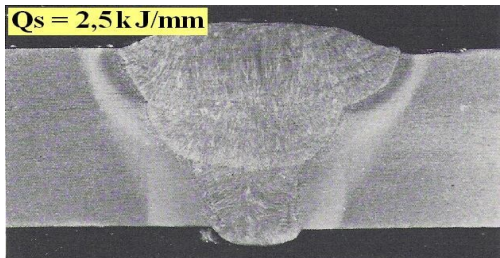
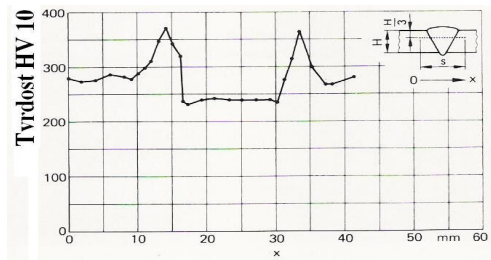
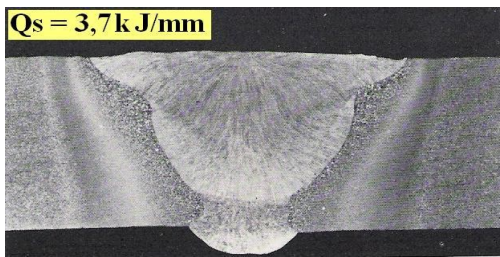
Obr. 7: Materiál 10 CrMo 9 10 s různými hodnotami vneseného tepla [9]



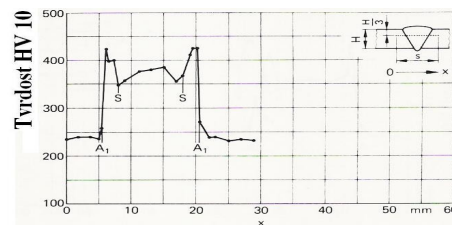
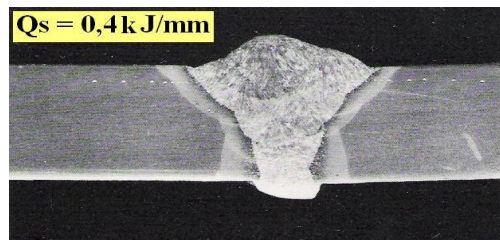
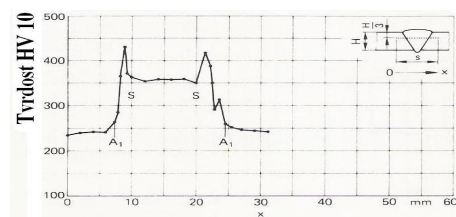
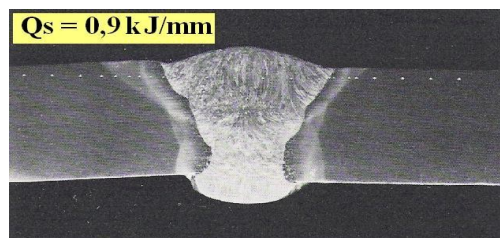
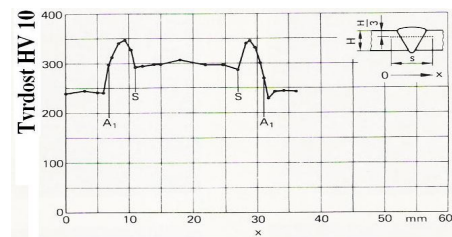
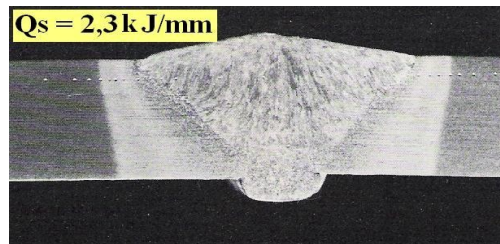
Obr. 8: Materiál 15 Mo 3 s různými hodnotami vneseného tepla [9]



Obr. 9: Materiál St E 47 s různými hodnotami vneseného tepla [9]

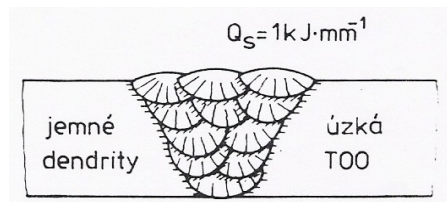


Obr. 10: Materiál St E 70 (NiCrMoB) s různými hodnotami vneseného tepla, změny tvrdosti v místě svar [9]

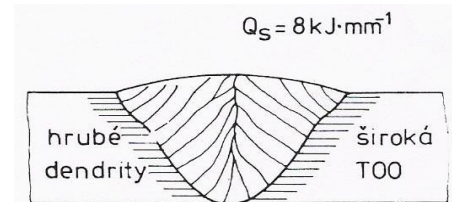


Obr. 11: Materiál St E 70 (NiCrMo) s různými hodnotami vneseného tepla, změny tvrdosti v místě svaru [9]

Kolem hodnoty $Q_s = 1 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ vneseného tepla dochází k menšímu tepelnému ovlivnění základního materiálu. Položením několika vrstev svarových housenek vznikají menší dendrity. Tyto dendrity (obr. 12) mohou způsobit větší deformaci svařovaného materiálu, než při položení jedné svarové housenky. Kolem hodnoty $Q_s = 8 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ vneseného tepla vznikají větší dendrity se širším pásmem tepelně ovlivněné oblasti (obr. 13). Musí se zvolit vhodná rychlost ochlazování a množstvím vneseného tepla Q_s tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností svaru.



Obr. 12: Jemné dendrity [8]



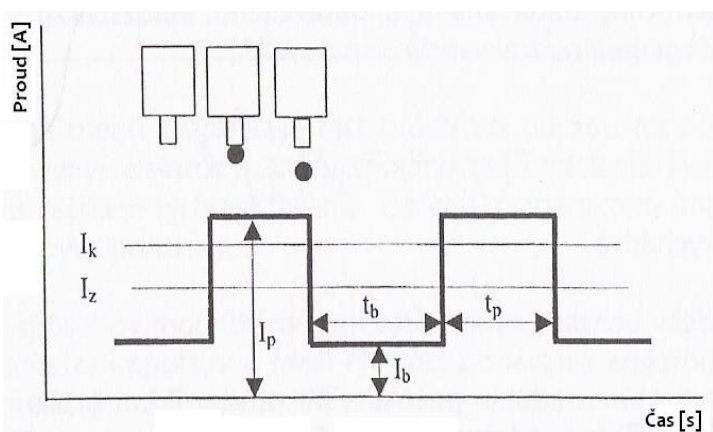
Obr. 13: Hrubé dendrity [8]

4. MOŽNOSTI REGULACE Q_s

Jak z předcházející kapitoly vyplývá, je velmi důležité řídit množství tepla přivedeného do svaru. Dále je popsáno několik metod nabízených českým trhem, které regulují a ve většině případů snižují množství vneseného tepla. Pouze u procesu Rapid Melt dochází ke zvýšení tepelného příkonu.

4.1. Pulzní svařování

Pulzní svařovací cyklus se používá u nízkouhlíkových ocelí za použití nízkých a středních hodnot svařovacích parametrů. Tento cyklus rozděluje střední energii oblouku na dvě různé energetické hladiny: impuls a základ. V okamžiku impulsu, svařovací parametry dosahují nadkritických hodnot, kde se tvoří a oddělují kapky tekutého kovu (obr. 14). Po oddělení kapky, není nutné setrvávat na nadkritických parametrech. Dojde k výhodnějšímu přechodu na nízké základní svařovací parametry, pomocí kterých se hlavně udržuje hoření oblouku, bez významného ohřevu elektrody a základního materiálu. Celková střední energie svařovacího procesu se pohybuje na úrovni hodnot klasického zkratového procesu svařování.



Obr. 14: Schématické znázornění průběhu svařovacího proudu při pulzním svařování [1]

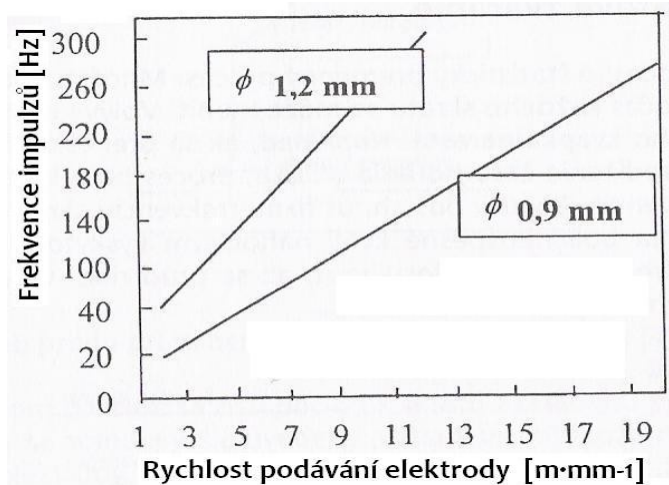
Pulzní režim svařování charakterizují pulzní parametry: I_p – proud impulsu, I_b – proud základu, I_z – střední hodnota proudu, I_k – kritická hodnota proudu, t_p – čas trvání impulsu, t_b – čas trvání základu. Aby bylo dosaženo stabilního procesu je nutné všechny parametry definovat v závislosti na rychlosti podávání elektrody v_p , směsi ochranných plynů, průměru a chemickém složení elektrody. Příklady nastavení proudu impulsů pro různé průměry elektrod jsou popsány v tabulce 2.

Průměr elektrody [mm]	Uhlíková ocel		Nerezová ocel	
	I_p [A]	t_p [ms]	I_p [A]	t_p [ms]
0,8	300	1,5	300	1,5
1,0	300	2,0	350	2,0
1,2	350	4,0	350	3,0
1,6	400	4,0		

Tab. 2: Typické parametry pulzního svařování [1]

Řízení přenosu kovu v oblouku musí zabezpečit, aby rozdělená energie dosahovala dostatečného proudového zatížení elektrody v čase impulzu, výkon musí mít vyšší hodnotu než je hodnota kritická. Naopak výkon v čase základu musí být minimální, ale dostačující na udržení oblouku.

Intervaly přenosu kovu nejsou závislé jen na svařovacích charakteristikách, musí být dobrženy i technologické podmínky. Jde především o přenos kovu formou jedna kapka na jeden impulz. Délka impulzu musí být tak velká, aby se odtavila jedna kapka o velikosti přibližně stejném jako je průměr elektrody. Základ musí trvat tak dlouho, aby se dosáhlo vhodné frekvence impulzů na zabezpečení konstantní délky oblouku, tzn. dojde ke sladění frekvence impulzů s rychlostí podávání elektrody o daném průměru (obr. 15). Rychlost přenosu kovu ovládaná frekvencí impulzů, musí být stejná jako rychlost tavení.



Obr. 15: Závislost frekvence impulzů na rychlosti podávání elektrody s průměrem 1,2 mm a 0,9 mm, ochranná atmosféra Ar + CO₂, čas impulzů cca 2 ms, proud impulzů 400 A, základní proud 40 A [1]

Hlavním úkolem základního proudu je udržet oblouk do další periody, má však vliv i na tavení každé kapky. Proto se často používá na regulaci množství kovu nataveného ve fázi impulzu.

Nárůst proudu z hodnoty základu na hodnotu impulzu ovlivňuje tavení elektrody i spolehlivost oddělení kapky. S vyšší rychlostí nárůstu proudu, roste i rychlost tavení. Z pohledu charakteru přenosu kovu velmi rychlý nárůst proudu nebývá příznivý.

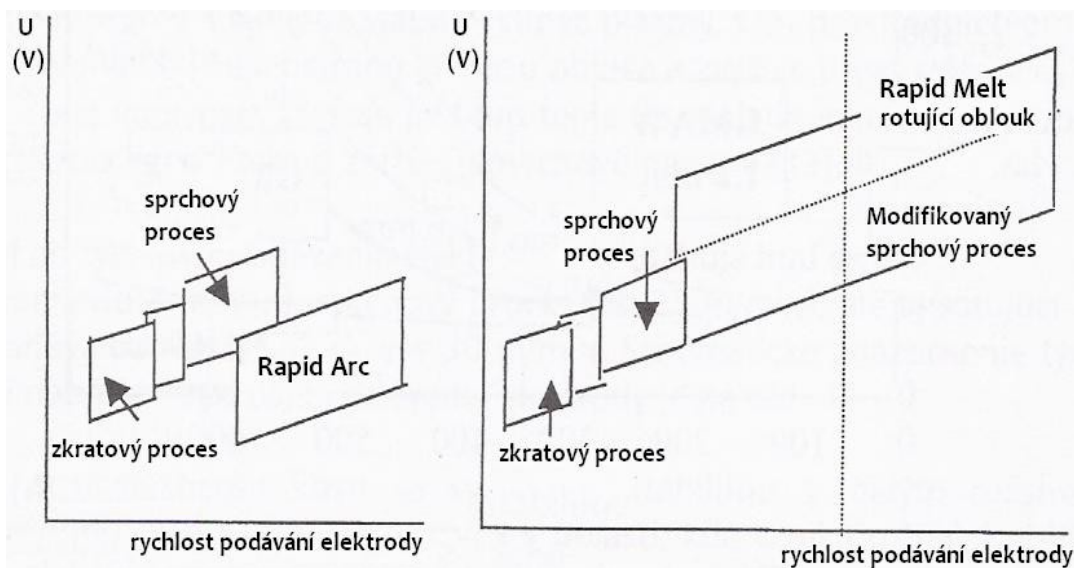
Konstantní parametry impulzů a změny rychlosti podávání elektrody je zajištěno několika způsoby regulace přes zpětnou vazbu. Podavač reaguje pomalu. Může reagovat na změnu délky oblouku jen tak rychle, jak rychle se podává elektroda. V dnešní době se používají dva hlavní způsoby regulace tavení, které udržují konstantní délku oblouku. Oba způsoby udržují konstantní rychlost podávání elektrody řízenou centrálně „jedním tlačítkem“.

První způsob mění proud impulzů. Změny tavení při každém impulzu jsou limitovány maximálním proudem impulzů na jedné straně a hladinou základního proudu na druhé straně. Změna je relativně pomalá, ale velmi stabilní.

Druhý způsob mění frekvenci impulzů. Je nejbližší tradičnímu způsobu MIG/MAG řízení. Mění průměrný proud tak, aby udržel konstantní délku oblouku. [1]

4.2. Rapid

Metoda Rapid byla vyvinuta firmou AGA AB. Dnes ji pro český trh nabízí firma Linde Gas a.s. Řadí se mezi vysokorychlostní svařování v ochranné atmosféře. Rozlišujeme dvě varianty metody Rapid, jsou to Rapid Arc a Rapid Melt. Pracují na společném principu a to na zvýšené rychlosti podávání elektrody nad $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a na využívání zvýšeného výletu elektrody od 20 do 35 mm, běžně se používá výlet 10 až 16 mm. Dosáhneme tak zvýšeného odporu a vyššího ohřátí konce elektrody. Vyšší výlet i rychlost podávání elektrody zvyšují výkon natavení svarového kovu. Používá směs ochranných plynů Ar + 8 % CO₂. Rapid Arc a Rapid Melt se vzájemně liší použitými parametry svařování a přenosem svarového kovu, jak je vidět na obr. 16.



Obr. 16: Charakteristiky procesů Rapid Arc a Rapid Melt [1]

4.2.1. Rapid Arc

Rapid Arc se pohybuje v rozsahu vyššího proudu a nižšího napětí za zkratového přenosu kovu. Oblouk je moderními zdroji „donucený“ chovat se zkratově i v oblasti, kde klasické svařování v CO₂ resp. Ar + CO₂ nemůžeme použít. Zvýší se tak výkon odtavení i ve zkratovém procesu. S výhodou se proto dá použít hlavně u svařování tenkých plechů s minimální tloušťkou 1 mm. V porovnání s konvenčním MIG/MAG svařováním dosahujeme nižší tepelný příkon. To způsobuje užší tepelně ovlivněnou oblast a menší deformace.

4.2.2. Rapid Melt

Rapid Melt se využívá při svařování vyššími proudy a napětím, s rychlostí podávání elektrody víc jak $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Způsob přenosu kovu záleží na velikosti napětí. U vyšších hodnot vzniká rotující oblouk, u nižších hodnot dochází ke sprchovému přenosu. Dosahujeme výkonu natavení až $25 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Tento proces se vyznačuje vyšším tepelným příkonem, pomalejším chladnutím, růstem zrn a poklesem plasticity v tepelně ovlivněné oblasti. [1]

4.3. Fast Root

Fast Root představila firma Kemppi jako svoji novinku roku 2005 na zářijovém veletrhu v Essenu. Je to metoda, využívající krátko-obloukového svařovacího procesu, vhodná především pro kořenové vrstvy a tenké plechy konstrukčních a nerezových ocelí. Uspadňuje práci svařeči, umožňuje svařování ve všech pozicích s žadáním průvarem a bez rozstřiku.

Podobně jako metoda STT dosahuje vyšší produktivitu než u běžného způsobu MIG/MAG a TIG svařování při zachování specifických charakteristik.

Princip Fast Root:

„Svařovací proces Fast Root digitálně řídí proud a napětí. Proces monitoruje zkrat a kontroluje správné načasování přenosu kapky kovu z přídavného drátu do svarové lázně. Způsob fungování procesu Fast Root je v tom, že se tvoří dva navzájem odlišné průběhy proudu. Tyto průběhy mohou být uvedeny jako stav zkratu a stav nárůstu proudu (obr. 17). Fast Root je upravený krátko-obloukový proces a nemůže být zaměněn s pulsním svařováním.“ [10]



Obr. 17: Proudová vlna procesu Fast Root v okamžiku přenosu kapky kovu do svarové lázně [10]

Během první fáze nárůstu proudu dojde k přenosu kapky kovu z elektrody do svarové lázně. Mezitím v druhé fázi vzroste výkon a zůstane na stanovené hladině (obr. 17). Před první fází dojde při krátkém nárůstu svařovacího proudu ke kontaktu drátu se svarovou lázní. Tzv. pinch efekt způsobený prudkým nárůstem proudu na předepsanou hladinu, umožní oddělení kapky v první fázi. Po oddělení dojde k mírnému poklesu proudu. Následuje nárůst proudu a vznik fáze hoření oblouku. Během druhé fáze dochází k formování svarové lázně a k přenosu tepelné energie do základního materiálu, která vytvoří žadání průvar v kořenové vrstvě. Fáze se neustále střídají a mezi nimi dojde k poklesu proudu na základní úroveň.

Jeden cyklus (oblast zkratu a oblast hoření „otevřeného oblouku“) přenosu kovu trvá přibližně 5 – 6 ms.

Elektronika svařovacího zdroje FastMIG Synergic a program Fast Root kontroluje a řídí hoření oblouku. Přes oblouk a zpětnou vazbu ovládací zařízení kontroluje okamžik oddělení kapky kovu. Bezrostřikového přechodu od zkratu k „otevřenému oblouku“ se dosáhne správným načasováním poklesu a nárůstu proudu. Oblouk je stabilní a svařovací proces snadno kontrolovatelný. Vhodným nastavením dynamiky oblouku a výšky základního proudu je možné ovlivnit profil kořene a plynulý přechod do svařovaného materiálu. Po svaření kořenové vrstvy je možné přepnout na běžný synergický program a použít stejný zdroj pro svařování výplňových a krycích vrstev svarového spoje.

Proces Fast Root je založen na synergických programech, tzn. rychlost podávání drátu a další parametry jsou sdružené do jednoho hlavního parametru a to do svařovacího výkonu. Proces využívá jednoduchou jednoknoflíkovou synergickou regulaci.

Výhody a vlastnosti Fast Root [11]:

- svařování kořenových vrstev vertikálně shora dolů (poloha PG),
- vynikající svařovací charakteristiky,
- bezrozstříkové svařování,
- snížení potřeby dokončovacích prací pro úpravu svaru → méně broušení,
- dobrý průvar,
- svařování ve všech pozicích,
- náročné práce mohou vykonávat i méně zkušené svařeči,
- dovoluje použít větší svarovou mezeru,
- vyšší rychlost svařování při svařování kořenových vrstev (o 10 % rychlejší než při MIG svařování, 3x rychlejší než při TIG svařování),
- menší množství vnesené tepelné energie do svaru (méně o 10 až 20 %) → menší deformace,
- nižší napětí – vyšší pevnost.

Procesem se odstraní rozstříku, tím se sníží náklady a zkrátí čas na dokončovací operace. Vyšší rychlosti svařování zajistí vyšší produktivitu svařování. Vysoká kvalita svaru uspoří čas i náklady na méně časté opravy.

Množství vneseného tepla do svaru je ovlivněno délkou oblouku.

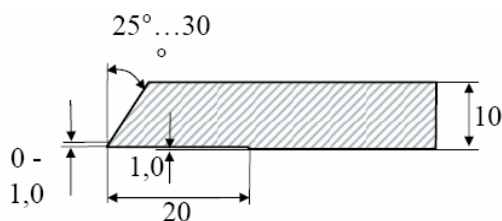
Použití procesu Fast Root:

Fast Root se používá především pro svařování kořenových vrstev, ale je vhodný i pro svařování tenkých plechů. Nejběžněji jsou svařovány materiály z konstrukční a nerezové oceli.

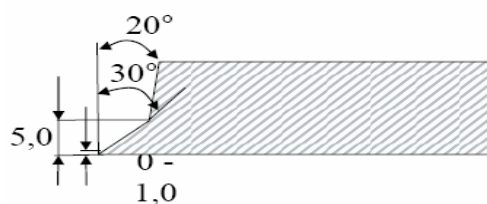
V současnosti se používá tento proces například ve firmě Ormen Lange v Norsku (druhá největší námořní plošina s největší délkou potrubí na světě).

Příprava svarových ploch při svařování kořenové vrstvy a tenkých plechů:

Volí se minimální otupení od 0 do maximálně 1 mm. U kořenových vrstev se volí úkos mezi 25 až 30°. Úhel úkosu je závislý na drsnosti materiálu, průměru trubky, atd. (obr. 18, 19).



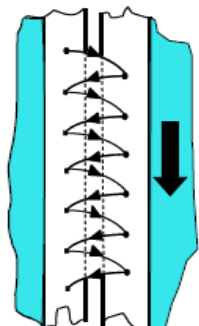
Obr. 18: Typ svarové mezery pro Fast Root svařování [11]



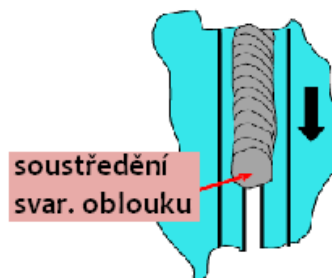
Obr. 19: Typ svarové mezery pro Fast Root svařování tenkých plechů [11]

Technika svařování procesem Fast Root:

Hlavním úkolem svařování je udržet oblouk na vrcholu svarové lázně, nikoliv po jejích stranách. Dostatečné natavení stran svaru způsobí dostatečný výkon oblouku. Fast Root umožňuje svařovat i bez použití oscilace. Oscilování by mělo proběhnout bez prodlev v krajních polohách, a mělo by být rychlejší než při běžném svařování v poloze PF (obr. 20). Při svařování bez oscilace se zvýší pracovní rychlost, ale nedosáhne se tak hladkého povrchu jako při oscilování (obr. 21).



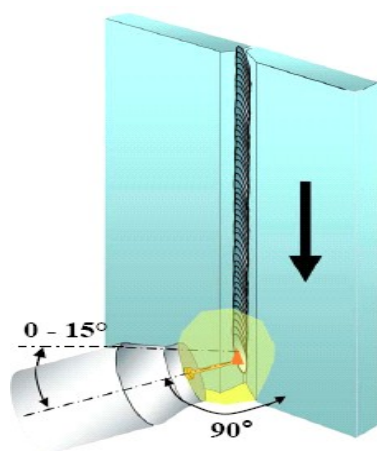
Obr. 20: Oscilační pohyb [11]



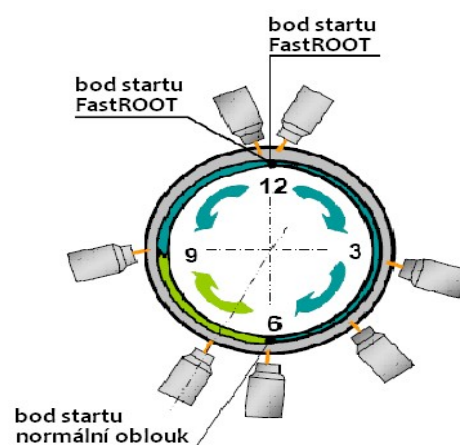
Obr. 21: Přímé vedení drátu [11]

Svařovací výkon se reguluje podle svarové mezery (3 - 5 mm), otupení svarových ploch (0 - 1 mm), rychlosti svařování v závislosti na šířce kývaného pohybu.

Velikost průvaru je závislá na úhlu sklonu hořáku (obr. 22).



Obr. 22: Úhel nastavení hořáku [11]



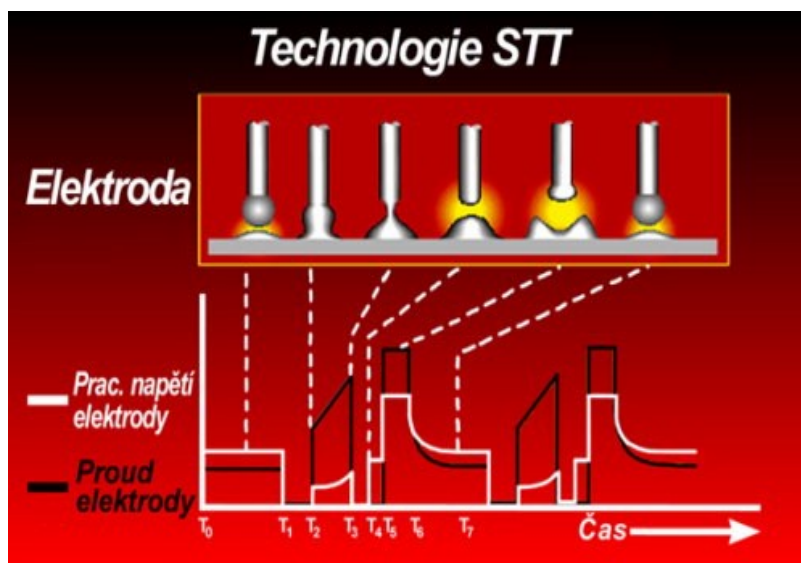
Obr. 23: Svařování trubek [11]

Narozdíl od běžného způsobu svařování trubek, který umožňuje svařovat zdola nahoru od 6 do 9 hodin (obr. 23), metodou Fast Root můžeme svařovat v poloze zhora dolů od 12 do 6 hodin nebo od 12 do 9 hodin. V pravé části obrázku je znázorněné svařování Fast Root od 12 do 6 hodin natočením hořáku o 10 až 15°. Svařovací zařízení také může otáčet trubkou a hořák zůstane v poloze např. 2 hodiny. [10,11]

4.4. Surface Tension Transfer (STT)

Americká firma Lincoln Electric se zastoupením po celém světě představuje pro regulaci vneseného tepla metodu Surface Tension Transfer (přenos kovu řízený povrchovým napětím). Většinou se používá jen zkratka STT, někdy také STT II.

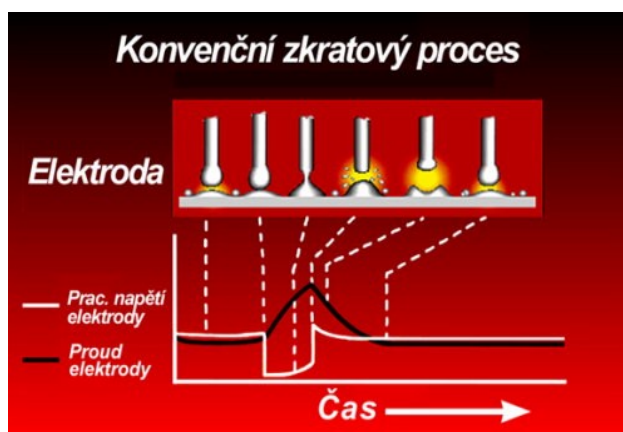
Svařovací zdroj STT má řízený celý svařovací cyklus. Využívá řízeného přenosu svarového kovu do tavné lázně podle předem definovaných parametrů, v závislosti na konkrétních parametrech změřených na oblouku v daném okamžiku. Unikátní systém kontroly celého svařovacího cyklu tak přináší jeho dokonalou regulaci v reálném čase.



Obr. 24: Charakteristika technologie STT [12]

Princip STT :

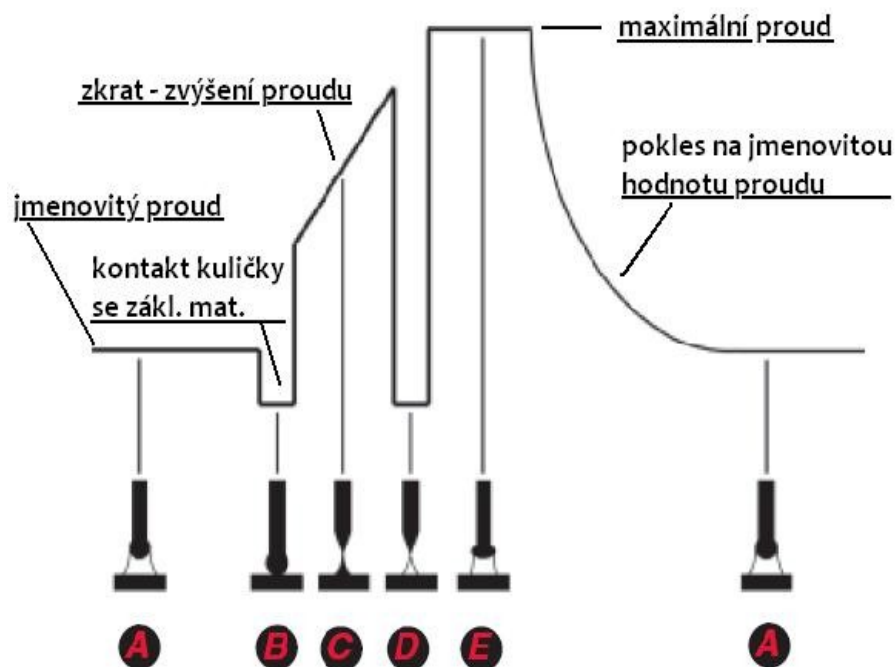
Zdroj STT pracuje s přímou zpětnou vazbou. Řízený svařovací cyklus snímá parametry napětí na oblouku a vyhodnocuje naměřené hodnoty. Okamžitě podle skutečných parametrů reaguje na každou fázi přechodu svarového kovu do tavné lázně. Jednotlivé fáze přeměny pracovních hodnot proudu, napětí a přechodu kapky kovu do svarové lázně jsou dobře patrné na obr. 24. Pro porovnání je na obr. 25 znázorněn konvenční zkratový proces i s viditelným rozstříkem, ke kterému u metody STT téměř nedochází. [13]



Obr. 25: Charakteristika konvenčního zkratového procesu [12]

Pro lepší pochopení principu je rozdělen celý cyklus na několik časových fází a porovnán je s konvenčním způsobem:

- **A (T₀ – T₁):** elektrický oblouk hoří mezi elektrodou a tavnou lázní → tvoří se kulička roztaveného materiálu na konci elektrody,
 - shodné v obou procesech,
- **B (T₁ – T₂):** kulička dosáhne požadované velikosti a spojí se s tavnou lázní → po analýze této situace zdroj STT sníží proud na 10 A → výrazné snížení rozstříku,
 - u konvenčního způsobu je kontakt kulička - základní materiál neustále pod plným proudem a to až do času T₃, kde dosáhne svého maxima,
- **C (T₂ – T₃):** fáze zkratu → zdroj STT zvýší proud podle předem stanovené křivky,
- **D (T₃ – T₄):** těsně před oddělením kuličky do tavné lázně → STT omezení proudu na 50 A → maximální omezení rozstříku,
 - u konvenčního způsobu dojde k oddělení kuličky při max. hodnotě proudu → větší rozstřík,
- **E (T₄ – T₇):** zdroj STT rozpozná konec přechodu kovu do tavné lázně → oblouk řízen do vzniku nové dostatečně velké kuličky tekutého kovu → konec jedné periody,
 - při konvenčním způsobu by tato fáze proběhla v rozmezí T₃-T₄. [12]



Obr. 26: Proudová charakteristika metody STT [14]

Ve zkratové oblasti dochází ke střídání fáze hoření oblouku a fáze zkratové. Zdroj STT rozpozná blížící se fázi a v reálném čase upraví svařovací parametry. Při rozpoznání zkratu sníží proud na 10 A a na začátku nové fáze (zapálení oblouku) omezí svařovací proud na 50 A. Průběh proudu je znázorněn na obr. 26.

Celý cyklus trvá přibližně 5 ms.

Možnosti STT:

- zdroj STT mimo jiné obsahuje unikátní obvod nazývaný jako "dV/dt detektor". Tento detektor dokáže identifikovat fázi těsně před ukončením zkratu,
- celý proces probíhá automaticky bez zásahu obsluhy,
- STT je svařovací zdroj pro MIG/MAG svařování. Nepracuje s konstantními charakteristikami proudu ani napětí,
- široký rozsah regulace svařovacích parametrů,
- nezávislé ovládání rychlosti podávání drátu a svařovacího proudu,
- parametry svařování jsou nastaveny podle skutečné potřeby pro danou fázi cyklu. [13]

Výhody zdroje STT:

- minimální vnesené teplo do svaru (menší deformace a menší teplem ovlivněná oblast),
- aplikace tvrdonávarů (minimální promísení se základním materiálem vlivem malého vneseného tepla a tavné lázně),
- až o 90 % menší rozstřík – dobrý vzhled svaru (čistě okolí svaru, není třeba brousit),
- tavná lázeň se nezvětšuje, je stejně velká v jakékoli poloze a situaci svařování (v kořenu svaru, na kraji tenkých plechů, ...),
 - nedochází k propadnutí,
 - svařování kořene svaru u tenkých plechů pod 0,6mm i s minimálními zkušenostmi v poloze zhora dolů,
 - nahrazuje metodu TIG s lepšími výsledky a několikanásobně vyšší produktivitou,
- velká flexibilita
 - svařování i velkých spár (např. Plech 3 mm, spára 1,2 mm),
 - použití větších průměrů drátů (úspora přídavného materiálu),
- svařování nelegovaných, nízkolegovaných, vysokolegovaných a galvanicky pokovených ocelí,
- snadné ovládání (krátké zaškolení obsluhy),
- snížení vzniku škodlivých emisí (ochrana životního prostředí).

Využití svařovacího zdroje STT v průmyslu:

Pro své dobré vlastnosti se používá metoda STT například při výrobě tlakových nádob, potrubí v energetice, ve výrobě potravinářských strojů, zařízení a tvrdonávaru. S výhodou se také používá při svařování karoserií v automobilovém průmyslu například u sportovních vozů X5 Roadster Z4 značky BMW či vozu Octavia značky Škoda. [12]

4.5. Cold Metal Transfer (CMT)

V současné době se často kombinují materiály s různými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Spojení různých materiálů se provádělo dosud převážně mechanickými prostředky, nebo také pomocí lepených spojů. V posledních desetiletích 20. století byly vyvinuty technologie na svařování oceli s hliníkem za vznik tzv. termických spojů. Do seriové, především automobilové výroby se začaly zapojovat během posledních let.

Abychom mohli spojovat různé materiály, musíme mít podrobné informace o jejich vlastnostech. Hliník se s výhodou využívá pro svoji nízkou specifickou hmotnost, dobrou zpracovatelnost a optimální užitné vlastnosti. V plném rozsahu však nemůže nahradit ocel s vyšší pevností a nízkou cenou.

Heterogenní spoj vyvolává degradaci užitných vlastností spojených materiálů:

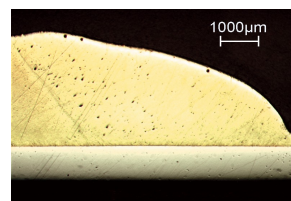
- na rozhraní materiálů se tvoří křehká intermetalická fáze,
- vlivem rozdílné tepelné roztažnosti vznikají zbytková napětí,
- vlivem různých chemických potenciálů se výrazně snižuje korozní odolnost.

Technologie zaměřené na spojování oceli s hliníkem je možné realizovat za splnění vysokých nároků na řídicí techniku a pouze pro určitou geometrii spoje. Domněnku mnoha metalurgů o nemožnosti spojení oceli s hliníkem ze svařecko-technického hlediska, vyvrátil detailní výzkum v oblasti MIG/MAG svařování a potvrdil, že tyto materiály je možné spojit pomocí elektrického oblouku. Postupným přizpůsobováním metody MIG/MAG potřebám spojování oceli s hliníkem vznikla metoda Cold Metal Transfer (dále jen CMT) prezentována firmou Fronius a metoda ColdArc od firmy EWM.

Pro spojení různých druhů materiálů s menším množstvím vneseného tepla se může použít také například MIG brazing. Není to však přímé svařování, ale patří to do skupiny tvrdého pájení. Tuto metodu nabízí například firma Kemppi.

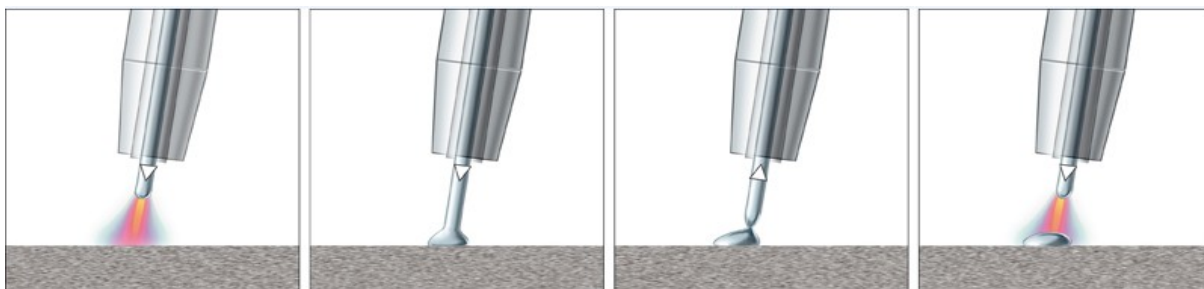
Princip Cold Metal Transfer:

Tato metoda je řízená s téměř bezproudovým přenosem materiálu. Pozinkovaný ocelový materiál je smáčen, nikoli nataven, roztaveným hliníkovým základním a přídatným materiálem. Vlivem rozdílné teploty tavení (hliník 660 °C a ocel 1538 °C) dochází k tzv. „svarovému pájení“. Většinou je spoj z pohledu hliníku svařovaný a ocel je pájená. Na obr. 27 je metalografický vzorek smíšeného spoje ocel-hliník. Využívají technologie s nízkým přísunem tepla, aby nedocházelo k tepelné degradaci hliníkových slitin.



Obr. 27: Smíšený spoj ocel-hliník [15]

Svařovací drát se pohybuje v intervalech s vysokou rychlostí proti směru posuvu podávání (obr. 28). Přesně definované zpětné zatažení drátu způsobuje kontrolované uvolnění kapky do svarové lázně. Dochází k čistému, bezrostrikovému přechodu materiálu. Vysokofrekvenční pohyb drátu vyžaduje rychle reagující pohon přímo na hořáku. Samotný podavač není schopen tyto pohyby sledovat. Transportní hadice je proto vybavena tzv. puřem, tedy vyrovnávacím členem, který vyrovnává přídatné pohyby drátu v obou směrech.



Obr. 28: Zpětný pohyb drátu [15]

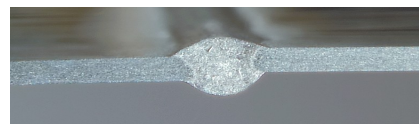
Přístrojové vybavení:

Pro svařování CMT je nutné použít plně digitalizovaného invertorového svařovacího zdroje. Můžeme použít hardwarovou sestavu pro MIG/MAG na nejnovější technické úrovni, s dodržením specifických požadavků. Hlavně vysokodynamický posuv drátu, přimontovaný přímo na hořáku. V okamžiku identifikace zkratu, svařovací zdroj spustí zpětný pohyb drátu a sníží svařovací proud. Dochází k přesně definovanému uvolnění kapky bez známek rozstříku. Cyklus se začne opakovat v okamžiku pohybu drátu vpřed. Vysoká frekvence pohybu drátu a mimořádná preciznost jsou předpokladem přesně řízeného přechodu materiálu.

Aplikace a přednosti:

CMT není vhodný pouze pro spoje ocel-hliník, ale i pro řadu jiných aplikací. Například bezroztřikové pájení žárově nebo elektrolyticky zinkovaných plechů za použití svařovacího drátu slitiny mědi s křemíkem.

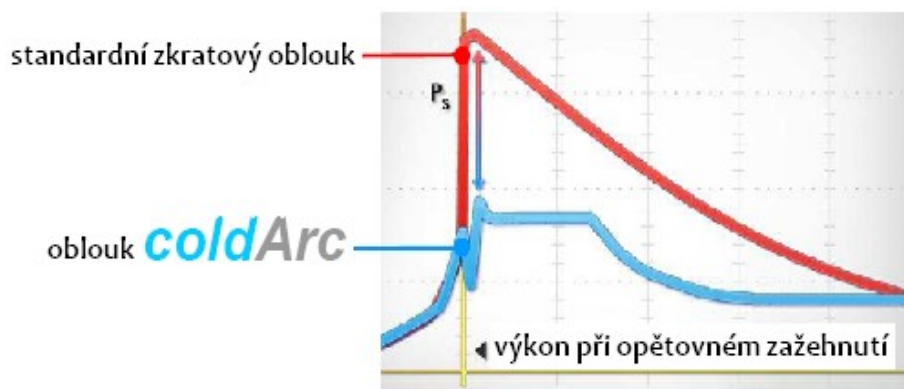
Metodou CMT se svařují tenké hliníkové plechy (0,3 - 0,8 mm)(obr. 29). Dobře probíhá i svařování ušlechtilých ocelí s hořčíkem. Díky nízkému tepelnému zatížení CMT metody se nemusí používat svařových podložek. Nedochozí k protavení svaru. [15]



Obr. 29: Tupý spoj dvou tenkých hliníkových plechů [15]

4.6. ColdArc

Pro snížení vneseného tepla do svaru nabízí firma EWM metodu ColdArc. Metoda ColdArc je podobně jako CMT zaměřená především na svařování ocel-hliník. Řadí se mezi obloukové svařování MIG/MAG s energetickou regulací oblouku. ColdArc využívá krátký oblouk s nižšími hodnotami proudu a napětí, na rozdíl od klasického způsobu MIG/MAG jak ukazuje obr. 30.

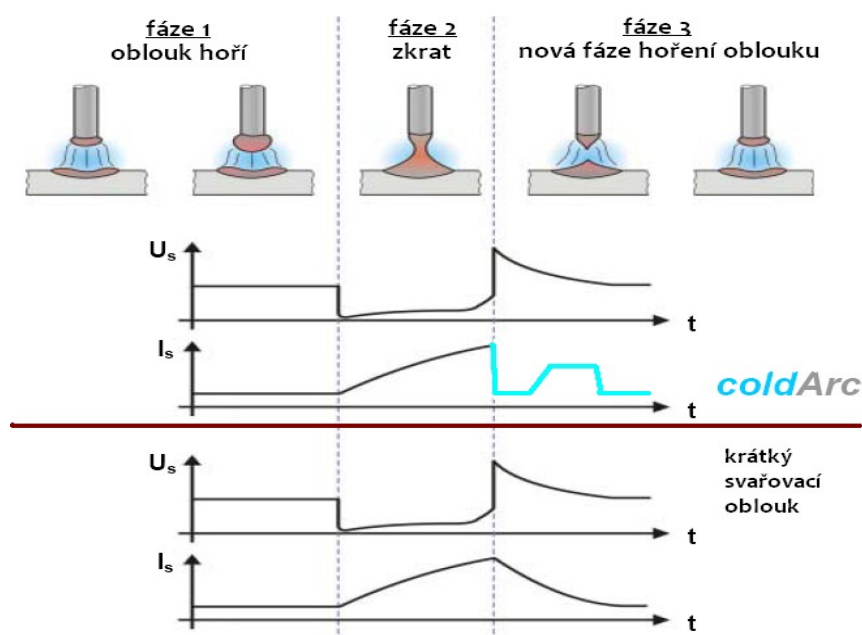


Obr. 30: Porovnání klasického krátkého oblouku a ColdArc [18]

Na rozdíl od CMT, kde je svařovací cyklus upraven pomocí mechanického zásahu do posuvu drátu, ColdArc je možné použít i u ručního svařování, protože k úpravě svařovacího cyklu dochází přímo v proudovém zdroji. Díky konstantnímu podávání drátu ($v_{\text{drát}} = \text{konst.}$) lze použít klasické hořáky.

Princip ColdArc:

Svařování probíhá v cyklu neustále se střídajících tří fází, které jsou znázorněny na obr. 31. Výsledkem je malý rozsah tepelně ovlivněné oblasti spojených materiálů.



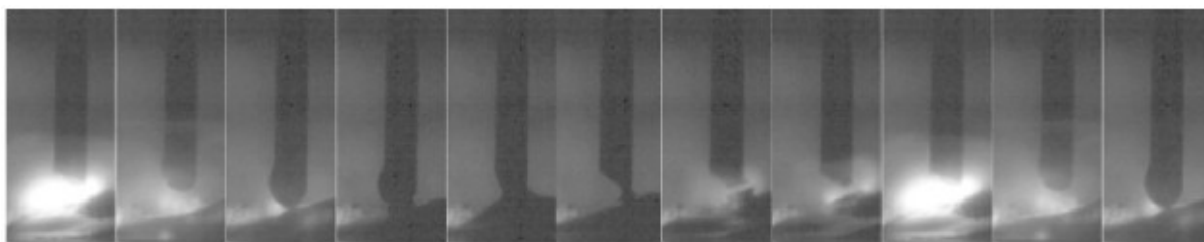
Obr. 31: Fáze procesu ColdArc [18]

Fáze 1: krátký oblouk hoří mezi základním a přídavným materiálem (drátem). Vlivem povrchového napětí svarové lázně se na konci nataveného přídavného materiálu začne tvořit kapka.

Fáze 2: v okamžiku kdy se kapka dostane do kontaktu se svarovou lázní dojde ke zkratu a uhasnutí oblouku. Vytvoří se most mezi základním materiálem a koncem přídavného materiálu. Konečnému oddělení kapky pomáhají Lorentzovy síly a tepelný efekt způsobený strmým nárůstem proudové hustoty.

Fáze 3: po oddělení kapky je znovu zažehnut oblouk.

Na obr. 31 je graficky znázorněn průběh proudu a napětí ve všech popsanych fázích. „Na počátku zkratu se napětí prudce snižuje v důsledku toho, že elektrický odpor vytvořeného mostu je nižší než v případě oblouku ve fázi 1. V tom samém okamžiku se začíná zvyšovat proud. Jakmile dojde k zániku mostu a kapka se oddělí od elektrody, napětí začne prudce narůstat a proud naopak klesat. Nárůst napětí umožní zažehnutí oblouku, které je díky digitálnímu řízení „nenásilné“. Poté pozvolna klesá. Bezprostředně po opětovném zažehnutí oblouku je proud znovu navýšen, ale pouze na přesně stanovený krátký časový okamžik, při kterém dochází k natavení základního materiálu. Díky tomu je následně možné proud extrémně snížit tak, aby dalšímu tavení již nedocházelo. Tímto je dosaženo velmi nízkého tepelného ovlivnění, neboť proud zůstává na extrémně nízké úrovni až do okamžiku oddělení kapky.“ [16] Celý proces byl nasnímán vysokorychlostní kamerou (obr. 32).



Obr. 32: Hoření oblouku, zkrat, opětovné zažehnutí oblouku [16]

Ve spoji ocel-hliník vznikají dva druhy spojů, díky nízkému tepelnému ovlivnění spojených materiálu. Hliník tvoří svarový a ocel pájený bezrostřikový spoj, který se nemusí dále nijak povrchově upravovat. Nejběžněji se používá jako přídavný materiál zinkový drát. [16]

Výhody vyplývají z redukovaného vneseného tepla a nízkoenergetického přechodu materiálu:

- svařování menších tloušťek plechů,
- minimální rozstřík,
- vynikající přemostění mezer,
- individuálně ovlivnitelná geometrie svaru,
- malá deformace materiálu.

Svařování tenkých plechů ColdArc:

Díky minimalizaci vložené energie a digitální kontrole materiálového přenosu tavenina nepropadáva, i když nepoužijeme svařovací podložku. Dosahuje se výborného přemostění mezer a vysokých svařovacích rychlostí. Mohou se svařovat i plechy s nižší tloušťkou než je 0,3 mm, dochází tak k úspoře hmotnosti svařované konstrukce.

Na obr. 33 až 35 jsou znázorněny příklady svarů tenkých plechů o tloušťce 1 mm z oceli, AlMg a CrNi slitiny. [17]



Obr. 33: Ocelový plech 1 mm; tupý spoj; 1 mm mezer; 1 mm drát G4Si1 [17]



Obr. 34: plech AlMg3; 0,8 mm; koutový svar na přeplátovaném spoji; 1 mm drát AlSi5 [17]



Obr. 35: Plech CrNi; 0,5 mm; koutový svar na přeplátovaném spoji; 1 mm drát CrNi[17]

ZÁVĚRY:

Úkolem práce bylo popsat možnosti, kterými se dá regulovat množství vneseného tepla do svaru při MIG/MAG svařování. Každý z výrobců svařovacích zdrojů vnesené teplo reguluje jiným způsobem, které nelze jednoznačně porovnat. Výběr optimální metody pro daný svar, mohou ovlivnit i osobní preference každého svařeče.

Pulzní svařování, patří k běžně používaným metodám. V pravidelných intervalech střídá nižší hodnoty proudu základu a vyšší hodnoty proudu impulzu. Metoda Rapid Arc stejně jako Rapid Melt je založena na vysokorychlostním podávání drátu. Rapid Melt jako jediná z metod přivádí do místa svaru větší množství vneseného tepla. Ostatní metody se snaží o snížení vneseného tepla. Metoda Fast Root rozděluje svařovací cyklus na dvě fáze s různými hodnotami proudu a používá se převážně na svařování kořenových vrstev. Metoda Surface Tension Transfer sleduje celý svařovací cyklus a přes zpětnou vazbu v reálném čase reguluje svařovací parametry. Metody ColdArc a Cold Metal Transfer jsou vhodné především pro svařování ocel–hliník. ColdArc rozděluje svařovací cyklus na tři fáze a na rozdíl od klasického způsobu upravuje hodnoty proudu po fázi zkratu. Tento způsob se dá použít i pro ruční svařování na rozdíl od CMT. Metoda Cold Metal Transfer k regulaci vneseného tepla využívá nejen změnu proudu, ale i mechanickou podporu pohonu drátu pro zatažením drátu zpět do hořáku.

Metody regulující vnesené teplo jsou vhodné především pro automatizované svařování tenkých plechů. Regulací vneseného tepla se dosáhne ve svaru požadovaná struktura a vlastnosti.

Díky regulaci svařovacích parametrů téměř nedochází k tvorbě rozstříku. Svarové plochy proto nevyžadují další operace. Sníží se tak náklady a pracovní časy.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov: tavíci sa elektródou*. Bratislava: ETERNA PRESS s.r.o., 2003. 204 s. ISBN 80-968359-5-5.
- [2] HALA, Petr. *Svařitelnost kovů*. Brno: SIAD, [2005]. 125 s.
- [3] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II : Část svařování* [online]. 2006 [cit. 2009-03-21]. Studijní opory. Dostupný z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>>.
- [4] STANĚK, Vlastislav. *Svařování pozinkovaných plechů* [online]. 2005 [cit. 2009-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.svarak.cz/c/cz/svarovani-pozinkovanych-plechu-mig-pajeni.htm>>.
- [5] Kolektiv autoru. *Materiál a jeho svařitelnost*. Ostrava : ZEROSS - svařečské nakladatelství, 2001. 296 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [6] *Katalog přídatných materiálů pro svařování*. Vamberk: Esab Vamberk. 2007.
- [7] KUNCIPÁL, J., et al. *Teorie svařování*. Redaktor Dr. Vladimír Pešl. 1. vyd. Praha : SNTL/ALFA, 1986. 272 s.
- [8] ŽÁK, Jan. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno : VUT, 1988. 142 s.
- [9] LAUDIEN, U., et al. *Fachbuchreihe Schweißtechnik : DVS - Gefügerichtreihe Stahl*. Düsseldorf : Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1979. 264 s. ISBN 3 87155 079 5.
- [10] DUCHÁŇ, Martin. *Trade Weld* [online]. c2008 [cit. 2009-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.tradeweld.cz/files/1/FastROOT%20popis.pdf>>.
- [11] *Trade Weld* [online]. c2008 [cit. 2009-02-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.tradeweld.cz/index.asp?obsah=129&styl=0>>.
- [12] *CZ WELD* [online]. 2008 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <http://www.czweld.cz/index_clanky.htm>.
- [13] *CZ WELD* [online]. 2008 [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <http://www.czweld.cz/z_stt2.htm>.
- [14] *Lincoln Electric* [online]. c1999-2009 [cit. 2009-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx220.pdf>>.
- [15] *FRONIUS Česká republika s.r.o.* [online]. c2008-2009 [cit. 2009-03-28]. Dostupný z WWW: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-B414131C-05F46BDD/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3917.htm>.
- [16] ŠTĚPÁN, Karel. *Metalografické hodnocení svarových spojů ocel-hliník SVOČ - FST 2008* [online]. 2008 [cit. 2009-03-16]. Dostupný z WWW: <[http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2008/_sbornik/PapersPdf/Bc/Stepan_Karel.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2008/_sbornik/PapersPdf/Bc/Stepan_Karel.pdf)>.
- [17] GOECKE, Sven. *ColdArc_CZ* [online]. c2004, 22.3.2006 [cit. 2009-03-16]. Dostupný z WWW: <http://www.welding24.com/cz/documents/ColdArc_CZ_000.pdf> .
- [18] GOECKE, Sven. *CZ_EWM_coldArc_welding.pdf*. [2005-10-12]. 15 s.

Seznam použitých symbolů a zkratk:

Označení:	Legenda:	Jednotky:
I	Proud	[A]
Ø	Průměr	[mm]
Q_{cel}	Celková energie oblouku	[J]
Q_s	Specifické vnesené teplo	[kJ·mm ⁻¹]
Q_{sv}	Energie vnesená do svarového spoje	[J]
T	Teplota	[°C]
t	Čas	[s]
T0 až T7	Časové fáze	[s]
U	Napětí	[V]
$v_{drát}$	Rychlost podávání drátu	[mm·s ⁻¹]
v_r	Rychlost ochlazování	[°C·s ⁻¹]
v_s	Rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
η	Teplená účinnost přenosu tepla	[-]
APT	Svařování pod tavidlem	
AWS	American welding society – americká svářečská společnost	
CMT	Cold metal transfer	
ESS	Elektrostruskové svařování	
GMAW	Gas metal arc welding – obloukové svařování v plynové atmosféře	
GTAW	Gas tungsten arc welding – svařování v plynové atmosféře wolframovou elektrodou	
IIW	International institut of welding – mezinárodní svářečská společnost	
MAG	Metal aktiv gas – obloukové svařování v aktivní atmosféře	
MIG	Metal inert gas – obloukové svařování v inertní atmosféře	
MMAW	Manual metal arc welding - ruční svařování obalenou elektrodou	
PF	Svařovací poloha – zespodu nahorů	
PG	Svařovací poloha – shora dolů	
ROE	Ruční svařování obalenou elektrodou	
SAW	Submerget arc welding – svařování pod tavidlem	
STT	Surface tension transfer	
TIG	Tungsten inert gas – svařování v plynové atmosféře wolframovou elektrodou	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
WIG	Wolfram inert gas – svařování v plynové atmosféře wolframovou elektrodou	