

TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

SVAROVÁNÍ

Rozdělení metod svařování

Všechny běžné metody svařování lze rozdělit na dvě velké skupiny a to metody tavného svařování a metody tlakového svařování. U tavného svařování je vytvoření spoje dosaženo přívodem tepelné energie do oblasti svaru a dendritickou krystalizací roztaveného svarového kovu. Tlakové metody svařování jsou založeny na působení mechanické energie, která formou makro nebo mikrodeformace přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil přičemž vznikne vlastní spoj.

Rozdělení metod svařování je uvedeno v normě ČSN EN 34063. Toto rozdělení je ekvivalentní rozdělení dle ČSN ISO 857. U každé metody svařování je v kulaté závorce uvedeno i číselné označení metody svařování, tak jak je toto označení metody svařování uvedeno v dalších materiálech u svařování, např. u WPS – technologické postupy, označování zkoušek svářečů apod.

A) Metody tavného svařování(0)

1. Svařování elektrickým obloukem (1)
 - a) Obloukové svařování tavící se elektrodou(101)
 - b) Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)
 - c) Gravitační obloukové svařování obalenou elektrodou(112)
 - d) Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu(114)
 - e) Vibrační svařování a navařování
 - f) Pod tavidlem(12)
 - g) Obloukové svařování v ochranné atmosféře(13)
 - h) Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu-MIG (131)
 - i) Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu-MAG(135)
 - j) Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (136)
 - k) Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu(137)
 - l) Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu-WIG (141)
2. Elektrostruskové svařování(72)
3. Svařování plazmové(15)
4. Svařování plazmové MIG svařování(151)
5. Svařování magneticky ovládaným obloukem(185)
6. Elektronové svařování (76)
7. Plamenové svařování(3)
 - a)kyslíko-acetylenové svařování(311)
 - b)kyslíko-vodíkové svařování(313)
8. Svařování slévárenské
9. Svařování světelným zářením(75)
10. Laserové svařování(751)
11. Aluminotermické svařování(71)
12. Elektroplynové svařování(73)
13. Indukční svařování(74)

B) Metody tlakového svařování(4)

1. Tlakové svařování za studena(48)
2. Odporové svařování(2)
 - a) stykové α) stlačovací stykové svařování(25)
 - β) odtavovací stykové svařování(24)

- b) přeplátováním
 - α) bodové odporové svařování(21)
 - β) švové odporové svařování(22)
 - γ) rozválcovací švové svařování(222)
 - δ) výstupkové(23)
 - ε) vysokofrekvenční odporové svařování(291)
- 3. Svařování indukční(74)
- 4. Svařování v ohni
 - a) kovářské svařování(43)
 - b) tlakové svařování s plamenovým ohřevem(47)
- 5. Třecí svařování(42)
- 6. Ultrazvukové svařování(41)
- 7. Výbuchové svařování(44)

A) TAVNÉ SVAŘOVÁNÍ

1. Plamenové svařování

Zdrojem tepla při plamenovém svařování je chemická energie, která vznikne hořením směsi okysličujícího a hořlavého plynu. Parametry zdroje tepla – plamene se řídí použitými plyny. U kyslíko-acetylenového plamene je maximální teplota plamene $\sim 3150^{\circ}\text{C}$, nejmenší plocha ohřevu $1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ a hustota energie $5 \cdot 10^3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$

Hořlavé plyny

Hořlavých plynů používaných v technické praxi pro plamenové svařování je celá řada. Pro svařování má největší význam acetylen pro jeho velmi dobré vlastnosti.

Hořlavé plyny a jejich vybrané vlastnosti

vlastnosti plynu	acetylen	vodík	propan	metyl-acetylen-propadien	etylen (eten)	propylen	Zemní plyn
chem. vzorec	C_2H_2	H_2	C_3H_8	MAPP, TETREN, APACHI C_3H_4	C_2H_4	C_3H_6	CH_4
způsob skladování	rozpuštěný v acetonu	Stlačený	kapalný	kapalný	stlačený (kapalný)	kondenzo vaný	Stlačený
Výhřevnost (MJ/m^3)	56,5	10,8	93,2	82,2	53,9	87,6	35,9
meze výbušnosti se vzduchem(%)	2,2-85,0	4,0-74,5	2,2-95,5	1,7-12,0	3,1-32,0	2,0-10,5	5,0-15,0

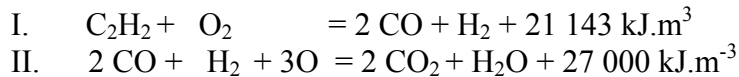
Kyslíko – acetylenový plamen.

Tento plamen se podle poměru kyslíku a acetylenu dělí na následující druhy:

- a) neutrální, poměr $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 = 1$ až $1,1 : 1$
- b) redukční, poměr $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 < 1$
- c) oxidační, poměr $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 = 1,2 : 1$

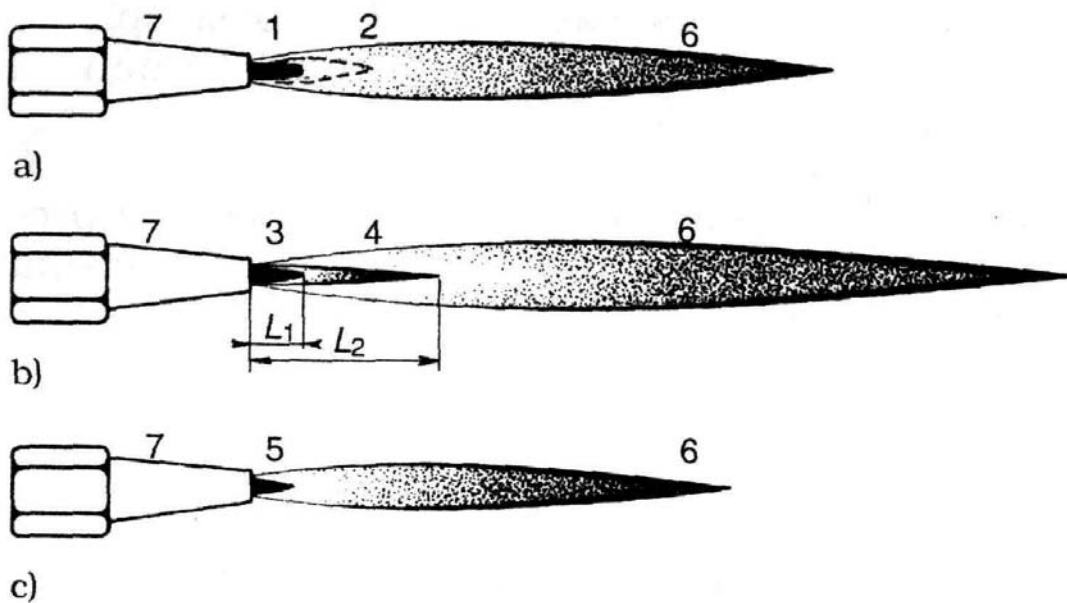
Jednotlivé typy kyslíko-acetylenového plamene podle rozdělení na plamen neutrální, redukční a oxidační jsou uvedeny na obr.

V neutrálním plameni je svařovací plamen ostře ohraničen a září oslnivě bíle. Neutrálním plamenem se obvykle svařuje ocel. Proces spalování probíhá obvykle ve dvou fázích:



V první fázi spalování probíhá nedokonalé spalování na povrchu svařovacího kužele. Acetylen se rozkládá, vodík zůstává z větší části volný, uhlík se spaluje na oxid uhelnatý. Oblast plamene do vzdálenosti asi 10mm od vrcholu svařovacího kužele má redukční účinky.

V druhé fázi hoření dochází ke spalování ve vnějším kuželu. Kyslík potřebný k reakci si plamen odebírá ze vzduchu se značným přebytkem, takže vnější plamen má oxidační účinky. Neutrální plamen se v praxi používá, jak již bylo uvedeno pro svařování ocelí a dále pro nahřívací plamen při řezání kyslíkem. Plamen s přebytkem acetylenu (přebytek acetylenu 5 až 15%) se používá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin, k navařování tvrdokovů a k cementování plamenem. Přebytek acetylenu v plameni lze také určit podle délek svítících kuželů L_1 a L_2 , viz obr. 2.4b. Plamen s přebytkem kyslíku (přebytek kyslíku 5 až 20%) se používá pro svařování mosazi a bronzů.



Rozdělení plamene kyslíko-acetylenového podle poměru kyslíku a acetyleny

- a) neutrální
 - b) redukční (s přebytkem acetyleny)
 - c) oxidační (s přebytkem kyslíku)
- 1-svařovací kužel ostře ohraničený, oslnivě bílý, 2-redukční oblast plamene, 3-svařovací plamen oslnivě bílý, překrytý bělavým závojem, 4-bělavý závoj, 5-svařovací plamen krácený, modrofialový, 6-vnější oxidační plamen, 7-svařovací hubice

Oblasti použití plamenového svařování

Plamenové svařování patří mezi klasické metody svařování vyznačující se dlouhou tradicí. Svoji dominantní úlohu a postavení si stále zachovává v řemeslech jako jsou topenář, instalatér, potrubář, klempíř, automechanik a další. Nezastupitelnou úlohu má v opravárenství a renovacích. Velmi často se můžeme setkat se svařováním plamenem při navařování tvrdých i jiných návarů. Snad více než u ostatních metod svařování ovlivňuje řemeslná zručnost svářeče výsledky svařování plamenem. Hlavní oblast použití svařování plamenem je pro svařování slabých plechů do tloušťky 4mm. I v této oblasti je však z důvodů vznikajících deformací a vnitřních pnutí nahrazováno svařování plamenem metodou svařování MAG.

2. Svařování elektrickým obloukem.

2.1 Elektrický oblouk.

Elektrický oblouk využitelný ve svařování je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Stabilně hoří za předpokladu napětí dostatečného pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku v ionizovaném stavu.

Charakteristické znaky oblouku jsou:

- 1) malý anodový úbytek napětí
- 2) malý potenciální rozdíl na elektrodách
- 3) proud řádově ampéry až tisíce ampér
- 4) velká proudová hustota katodové skvrny
- 5) intenzivní vyzařování světelného záření z elektrod i sloupce oblouku.
- 6) intenzivní vyzařování UV záření.

Části elektrického oblouku:

a) Katodová skvrna je ostře ohraničená oblast, která termickou emisí emituje prvotní elektrony důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí. Elektrony získávají v oblasti katodového úbytku napětí tak velkou kinetickou energii, že jsou schopny při srážkách ionizovat neutrální atomy na kladné ionty a sekundární elektrony. Teplota skvrny je cca 2600 °C.

b) Anodová skvrna

Anodovou skvrnou jsou neutralizovány a odváděny dopadající záporné částice. Kinetická energie částic se mění na tepelnou a z části i na elektromagnetické záření. Teplota anodové skvrny je cca 3000 °C.

c) Sloupec oblouku je zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy mezi elektrodami, která dosahuje vysokých teplot 4000 až 7000° C

Voltampérová charakteristika oblouku

Statická voltampérová charakteristika oblouku vyjadřuje závislost proudu na napětí oblouku při konstantní délce oblouku. Na vlastní tvar a polohu charakteristiky oblouku má značný vliv chemické složení elektrody, geometrie hrotu elektrody, složení plazmy oblouku i průměr elektrody.

Z těchto důvodů se někdy používá tzv. **standardní statická charakteristika oblouku:**

$$U = 20 + 0,04 \cdot I \quad [V]$$

2.2 Svařování ruční obalenou elektrodou.

Pro ruční svařování elektrickým obloukem se jako přídavné materiály používají obalené elektrody. Tyto se skládají z jádra a z obalu elektrody. Jádro elektrody tvoří drát průměru 1,6 2,0 2,5 3,2 4,0 5,0 a 6,0 mm.

Podle složení obalu rozdělujeme elektrody na:

- stabilizační,
- rutilové označení R,
- rutil-celulózové označení RC,
- rutil-kyselé označení RA,
- rutil- bazické označení RB,
- tlustostěnné rutilové označení RR,
- kyselé označení A,
- bazické označení B,
- celulózové označení C

Funkce obalu elektrod:

- funkce plynotvorná (při hoření oblouku vznikají z obalu kouře a plyny, které vytvářejí druh ochranné atmosféry a brání přístupu vzdušného kyslíku a dusíku ke svarové lázni, např. celuloza, tepelný rozklad CaCO_3 na CO_2 a CaO),
- funkce ionizační (slouží v obalu pro usnadnění zapalování a hoření oblouku, např. soli alkalických kovů K a Na),
- funkce metalurgická – rafinace (snížení P a S), desoxidace (snížení O_2) a legování (především prvků náchylných k propalu – Cr, Mo, Ti atd.)

Technologie svařování obalenou elektrodou.

Svařování el. obloukem obalenou elektrodou je poměrně jednoduchou metodou svařování jak z hlediska parametrů svařování, tak i z hlediska poloh svařování.

Svařovací proud může svářeč nastavit podle údajů výrobce elektrod. Nemá-li k dispozici údaje o velikosti svařovacího proudu může použít následujících empirických údajů:

- pro elektrody s kyselým a rutilovým obalem činí svařovací proud $I(\text{A}) = (40 \text{ až } 55) \cdot d$
- pro elektrody s bazickým obalem činí svařovací proud $I(\text{A}) = (35 \text{ až } 50) \cdot d$

kde d je průměr jádra elektrody

Napětí na el. oblouku nemusí svářeč nastavovat a jeho hodnota je dána statickou charakteristikou elektrického oblouku.

Při vedení elektrického oblouku a elektrody je třeba postupovat tak, že elektroda je mírně skloněna proti svarové housence, aby roztavená struska nepředbíhala elektrický oblouk a nezpůsobovala struskové vměstky ve svarovém kovu (vada svaru). Délka elektrického oblouku má být přibližně rovna průměru jádra elektrody.

Zakončení svarové housenky musí být takovým postupem, aby nedošlo vzniku staženiny v koncovém kráteru. Pro svářeče to znamená, že musí v koncovém kráteru se při odtavení svarového kovu provést ještě zatočení se s obloukem a odtavit ještě určité množství svarového kovu, aby bylo ještě z čeho dosazovat svarový kov a zabránit tak vzniku staženiny.

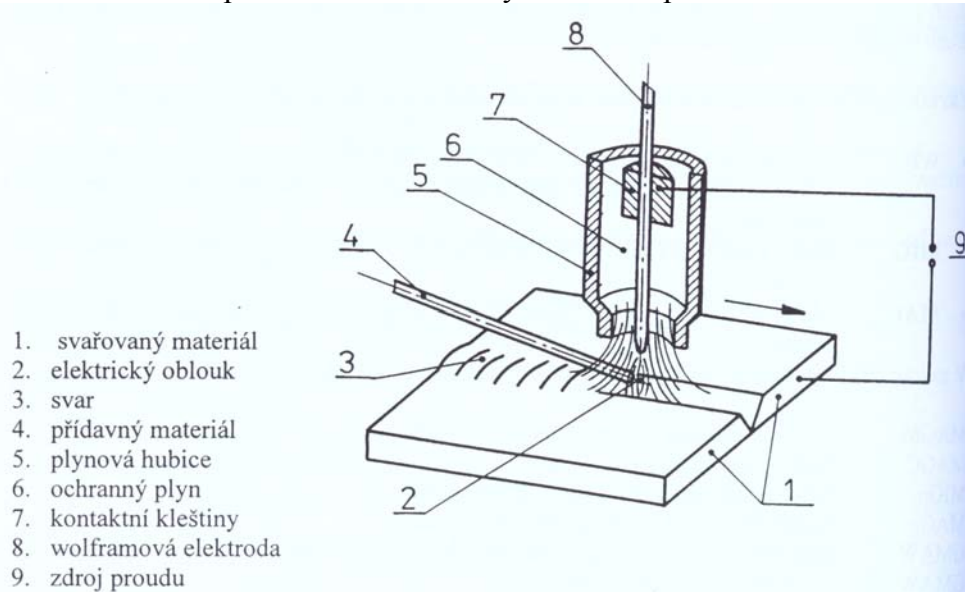
2.3 Svařování netavící se wolframovou elektrodou v atmosféře inertního plynu – WIG (TIG).

Při svařování metodou WIG hoří oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Ochranu elektrody i tavné lázně před okolní atmosférou zajišťuje netečný plyn o vysoké čistotě minimálně 99.995%. Používá se argonu, helia nebo jejich směsí. Svařování lze realizovat s přidavným materiálem ve formě drátu ručním způsobem, nebo automatické svařování s podavačem drátu s proměnnou rychlostí jeho podávání dle postupu svařování.

Obecně lze svařování rozdělit dle druhu proudu na svařování střídavým proudem pro hliník, hořčík a jejich slitiny a svařování stejnosměrným proudem pro středně a vysokolegovanou ocel, měď, nikl, titan, zirkon, molybden a další. Pro svařování uhlíkové oceli se metoda WIG používá méně z důvodu nebezpečí vzniku pórů ve svaru a z ekonomického hlediska. Svařování wolframovou elektrodou se používá i pro spojování obtížně svařitelných materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku např. titan a zirkon .

Lze svařovat i různorodé materiály – ocel s mědí, bronzem nebo niklovými slitinami a návary v oblasti renovací např. nástrojové oceli, niklové a kobaltové tvrdonávary.

Svařování WIG má výrazný růst objemu svářečských aplikací což se připisuje vysoké kvalitě spojů, operativností řízení procesu svařování a vysokému stupni automatizace a robotizace.



Princip svařování metodou WIG

Svařování stejnosměrným proudem.

Svařování stejnosměrným proudem je základní způsob zapojení při svařování metodou WIG. Při tomto zapojení je elektroda připojená k zápornému pólu zdroje a svařovaný materiál na kladný (přímé zapojení). Rozdělení tepla oblouku je nerovnoměrné a přibližně 1/3 tepla připadá na elektrodu a 2/3 celkového tepla se přenáší do základního materiálu. Díky tomu není elektroda tepelně přetěžovaná a naopak svarová lázeň má velkou hloubku závaru. Na velkou hloubku závaru má vliv i dopad elektronů, které svoji kinetickou energii přeměňují na tepelnou.

Svařování stejnosměrným proudem s přímou polaritou se používá pro spojování všech typů ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin . Tento způsob zapojení se dá použít i pro svařování hliníku v ochranné atmosféře směsi argonu a nejméně 75% helia. Při svařování hliníku stejnosměrným proudem se díky vysoké vodivosti helia předává do svarové lázně velké množství tepla, které umožňuje roztavení i povrchových oxidů. Oxidy se vlivem povrchových sil stahují na okraj taveniny a střed tavné lázně je čistý. Tento způsob svařování se používá především pro renovace a opravy rozměrných a silnostěnných hliníkových odlitků nebo svařenců. Umožňuje spojovat i silnostěnné a tenkostěnné součásti především koutovým svarem.

Nepřímá polarita zapojení není z důvodu vysokého tepelného zatížení elektrody využívána a dá se vyjímečně použít pro svařování tenkostěnných svařenců z hliníku nízkým proudem.

Svařování střídavým proudem.

Svařování střídavým proudem se používá z důvodu čistícího účinku, při kladné polaritě elektrody na svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Výrazným problémem při svařování hliníku je vrstva oxidu hlinitého, která chrání za běžných podmínek hliník proti další oxidaci. Vrstvička Al_2O_3 má však vysokou teplotu tavení $2050\text{ }^\circ\text{C}$ a při použití stejnosměrného proudu v argonu brání metalurgickému spojení, poněvadž pokrývá povrch roztaveného hliníku jehož teplota tavení je cca $658\text{ }^\circ\text{C}$.

Čistící účinek vzniká při zapojení elektrody na kladný pól zdroje. Na základním materiálu se vytvoří katodová skvrna, která není stabilní a pohybuje se na místa pokrytá oxidy. Tato místa mají nižší emisní energii pro emisi elektronů a po zasažení katodovou skvrnou se oxidy snadněji odpaří. Druhá forma čistícího účinku se projevuje při rozložení argonu na kladné ionty a elektrony. Argonové ionty o relativně vysoké hmotnosti, které jsou urychlené směrem k tavné lázni, působí na oxidy mechanickým účinkem. Dynamickým účinkem tohoto proudu dochází ke stažení vrstvy oxidu k okraji svarové lázně. Při kladném zapojení elektrody vzniká pouze malý závar. Vysoká hloubka závaru se dosahuje při zapojení elektrody na záporném pólu zdroje, kdy a do tavné lázně dopadají urychlené elektrony.

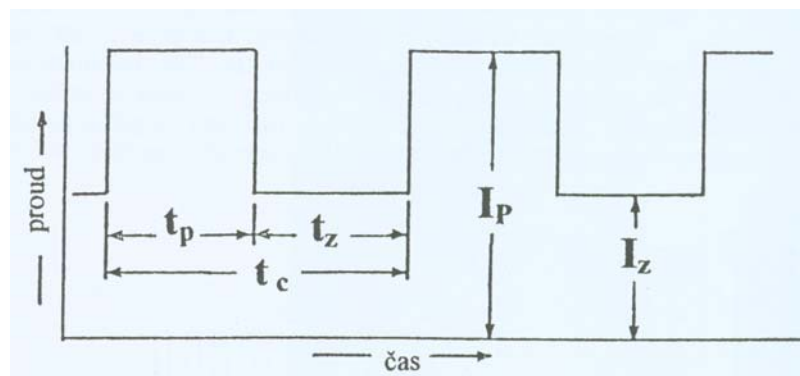
Svařování impulsním proudem.,

Impulsní svařování je nejnovější variantou WIG svařování, při kterém se intenzita proudu mění pravidelně s časem mezi dvěma proudovými hladinami a to základním proudem I_z a impulsním proudem I_p . Podle charakteru zdroje může být tvar průběhu impulsů proudu pravoúhlý, sinusový, lichoběžníkový nebo jiný.

Základní proud I_z jehož hodnota je všeobecně nízká (cca $10 - 15\text{ A}$) zajišťuje pouze ionizaci oblasti oblouku v čase t_z . Pokud je doba základního proudu delší než dvojnásobek doby pulsu dochází k úplnému ztuhnutí svarové lázně, což je výhodné pro svařování vysokolegovaných ocelí. Naopak v průběhu kratší doby lázeň nezuhne, ale zmenší svůj rozměr. Toho se v praxi používá při požadavku zvláště hladkého svaru s plynulým přechodem do základního materiálu.

Impulsním proudem I_p v čase t_p dochází k natavení svarové lázně a tím i přidavného materiálu. Rozměry svarové lázně definuje především hodnota amplitudy impulsního proudu a doba trvání pulsu. Tímto je dosažena velice přesná regulace svářecího režimu, dávkování hodnoty vneseného tepla do svaru a tvarování svarové lázně. Průměrná hodnota svařovacího proudu je při impulsním svařování nižší než při klasickém způsobu svařování s konstantním proudem a proto vykazují svary malou TOO i výborné plastické vlastnosti včetně nižší náchylnost na praskání a menší deformace.

Součet času pulsního proudu t_p a času základního proudu t_z dává celkový čas cyklu t_c určující frekvenci pulsního svařování.



Průběh impulsního proudu

Výhody impulsního svařování:

- lepší celistvost, mechanické a plastické vlastnosti svarů
- snížení tepelného ovlivnění materiálu a tím menší deformace
- velmi dobré formování a vzhled svarové housenky
- snížení náchylnosti svarů na vznik mezikrystalické koroze u vysokolegovaných ocelí
- výhodný průřez svaru
- možnost svařování plechů tl. 0,5 až 5 mm bez použití podložek
- široká oblast regulace svařovacího proudu

Výše uvedené výhody impulsního svařování WIG se využívají v těchto oblastech :

- svařování tenkých plechů legovaných ocelí, mědi a měděných slitin,
- svařování různých tloušťek,
- jednostranně přístupné svary
- polohové svary
- svařování materiálů citlivých na přehřátí
- svařování kořene trubek větších tloušťek.

Netavící se wolframové elektrody.

Netavící se elektrody používané při svařování WIG se vyrábějí ze spékaného wolframu, který má teplotu tavení 3380° C, teplotu varu 5700° C, měrný elektrický odpor $5,36 \cdot 10^{-8}$ ohmů a hustotu 19,1 g cm⁻³.

Elektrody se vyrábějí čisté bez příměsí o čistotě 99,9 % W, nebo legované oxidy kovů – thoria (Th), lanthanu (La), ceru (Ce), zirkonu (Zr) nebo yttria (Y), které jsou v elektrodě rovnoměrně rozptýleny. Přísada oxidů snižuje teplotu ohřevu elektrody o 1000° C, zvyšuje životnost, zlepšuje se zapalování oblouku a jeho stabilitu díky zvýšené emisi elektronů.

Přehled druhů vyráběných wolframových elektrod.(ČSN EN 26 848)

Označení	Hmotnostní procento oxidů	Barevné označení
WP		Zelená
WT 10	ThO ₂ 0,9 - 1,2	Žlutá
WT 20	ThO ₂ 1,8 - 2,2	Červená
WT 30	ThO ₂ 2,8 - 3,2	Fialová
WT 40	ThO ₂ 3,8 - 4,2	Oranžová
WZ 8	ZrO ₂ 0,7 - 0,9	Bílá
WL 10	LaO ₂ 0,9 - 1,2	Červená
WC 20	CeO ₂ 1,8 - 2,2	Šedá
WL 20	La ₂ O ₃ 1,8 - 2,2	Modrá
WS 2	Vzácné zeminy	Tyrkysová
WLYC 10	La ₂ O ₃ + Y ₂ O ₃ + CeO ₂ 0,8 – 1,2	Zlatá

Vyráběné průměry v mm: 0,5 1,0 1,6 2,0 2,4 3,0 3,2 4,0 4,8 5,0 6,0 6,4 8,0 10

Vyráběné délky v mm: 50 75 150 175

Přídavné materiály.

Pro nelegované a nízkolegované materiály je dnes zavedena norma **ČSN EN 1668**, kde příklad označení materiálu je následující:

Příklad označení přídavného materiálu:

Tyč EN1668 – W 46 3 W3Si1

EN 1668 = číslo normy

W = tyč/ drát nebo navařený kov obloukovým svařováním wolframovou elektrodou v inertním plynu

46 = pevnost a tažnost dle příslušné tabulky (mez kluzu 460 MPa)

3 = nárazová práce (47 J při $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

W3Si1 = chemické složení dle příslušní tabulky.

Zásady pro ruční svařování hliníku a jeho slitin.

- Používá se střídavý proud o frekvenci 40 až 250 Hz a inertní plyn Ar nebo Ar + 25 – 75% He, nebo stejnosměrný proud s He + 10% Ar.
- Do tloušťky 5 mm se tupé svary svařují bez úkosu a bez mezery, doporučuje se však zkosit spodní hranu svaru cca 0,5 až 1 mm
- Větší tloušťky se upravují do „V“ úkosu a úhlem rozevření 80 – 90° otupením 2mm .
- Hodnota proudu se volí cca 40 až 60 A na 1mm tloušťky materiálu.
- Průměr přídavného drátu se u tenkých plechů rovná tloušťce svařovaného materiálu.
- Jako přídavný materiál se používá AlMg5 vhodný proti vzniku trhlin za tepla.
- Pro AlSi slitiny je vhodný AlSi3 až 5.
- Stehování se provádí střídavě od středu svaru po cca 100 mm. Šířka stehu nesmí překročit šířku budoucího svaru.
- Délka oblouku 3 – 5 mm.
- Pro svařování hliníku se používá svařování doleva.
- Doporučuje se předehřev 200 až 300 °C dle složitosti a tloušťky svařence.
- Při začátku svařování přidat přídavný materiál až po prosednutí svarové lázně, které detekuje protavení kořene.
- Při ukončování svaru použít funkci poklesu proudu a doplnit koncový kráter.
- Pro čištění povrchu použít kartáčování, broušení nebo moření v NaOH pro odstranění oxidu hlinitého.
- Identifikace slévárenských slitin dle barvy oblouku: bílý oblouk – AlSi
nazelenalý oblouk - AlMg
- Identifikace slitin hliníku kapkovou metodou pomocí 20% NaOH (5 min)
 - bílá skvrna AlMg
 - černá odstranitelná skvrna AlCuMg
 - tmavě hnědá neodstranitelná skvrna AlSi

Zásady pro ruční svařování vysokolegovaných ocelí.

- Používá se stejnosměrný proud s konstantním nebo impulsním průběhem. Elektroda je na záporném pólu zdroje.

- Plynová ochrana je zajištěna Ar, Ar + He, nebo Ar + H₂, pro austenitické oceli. Heliem i vodíkem se zvyšuje přenos tepla do svaru a tím i hloubka závaru a rychlost svařování.
- Do tl. 2 mm se tupé svary svařují bez styčné spáry, do tl. 4mm se styčnou spárou cca 1mm a nad 4 mm se upravuje hrana do úkosu „V“ s rozevřením 60 – 70° s otupením 2 mm.
- Hodnota svařovacího proudu se volí od 30 do 50 A na 1mm tl. materiálu.
- Délka oblouku by měla odpovídat průměru elektrody.
- Svařovat s minimálním možným tepelným příkonem do svaru.
- U vícevrstvých svarů dodržovat teplotu interpass max. 100 °C a používat úzké housenky.
- Používat niobem stabilizované přídavné materiály o rozměrech menších než tl. materiálu. Doporučené množství niobu je desetinásobek množství uhlíku.
- Pro větší tloušťky svařovaných materiálů použít přídavný materiál který dává svarový kov s malým obsahem delta feritu.
- Vlivem špatné tepelné vodivosti je nutno stehovat v malých vzdálenostech cca 40mm od středu svaru. I pro svařování stehů je nutno použít formovacího plynu pro ochranu kořene.
- Pro tenké plechy používat upínací přípravky a měděné podložky pro snížení deformace.

Zásady pro ruční svařování mědi a jejích slitin.

- Z důvodu velmi vysoké tepelné vodivosti aplikovat spoje s nejnižším odvodem tepla (tupé svary) a dle potřeby izolovat povrch svařence tepelně izolačním materiálem.
- Svařovat měkkým obloukem dlouhým cca 5 až 10 mm s přímou polaritou elektrody.
- Při svařování čisté mědi možno svařovat jen desoxidovanou měď.
- Přídavný materiál volit nízkolegovaný cínový bronz s cca 1% cínu. Svařuje se delším obloukem a svar se nepřekovává.
Při použití čisté mědi nebo CuAg1 desoxidovaný fosforem, svar překovat při teplotě 800 až 850 °C a čistou měď svařovat jen na jednu vrstvu, jinak vznikají trhliny.
Doporučená ochranná atmosféra je Ar nebo lépe Ar + 50% He. Čistota plynů 4.5.
- Předehřev volit dle tloušťky materiálu: 2mm - 150 °C, 3mm - 200 °C, 5mm - 300 °C, 7mm - 350 °C, 8mm - 400 °C, 10 až 12mm - 500 až 600 °C. Zajistit dohřívání na požadovanou teplotu i během svařování.
- Svařovat stejnosměrným proudem s konstantním průběhem, tenké plechy do 1,5 mm impulsním proudem.
- Složitější svařence vyztužit ocelovým skeletem proti zborcení.
- Ruční svařování mosazi lze použít jen do obsahu zinku pod 20% a svařovat malým proudem a malým tepelným výkonem. Zinkové páry musí být intenzivně odsávány.
- Cínový, hliníkový a niklový bronz svařovat krátkým obloukem, malým proudem, minimálním vneseným teplem a malou rychlostí.
- Hliníkové, beriliové a částečně křemíkové bronzy se doporučuje svařovat střídavým proudem.
- Tenké plechy se svařují doleva, případně se svařovaný materiál nakloní o 15 - 20° od vodorovné polohy.

Zásady pro svařování titanu a jeho slitin.

- V místě spoje zabezpečit kovově čistý povrch bez oxidu titaničitého.
- Používat přídavné materiály stejného nebo podobného chemického složení jako svařovaný materiál s malým obsahem nečistot (C max. 0,05%, O₂ max. 0,01%, N₂ max. 0,02%).

- Chránit svarový kov včetně spodní strany svaru, přídavný materiál i tepelně ovlivněnou oblast ochranným plynem nad teplotou 400 °C. Při teplotě nad 400 °C dochází k oxidaci povrchu a přípustná je pouze kovově lesklá až slabě slámově žlutá barva. Mírná oxidace se projeví slámově žlutou barvou, střední oxidace bronzovou až hnědou a silná oxidace modrou barvou. Světle šedou barvou svaru se projevuje vytvoření práškového oxidu na povrchu. Nad uvedenou teplotou dochází také k silné difúzi kyslíku a vzniku trhlin ve svaru.
- Přednostně používat svary které můžeme vyrobit bez přídavného materiálu.
- Použít plyn o vysoké čistotě min. 4.8.
- Svařovat stejnosměrným proudem s přímou polaritou.

Svařování WIG má proti jiným metodám tavného svařování tyto metalurgické a technologické výhody:

- a) inertní plyn zabezpečuje efektivní ochranu svarové lázně a přehřáté oblasti základního materiálu před účinky vzdušného kyslíku,
- b) inertní plyn zabráňuje propalu prvků a tím i vzniku strusky - výsledkem je čistý povrch svaru,
- c) vytváří velmi příznivé formování svarové housenky na straně povrchu i kořenové části svaru,
- d) nevyžaduje použití tavidel, ale lze je použít,
- e) vytváří elektrický oblouk vysoké stability v širokém rozsahu svařovacích proudů,
- f) zajišťuje vysokou operativnost při svařování v polohách,
- g) zabezpečuje svary vysoké celistvosti i na materiálech náchylných na naplynění a oxidaci při zvýšených teplotách,
- h) jednoduchá obsluha a přesná regulace parametrů svařování,
- i) svary mají malou tepelně ovlivněnou oblast a minimální deformace,
- j) svarová lázeň je viditelná a snadno ovladatelná,
- k) možnost velmi přesného dávkování množství tepla vneseného do svaru,
- l) svařovací oblouk je velmi flexibilní – jeho tvar a směr lze snadno ovládat magnetickým polem.

Z důvodu výše uvedené charakteristiky se svařování WIG používá v těchto oblastech:

- svařované konstrukce z vysokolegovaných ocelí pro chemický, farmaceutický a potravinářský průmysl, klasickou i jadernou energetiku
- žárupevné a žáruvzdorné oceli pro stavbu kotlů, tepelných výměníků a pecí
- titanové a speciální slitiny v oblasti výroby letadel a kosmické techniky
- svařování hliníkových slitin v oblasti dopravní techniky i všeobecného strojírenství.

2.4 Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu metodou MIG/MAG.

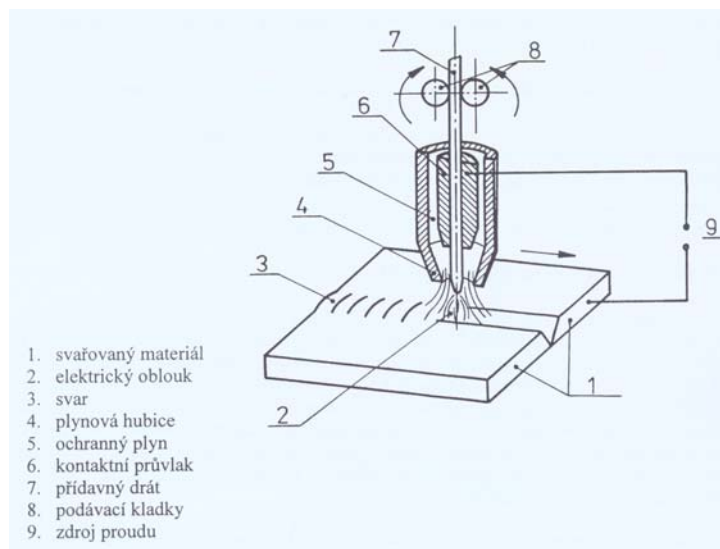
Svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG patří vedle svařování obalenou elektrodou v celosvětovém měřítku k nejrozšířenějším metodám pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Svařování MIG v inertním plynu získává na důležitosti vlivem růstu objemu konstrukcí, staveb, lodí a dopravních prostředků vyráběných z hliníkových slitin. Hlavními důvody rozšíření metody MIG/MAG jsou: široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment vyráběných

svařovacích zařízení a především významné výhody a charakteristiky uvedené metody svařování.

Svařování metodou MIG/MAG je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního nebo aktivního plynu. Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku tak, aby elektricky zatížená délka drátu byla co nejkratší. Drát je podáván podávacími kladkami umístěnými v podavači, vlastním hořáku, nebo kombinací obou systémů z cívky o běžné hmotnosti 15 kg. Proudová hustota je u svařování MAG nejvyšší ze všech obloukových metod a dosahuje až $600 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ a svařovací proudy se pohybují od 30 A u svařování tenkých plechů drátem o průměru 0,6 – 0,8 mm, až do 800A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Charakter přenosu kovu obloukem závisí na parametrech svařování a ochranném plynu, přičemž běžný je zkratový pro tenké plechy a sprchový pro větší tloušťky plechů. U vysokých proudů se mění charakter přenosu kovu obloukem a vlivem elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku. Teplota kapek se při MAG svařování pohybuje v rozmezí 1700 až 2500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C.

Díky vysokým proudům se svařovací rychlosti blíží hranici $150 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ a rychlost kapek přenášených obloukem přesahuje $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ochranná atmosféra se volí podle druhu svařovaného materiálu, ovlivňuje však také přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku.



Princip svařování metodou MIG/MAG

Metalurgické reakce při svařování MAG.

Nejdůležitějšími metalurgickými reakcemi jsou oxidační a desoxidační pochody probíhající v kapkách tavící se elektrody a v roztaveném svarovém kovu. Tyto reakce zásadně ovlivňují tvar oblouku i povrch svarové housenky, přechod svarové housenky do základního materiálu a vnitřní čistotu svaru. Na rozsah reakcí má vliv především množství disociovaného kyslíku schopného slučování s prvky v tavenině.

Vzniklé kapky svarového kovu jsou obohaceny kyslíkem při přechodu do tavné lázně a dosahují vysoké teploty, poněvadž oxidační reakce jsou exotermické. Tyto reakce uvolňují teplo, které je difúzí vedeno do okolního materiálu a výsledkem je hlubší a oválnější svarová

lázeň u svaru s ochranným plynem CO_2 , který má větší oxidační schopnost než u směsí $\text{Ar} + \text{CO}_2$, nebo v čistém Ar .

Slučováním oxidu FeO s C se tvoří bubliny CO , které jsou za určitých podmínek příčinou pórovitosti a bublinatosti svarů. To je také jeden z důvodů, proč se musí provést dokonalá desoxidace taveniny svarového kovu.

Desoxidáčnickými prvky Mn a Si jsou přídavné materiály přelegovány v určitém poměru tak, aby vzniklá struska měla vhodnou tekutost a snadno vyplavala na povrch tavné lázně.

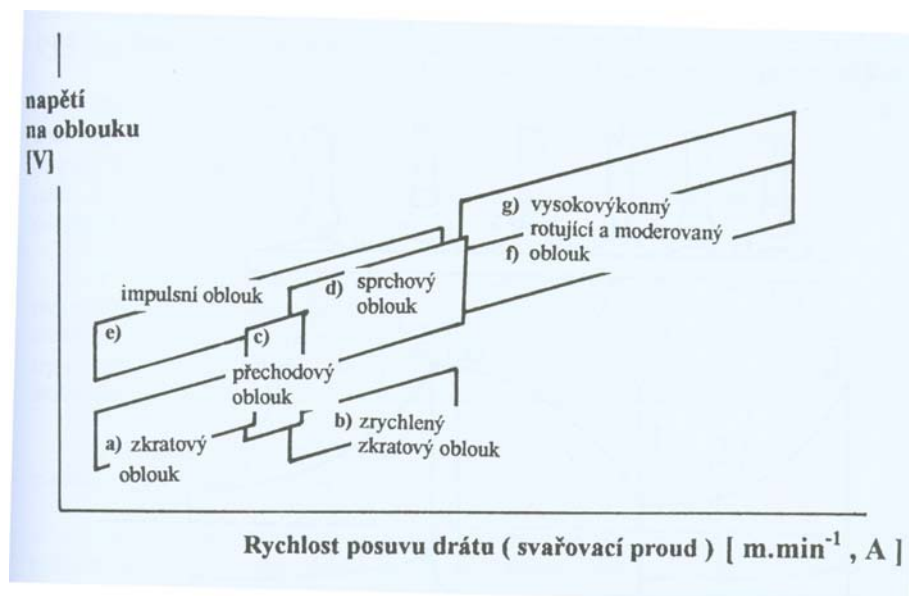
Doporučený poměr mezi $\text{Mn} : \text{Si}$ je cca 1,5 : 1 až 1,8 : 1 a optimální složení přídavných materiálů je: $\text{C} = 0,1\%$, $\text{Mn} = 1,7\%$, $\text{Si} = 1,0\%$.

Přenos kovu v oblouku

Přenos kovu v oblouku patří mezi základní charakteristiky metody svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou a závisí především na svařovacích parametrech tj. proudu a napětí. Významně však jeho charakter ovlivňuje složení ochranného plynu, druh přídavného materiálu a technika svařování

Přenos kovu v oblouku můžeme rozdělit na jednotlivé typy :

- krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu
- krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem
- přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty
- dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem
- impulzní bezzkratový oblouk
- moderovaný bezzkratový přenos
- dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu



Druhy přenosů kovu obloukem

Zkratový přenos se uplatňuje v rozsahu svařovacího proudu od 60 do 180A a napětí 14 – 22V. Výkon navaření při těchto parametrech se pohybuje v rozmezí 1 – 3 kg.hod^{-1} . Při zkratovém způsobu přenosu dochází k přerušování oblouku zkratem, při kterém se odděluje část kovu elektrody.

Sprchový přenos je typický pro hodnoty svařovacího proudu do 200 do 500A a napětí 28 až 40V. tento typ přenosu se dá realizovat ve směsích plynů Ar s CO_2 , případně O_2 , nebo čistém

Ar u svařování neželezných kovů. Vzhledem k vysokým hodnotám povrchového napětí v CO₂, nelze tento přenos realizovat, poněvadž nelze získat dostatečně drobné kapky. Charakteristické pro sprchový přenos v Ar a směsích bohatých argonem (minimálně 80%) je, že díky snadné ionizaci plynu obklopuje plazma i konec tavicí se elektrody a tím se urychluje ohřev drátu, který tvoří ostrý hrot.

Svařování impulsním proudem je zvláštní formou bezkratového přenosu kovu, Parametry svařování impulsním proudem překrývají oblast zkratového i sprchového přenosu.

Impulsní forma přenosu kovu obloukem, jehož průběh je řízen elektronickou cestou, má pravidelný cyklus daný frekvencí amplitudy impulsního proudu. Základní proud je nízký od 20 do 50 A a jeho funkce je udržení ionizace sloupce oblouku, a tím i vedení proudu. Impulsní proud, který se nastavuje, je tvarově i časově řízený a v konečné fázi jeho amplitudy je zajištěno odtavování kapky přídavného materiálu. V celém průběhu amplitudy impulsního proudu intenzivně hoří oblouk, který ohřívá svarovou lázeň i samotný přídavný materiál.

Svařování impulsním proudem má řadu výhod :

- efektivní hodnota impulsního proudu je nižší než u konstantního, a tím se vnáší méně tepla do svaru s menším deformačním účinkem
- lze svařovat tenké plechy i polohové svary bezkratovým přenosem
- vysoký impulsní proud taví i dráty větších průměrů, které jsou levnější
- výkon navaření se pohybuje mezi 2 – 5kg. hod⁻¹
- pravidelná jemná kresba povrchu svaru i kořene
- velmi vhodný přenos pro svařování hliníku a jeho slitin i vysokolegovaných ocelí
- díky možnosti nastavení proudu, napětí, frekvence a amplitudy poskytuje zdroj impulsního proudu široké aplikační možnosti.

Optimální plyn pro svařování uhlíkových ocelí je směs Ar s 8% CO₂ a pro nerezavějící oceli Ar + 2%O₂. U hliníku se používá čistý argon.

Nejširší uplatnění je v současnosti při ručním a mechanizovaném svařování nelegovaných, nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, při použití směsného plynu argonu s oxidem uhličitým. Tato metoda svařování se vyznačuje těmito výhodami:

- svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm,
- minimální tvorba strusky,
- přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně,
- vysoká efektivita, úspory nedopalků tzv. nekonečným drátem,
- snadný start oblouku bez nárazu svařovacího drátu do svařence,
- velmi dobrý profil svaru a hluboký závar,
- 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 v různých variantách 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.

Ochranné plyny.

Hlavní úlohou ochranných plynů je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování tj. především chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň, její okolí a kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku, který způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků.

Ochranné plyny mají také významný vliv na: typ přenosu kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, chování tavné lázně, hloubku závaru, rychlost svařování a další parametry svařování.

Jako ochranné plyny pro metodu **MAG** se používá čistý plyn oxid uhličitý CO_2 , nebo v současnosti častěji používané vícesložkové směsné plyny se základem argonu – $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ a $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$.

Při svařování metodou **MIG** se používá většinou čistý plyn argon a helium nebo jejich dvousložková směs $\text{Ar} + \text{He}$. Čistota plynů a přesnost míchání směsí jsou stanovené normou ČSN EN 439.

Ochranný plyn svým složením a množstvím ovlivňuje tyto charakteristiky svařování:

- vytvoření ionizovaného prostředí pro dobrý start a hoření oblouku,
- metalurgické děje v době tvoření kapky, při přenosu kapky obloukem a ve svarové lázni,
- síly působící v oblouku,
- tvar a rozměry oblouku,
- charakter přenosu kovu v oblouku, tvar a rozměry kapek a rychlost jejich přenášení obloukem,
- tvar a rozměry průřezu svaru,
- hladkost povrchu svaru a jeho přechod na základní materiál,
- kvalitu, celistvost a mechanické vlastnosti svarového spoje.

Porovnání vlastností ochranných plynů

Vlastnosti	$\text{Ar} + \text{CO}_2$	$\text{Ar} + \text{O}_2$	CO_2
Závar <ul style="list-style-type: none">• normální poloha• nucená poloha	dobry spolehlivější s rostoucím % CO_2	dobry může být kritický z důvodu předbíhání svarové lázně	dobry spolehlivy
Tepelné zatížení hořáků	vysoké, snižuje se s rostoucím % CO_2	vysoké, výkon může být omezen, jestliže je hořák příliš horký	nizké díky dobré tepelné vodivosti
Stupeň oxidace	nizky, stoupá s rostoucím % CO_2	výrazně závisí na obsahu O_2 (1 – 8%)	vysoky
Porozita	snizuje se s rostoucím obsahem CO_2	vysoká citlivost	spolehlivá
Přemostitelnost mezery	zlepšuje se s poklesem % CO_2	dobrá	horší než u směsných plynů
Tvorba rozstříku	stoupá s rostoucím % CO_2	téměř bez rozstříku	vysoká, stoupá s rostoucím výkonem
Vnášení tepla do svaru	stoupá s rostoucím % CO_2 nižší rychlost ochlazování menší nebezpečí vzniku trhlin	nejnižší vysoká rychlost ochlazování, nebezpečí vzniku trhlin větší	vysoké malá rychlost ochlazování, nebezpečí vzniku trhlin malé
Typ přenosu kovu obloukem	všechny typy	všechny typy	zkratový, kapkový

Přídavné materiály.

Pro metodu MIG_ MAG se vyrábějí plné a plněné (trubičkové) dráty.

Plné dráty jsou vyráběny a dodávány v průměrech 0,6 0,8 1,0 1,2 1,6 2,0 a 2,4 mm. Nejčastěji používané průměry jsou 0,8 až 1,6 mm. Dodávají se na cívkách o hmotnosti nejčastěji 15 kg.

Norma ČSN EN 440 označuje klasifikaci přídavných materiálů pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí MIG/MAG takto:

EN 440 - G 46 3 M G3Si1 kde

EN 440 je číslo normy

G svařování v ochranné atmosféře plynu
46 pevnost a tažnost (dle tabulky je min. mez kluzu 460 MPa, mez pevnosti 530 až 680 MPa a tažnost 20%)
3 nárazová práce – číslo udává desetinu minusové teploty při které bylo dosaženo nárazové práce 47 J. Trojka značí, že této hodnoty bylo dosaženo při -30 °C
M ochranný plyn – M jsou směsné plyny a C platí pro oxid uhličitý
G3Si1 chemické složení dle tabulka

Plněné elektrody se označují podle normy **ČSN EN 758** takto:

Plněná elektroda EN 758 – T 46 3 1Ni B M 4 H5

kde EN 758 je číslo normy

T plněná elektrody
46 pevnostní vlastnosti
3 nárazová práce
1Ni chemické složení dle tabulky

B typ náplně – bazická náplň
M ochranný plyn – směsný plyn
4 poloha svařování. Poloha svařování označená 4, platí pro tupý svar v poloze vodorovné shora a koutový svar do úžlabí.
H5 obsah vodíku. Označení H5 platí pro 5 ml/100g čistého svarového kovu.

3. SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ.

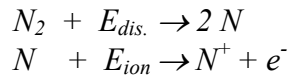
U těchto metod svařování se dosahuje protavení celé tloušťky materiálu pomocí vysoké hustoty energie nad 10^5 W.cm^2 . Teplota v tavné lázni u těchto metod dosahuje velmi rychle bodu varu kovu a tvoří se kapilára vyplněná parami kovů. Svar se tvoří po průchodu zdroje tepla Patří sem svařování plazmou, svazkem elektronů a laserem.

3.1 Svařování plazmou.

Princip svařování plazmou je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem.

U dvouatomových plynů (dusík, vodík a kyslík) musí nejprve proběhnout disociace plynu, při které dochází k rozložení molekul plynu na atomy. Stupeň následné ionizace je závislý na teplotě a ta dosahuje u svařování plazmou až 16 000 °C.

Disociace a ionizace dusíku:



Kde E_{dis} je potřebná energie na disociaci a E_{ion} je ionizační energie

Svařitelnost materiálů plazmovým svařováním

Svařitelnost materiálů i parametry svařování jsou u plazmového svařování podobná jako u metody WIG. Plazmové svařování však dosahuje vysokých svařovacích rychlostí, výhodnější poměr šířky k hloubce (1:1,5 až 1 : 2,5) a spolehlivé provaření kořene. Svařují se všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl molybden a jejich slitiny. Parametry svařování vysokolegovaných ocelí se pro tloušťky 2 až 10 mm pohybují v těchto rozmezích: napětí mezi 28 až 40 V a svařovací proud mezi 110 až 300 A. Podobné parametry se používají i pro svařování niklu a jeho slitin a pro svařování titanu jsou přibližně o 15 až 20 % nižší. Svařovací rychlosti jsou ve srovnání s metodou WIG podstatně vyšší a pro uvedené parametry se pohybují mezi 85 až 20 cm.min⁻¹

Úprava svarových ploch

Vzhledem k vysokému dynamickému účinku plazmového paprsku je možné svařovat tupé svary typu I se spolehlivým provařením kořene do větších tloušťek bez úpravy svarového úkosu.

Nerezavějící austenitická ocel se svařuje bez úpravy úkosu do tloušťky 10 až 12 mm s mezerou 0,5 – 1 mm a s plynovou ochranou kořene formovacím plynem. Pro nelegované a středně legované oceli se neupravují hrany do tloušťky cca 6 mm.

Příklad úpravy svarových hran je uveden na obr. 13.4.

Výhody plazmového svařování

- jednoduchá úprava svarových ploch středních tloušťek
- svařování bez podložení kořene
- velmi dobrý průvar i tvar svaru
- možnost mechanizace
- vysoká čistota svaru bez pórů a bublin
- dobré mechanické vlastnosti svarového spoje
- možnost svařování střídavým i impulsním proudem.

Mikroplazmové svařování

Vysoká stabilita hoření plazmového oblouku i při nízkých proudech je využita při mikroplazmovém svařování. Intenzita proudu se zde pohybuje v rozsahu 0,05 až 20 A. Mikroplazmovým svařováním lze svařovat kovové folie tl. 0,01 mm i plech tl. 2 mm.

Značným problémem při spojování tenkých folií je příprava svarové mezery, která se má pohybovat mezi 10 až 20 % tloušťky folie. Nutností je použití upínacích přípravků pro odvod tepla a zajištění polohy během svařování. Mikroplazmové svařování se používá v leteckém a kosmickém průmyslu, mikroelektronice, přístrojové technice, chemickém a potravinářském průmyslu.

3.2 Svařování svazkem elektronů.

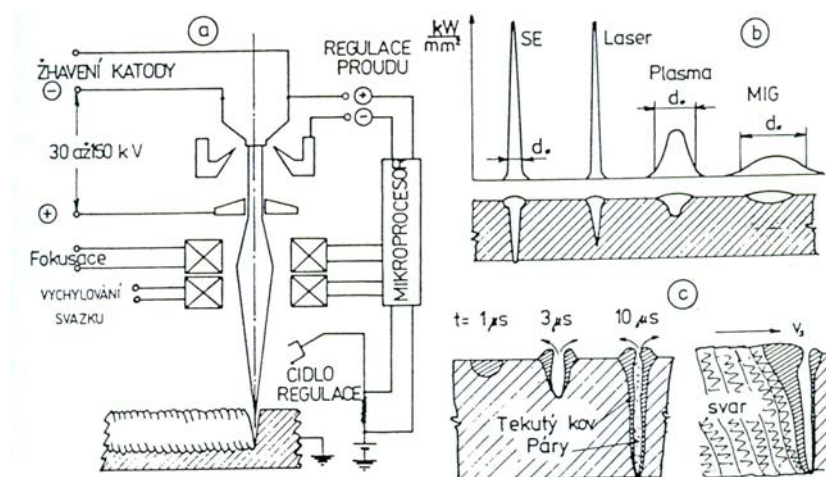
Princip svařování svazkem elektronů.

Vlastní zdroj elektronů je válcová vakuovaná nádoba na jednom konci opatřená přímo nebo nepřímo žhavenou emisí elektrodou a na druhém konci vybavená oddělovacím uzávěrem, který je kombinovaný s hranolem pozorovací optiky. Zdroj elektronů bývá nazýván elektronové dělo nebo elektronová tryska a je pomocí rotační a difúzní vývěvy čerpán na vysoké vakuum až $5 \cdot 10^{-4}$ Pa.. Některé zdroje používají pro rychlejší získání vakua turbomolekulární vývěvu. Vakuum je nezbytné z důvodu zajištění termoemise elektronů, tepelné a chemické izolace katody, zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami a zamezení srážkám elektronů s molekulami vzduchu, které způsobují zbrzdění elektronů a jejich vychýlení z přímého směru. Vlastní svařování probíhá v pracovní vakuové komoře, kde svařovací pohyb je zajištěn programovatelným polohovadlem s několika stupni volnosti. Elektrony jsou termoemisí uvolněny ze žhavené záporné elektrody a urychlení elektronů se dosahuje vysokým napětím jenž mezi katodou a anodou vytváří potenciál 30 až 200 kV. Při průchodu elektronu homogenním elektrickým polem získá kinetickou energii:

$$W_k = 1/2 m_e v_e^2 = e \cdot U$$

Elektrony dopadají na povrch materiálu a jejich kinetická energie se mění na tepelnou.

Během několika μs dosáhne materiál teploty tavení, posléze teploty varu kovu a vytvoří se úzká kapilára vyplněná parami kovů o nízkém tlaku. Tento tlak je však dostatečně vysoký, aby spolu s reakční silou udržel taveninu na stěně kapiláry.



- Princip svařování svazkem elektronů
- Srovnání hustoty energie
- Mechanismus tvorby svaru

Svařitelnost materiálu SE.

Svarové spoje vyhovují i velmi náročným podmínkám současné technické praxe ve špičkových oborech letecké i kosmické techniky.

Svařování ve vakuu umožňuje spojovat i chemicky velmi aktivní kovy - Ti, Zr, Mo, Nb, Hf, W aj., které mají vysokou afinitu ke kyslíku, dusíku a vodíku. Je možné svařovat i vysokotavivé a žárupevné slitiny typu Inconel, Nimonic. V poslední době se elektronovým svařováním spojují materiály tavným způsobem nesvařitelné z důvodu vzniku křehkých intermetalických fází. Intermetalické fáze způsobují výrazné snížení plastických a pevnostních vlastností svarového kovu a způsobují praskání spoje. Při svařování urychlenými elektrony je úzkou svarovou lázní omezena tvorba těchto křehkých fází a přesným zaostřením

můžeme dosáhnout požadované vzájemné rozpustnosti kovů a získání tuhého roztoku s vhodnými plastickými vlastnostmi.

Tímto způsobem lze svařovat tyto vzájemné kombinace materiálů: Ti – Al, CrNi ocel – Al, Cu – Al, Cu – ocel, Al – Ni, atd.

Při svařování nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí je nutná vysoká čistota materiálu, především obsah fosforu a síry nesmí překročit 0,015% (způsobují výrazný pokles plasticity s možností vzniku trhlin). Velmi dobře lze svařovat vysokolegované austenitické korozivzdorné oceli u nichž je mez pevnosti nižší o 8 – 10 % a mez kluzu dokonce vyšší než u základního materiálu.

Výhody svařování svazkem elektronů:

- Velmi dobrý vzhled svaru s jemnou povrchovou kresbou.
- Možnost svařovat tl. 0,1 až 200 mm.
- Úzká natavená a tepelně ovlivněná oblast svaru.
- Minimální deformace.
- Možnost svařování v nepřístupných místech pro klasické technologie.
- Dokonalá ochrana svaru před vlivem vzdušné atmosféry.
- Rafinační účinky vakua.
- Možnost přenosu energie i na vzdálenost větší jak 500mm.
- Velice snadná a programovatelná regulace výkonu paprsku.
- Svařování na jeden průchod paprsku.
- Svařitelnost širokého sortimentu materiálů a jejich kombinací.

Využití elektronového svařování v technické praxi

V současnosti je uvedená metoda spojování využívána téměř ve všech strojních oborech. Svařují se tenké plechy řádově v desetinách mm v oblasti přístrojové techniky, oblast vakuové techniky, trubkové systémy a trubkovnice u výměníků tepla, kontrolní a měřící sondy v oblasti jaderné i klasické energetiky, tlustostěnné svařence při výrobě rotorů parních turbín.

3.3 Laserové svařování.

Název **LASER** vznikl ze začátečních písmen anglického popisu samotné podstaty jeho principu činnosti **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Proces zesílení má charakter řetězové reakce a je dále zvyšován průchody rezonátorem – aktivním prostředím laseru, které je uzavřeno dvěma zrcadly se vzdáleností rovnající se násobku vlnové délky emitovaného záření. Zrcadlo se 100% odrazivostí vrací všechny fotony do aktivního prostředí, ale polopropustné zrcadlo s 80% až 90% odrazivostí propustí po dosažení kritického množství fotonů část záření ve formě krátkého vysokoenergetického pulsu. Opakovací frekvence současných pevnolátkových laserů se pohybuje mezi 1 až 500 Hz (laser Nd:YAG může pracovat i v kontinuálním provozu) a celková energie pulsu 0,1 až 200 J.

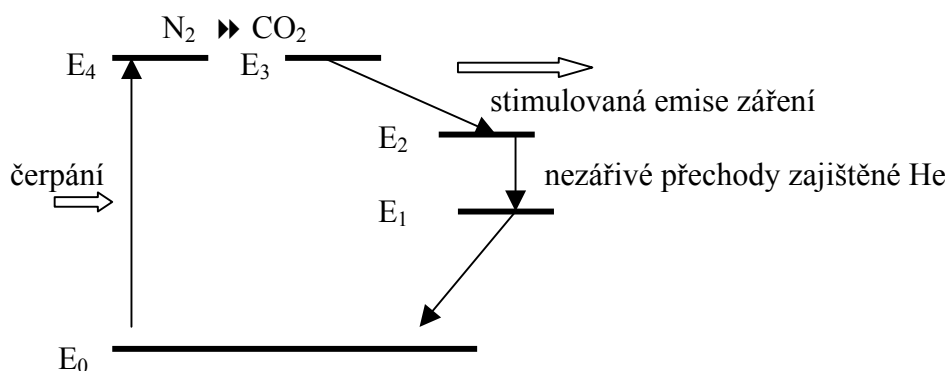
Druhy pevnolátkových laserů používaných ve svařování

název	aktivní prostředí		vlnová délka λ (μm)
	iont	materiál	
rubín	Cr^{3+}	Al_2O_3	0,694
neodymové sklo	Nd^{3+}	sklo	1,060
Nd:YAG	Nd^{3+}	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	1,065

Aktivní prostředí je tvořeno výbrusem daného druhu materiálu a čerpání je zajištěno kryptonovými výbojkami uzavřenými v reflexní dutině. Z laseru vychází záření které není fokusováno a je vedeno zrcadly do technologické hlavy v které je provedena fokusace na povrch svařovaného materiálu, (střed řezaného materiálu). Velká výhoda pevnolátkových laserů je možnost vedení částečně fokusovaného svazku pomocí světlovodných kabelů.

Výkonový plynový CO₂ laser má aktivní prostředí tvořeno směsí plynů : He + N₂ + CO₂ uzavřených ve skleněné trubici. Poměr plynů může být různý, ale nejběžnější je 82 : 13,5 : 4,5. Celý proces zesílení začíná excitací molekuly dusíku na vibrační hladinu E₄. Při srážkách molekul dusíku s molekulami oxidu uhličitého dochází k rezonančnímu přenosu energie a excitaci CO₂ na hladinu E₃. Vyzáření fotonu je realizováno při přechodu molekuly CO₂ z hladiny E₃ na hladinu E₂. Aby nedošlo při kontinuálním vyzářování ke snížení inverze je nutné zajistit návrat molekul CO₂ z hladiny E₂ na základní hladinu E₀. U výkonových plynových laserů se pro návrat molekuly CO₂ do základního stavu používá helium které odnímá oxidu uhličitému excitační energii a díky vysoké tepelné vodivosti ochlazuje aktivní prostředí laseru obr.

Plynové lasery CO₂ mohou pracovat v kontinuálním nebo pulsním režimu a jejich výkon se běžně pohybuje od 0,5 do 20 kW, přičemž max. hodnoty dosahují až 200 kW. Vlnová délka záření je 10,6 μm, účinnost plynových CO₂ laserů je vyšší než u pevnolátkových laserů a dosahuje až 20%.



Princip plynového laseru

Fokusaný svazek fotonů má tyto hlavní vlastnosti:

- vysoká hustota výkonu v dopadové ploše až $10^{13} \text{ W.cm}^{-2}$, pro svařování se používá rozsah výkonu 10^4 až 10^8 W.cm^{-2} a pro řezání cca $10^{10} \text{ W.cm}^{-2}$
- záření o jedné vlnové délce – monochromaticnost
- periodický děj probíhající bez fázových posuvů - vysoká koherence
- velmi mála divergence (rozbíhavost) svazku fotonů
- svazek fotonů nemá elektrický náboj a není ovlivňován magnetickým polem, což umožňuje svařovat i ve velmi úzkých mezerách a spárách
- výkon lze velmi přesně dávkovat a reprodukovat
- svazek fotonů lze soustředit na velmi malou plochu o průměru až 10 μm

Při svařování laserem vzniká kapilára vyplněná parami kovu pod vysokým tlakem. Páry kovů jsou vysokou teplotou ionizovány a tato laserem indukovaná plazma tryská vysokou rychlostí z místa svaru. Plazma brání pronikání fotonů do svarové spáry, pohlcuje velkou část záření svazku a snižuje hloubku průniku fotonů. Tato plazma se běžně vychyluje ofukováním

ochranným plynem Ar, Ar + CO₂, N₂ a nejlepší výsledky vykazuje He. Ochranný plyn současně chrání tavnou lázeň a tuhnoucí svarový kov před oxidací vzdušným kyslíkem. Výborné výsledky svařování se dosahují u vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu aj. Lasery umožňují velmi rychlý ohřev a svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí – Cu, Ag, Al i materiály s vysokou teplotou tavení W, Mo, Ta, Zr, Ti atd. Změna hustoty výkonu v dopadové ploše ovlivňuje rozměr i geometrii svarové lázně. Při malých hustotách do 10⁶ W.cm² dochází k přenosu tepla a formování svarové lázně hlavně vedením a je vhodné pro spojování tenkých plechů. Vysokou hustotou výkonu lze svařovat velké tloušťky materiálu a také využít pro řezání laserem.

Řezání laserem

Řezání laserem je v současnosti nejrozšířenější aplikace výkonových laserů ve strojírenství. Vysoká koncentrace energie umožňuje dělit všechny technické materiály bez ohledu na jejich tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti. Fokusem laserového svazku fotonů při dopadu na materiál ohřeje místo kontaktu na teplotu varu, přičemž okolní materiál je v úzké zóně nataven. Řezání materiálů je umožněno odstraněním par kovů a taveniny z místa řezu pomocí pracovního plynu. Plyn proudí pod vysokým tlakem výstupní řezací tryskou kolem svazku fotonů. Vzdálenost řezací trysky od povrchu materiálu je velmi malá - do 1mm a je sledována kapacitním nebo dotykovým čidlem. Podle pracovního plynu se řezání rozděluje na několik metod.

Tavné řezání používá jako pracovní plyn dusík o tlaku v rozmezí 10 až 15 barů a používá se pro vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl a jejich slitiny i pro nekovové materiály jako je keramika, plexisklo, dřevo, atd.

Oxidační řezání. Oxidační řezání se od tavného liší především použitím kyslíku jako pracovního plynu a jeho nižším tlakem cca 3 až 5 barů. Základem řezání je exotermická reakce kyslíku s řezaným materiálem, která probíhá při příslušné zápalné (reakční) teplotě kovu.

Oxidační řezání se využívá pro nelegovanou až středně legovanou ocel, poněvadž u ostatních kovů kyslík způsobuje výraznou oxidaci řezných hran. U nelegovaných ocelí je řezná plocha hladká s tenkou vrstvou oxidů.

Laserové řezání se vyznačuje těmito výhodami:

- lze řezat téměř všechny technické materiály,
- řezné rychlosti jsou vysoké – v metrech až desítkách metrů za minutu,
- tloušťka řezu u oceli dosahuje až 25 mm,
- přesnost řezání je vysoká cca 0,05 až 0,1 mm na jeden metr délky řezu,
- velmi dobrá kvalita řezných ploch s drsností cca Ra 1,6,
- lze provádět rovinné i prostorové řezy,
- vlivem snadné regulace výkonu je kvalita řezu rovnoměrná na celé řezné ploše včetně rohů, kde je výkon laseru redukován v závislosti na rychlosti pohybu řezné hlavy,
- úzká řezná spára – fokusace laserového svazku na průměr cca 0,05 mm.

B) TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

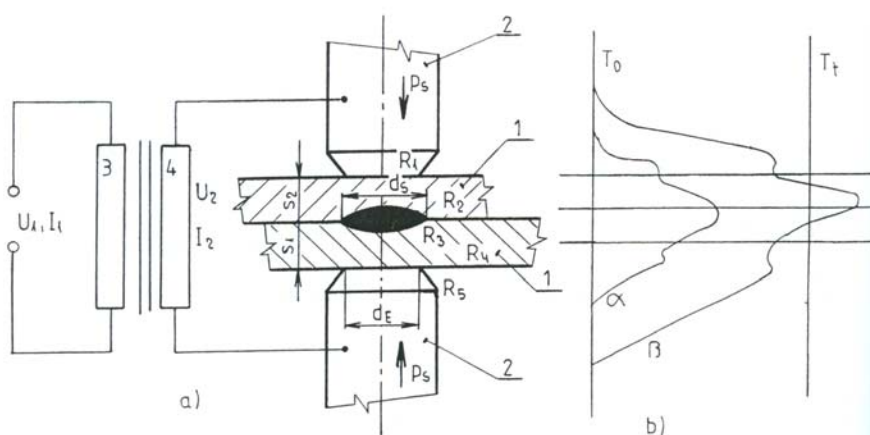
Mezi metody tlakového svařování lze zařadit tyto metody:

Svařování elektrickým odporem, svařování třením, difúzí, ultrazvukem, výbuchem, tlakem za studena a indukční. U všech způsobů vzniká spoj v důsledku silového působení při přiblížení kontaktních ploch na vzdálenost působení meziatomových sil tzn. téměř na parametr atomové

mřížky. Ke spojení dochází v tuhém nebo plastickém stavu bez vnějšího přívodu tepelné energie (kromě difúzního a indukčního svařování). Teplo se na svařových plochách vyvíjí v důsledku elektrického přechodového odporu, třecích nebo makrodeformačních pochodů. Ve svaru nevzniká lící struktura jako u tavného svařování.

4. Svařování elektrickým odporem

Průtokem elektrického proudu svařovaným místem se materiál svařovaných součástí ohřeje odporovým teplem, stane tvárným, nebo se roztaví, načež se materiály stlačí a tím se spojí. Zdrojem tepla je elektrický odpor v místě styku svařovaných materiálů (přechodový odpor).



a) schéma uspořádání b) průběh teplot (α -po době 0,02s, β -po době 0,1s)

Princip svařování el. odporem

Množství vznikajícího odporového tepla lze stanovit podle Joule- Lenzova zákona:

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

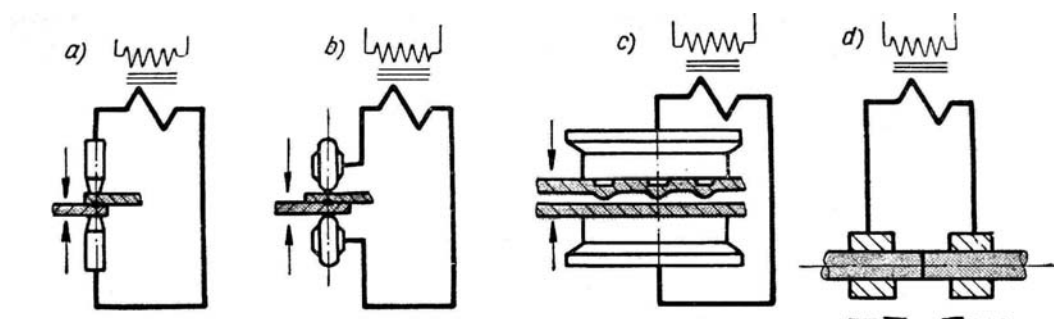
kde - Q je množství tepla v J

R – elektrický odpor (ΣR) v Ω (skládá se z několika složek odporu)

I - proud v A

t - doba průchodu proudu v s

Odporové svařování dělíme na čtyři hlavní druhy:



a) bodové odporové svařování

b) švové odporové svařování

c) výstupkové odporové svařování

d) stykové odporové svařování

Parametry svařování

Velký význam při všech způsobech odporového svařování mají parametry svařování. Při bodovém odporovém svařování jsou to např.

- svařovací proud $I_S = 10^3$ až 10^5 A
- přítlačná síla $P_S = 500$ až $10\,000$ N
- svařovací čas $t_S = 0,04$ až 2 s

Při jiných metodách odporového svařování to mohou být jiné parametry svařování, např. při švovém odporovém svařování to může být rychlost svařování, příp.modulace(přerušování) svařovacího proudu.

Stejné množství tepla dodaného do svaru můžeme dosáhnout vysokým proudem a krátkým časem nebo nižším svařovacím proudem dodaným v delším čase. Prvá kombinace parametrů svařování se nazývá **tvrdým režimem** a vyžaduje současně i vyšší přítlačnou sílu.Druhá kombinace se pak nazývá **režimem měkkým** a pracuje se s nižší přítlačnou silou.

Výhody měkkého režimu:

- a) nevyžaduje stroje velkého příkonu,
- b) umožňuje používat menší průřezy elektrických vodičů,
- c) je méně citlivý na odchylky odporové svařitelnosti svařovaných materiálů.

Nevýhody měkkého režimu:

- a) vyžaduje delší strojové časy (nižší produktivita),
- b) vznikají větší deformace a napětí ve svarových spojích,
- c) je doprovázen hrubozrnnou (méně pevnou) strukturou,
- d) vyžaduje častější úpravu svařovacích elektrod.

Výhody tvrdého režimu:

- a) vyžaduje krátké strojní časy,
- b) krátkodobé působení svařovací teploty(rychlé chladnutí svaru) vede k jemnozrnné struktuře svarového kovu,
- c) dává minimální napětí a deformace,
- d) snižuje spotřebu elektrické energie a elektrod

Nevýhody tvrdého režimu:

- a) vyžaduje stroje velkých příkonů a silnějších konstrukcí(např.závěsné odporové stroje musí mít vyvažovače),
- b) vyžaduje dobrou energetickou situaci v podniku.

Využití odporového svařování.

Nejvýznamnější aplikací je nasazení odporového svařování v automobilovém průmyslu při svařování karoserií. Např. na typu Škoda Fábie je celkem 4500 bodových svarů. Další využití je v oblasti vzduchotechniky, krytování strojních zařízení atd. Švové svařování těsnící se využívá pro svařování plechových radiátorů a nádrží.

5. Svařování třením.

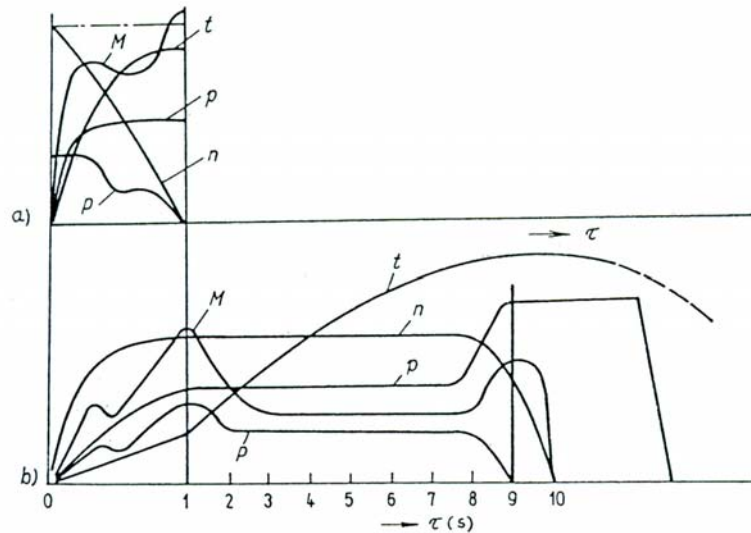
Základní princip svařování třením je založen na vzájemném pohybu dvou součástí při působení přítlačné síly. Nejčastěji se svařují rotační součásti, kdy jeden souose vystředěný díl svařované součásti rotuje a druhý stojí, nebo vykonává opačný pohyb.

Na jeden z dílů působí přítlačná síla, která dává vzniknout třecím silám. Přiváděná mechanická energie se mění na tepelnou při značně vysoké účinnosti. Vysokým měrným tlakem se oba povrchy nejprve zarovnávají, deformují a posléze nastane hluboké vytrhávání povrchu při vzniku a zániku mikrosvarů, silný ohřev (až 90% všeho uvolněného tepla) a výrazná délková deformace. Současně dochází k tvorbě charakteristického výronku.

V současnosti jsou známy dva základní způsoby svařování třením:

- svařování s přímým pohonem – konvenční, při kterém jsou otáčky po celou dobu svařování konstantní a po zastavení se měrný tlak zvyšuje na tlak kovací kdy vzniká vlastní svar. Doba svařování se pohybuje mezi 10 až 20 sec.
- svařování s akumulovanou energií – setrvačnickové, kdy svařování začíná po roztočení setrvačnicku a svar vzniká po spotřebování akumulované energie za 1 až 3 sec.

Vysoká kvalita spoje je dosažena velmi krátkou dobou svařování, jemnozrnnou strukturou a úzkou tepelně ovlivněnou oblastí.



a) Setrvačnickové svařování

b) Konvenční svařování

t – teplota, M – třecí moment, p – svařovací tlak, n – otáčky, P – tepelný příkon

Svařitelnost materiálů při svařování třením

Svařitelnost kovů při třecím svařování má relativně nízkou citlivost na chemickém složení, což umožňuje svařovat i kombinace kovů tavným způsobem nesvařitelných. Třením lze svařovat většinu druhů ocelí, hliník, měď, nikl, molybden, titan, monel, nimonic at. Velmi dobrou svařitelnost má hliník s řadou kovů Zr, W, Ti, Ni, Mg, Cu, mosaz a uhlíková ocel. Pro oceli je svařitelnost limitována uhlíkovým ekvivalentem C_e (3):

$$C_e = C + 0,04 Si + 0,02 Ni + 0,2 Cr + 0,25 Mo + 0,17 Mn \quad (\%) \quad (13.8)$$

Při uhlíkovém ekvivalentu:

- 0,2 – 0,4 % není třeba tepelné zpracování (TZ),
- 0,4 – 0,5 % TZ se provádí pro zvýšení tažnosti a vrubové houževnatosti,
- 0,5 – 0,8 % TZ je nutné vždy provést,
- nad 0,8 % TZ je nutné provést ihned bez ochlazení na teplotu okolí.

Mechanické vlastnosti spojů jsou velmi dobré a reprodukovatelné. Spoj má výrazně zjemnělé zrna (10 až 30 krát proti základnímu materiálu) ve spoji nevzniká propal, trhliny za tepla a plynové dutiny. Charakteristickou vadou bývá studený spoj případně trhliny za studena. Stykové plochy je vhodné očistit od oxidů a tuků. Velikost vyložení z upínacích čelistí má být co nejmenší 0,4 až 0,7 krát průměr. Svařuje se na vzduchu, v ochranných kapalinách a materiály citlivé na kyslík v ochranných plynech.

Aplikace a využití třecího svařování

Kromě kovů se dá třecí svařování využít i pro spojování keramiky a skla s kovy.

V oblasti strojírenské výroby tvoří největší podíl rotační součásti typu hřídelí, čepů, trubek, válců atd. Lze spojovat i profily např. čtvercového nebo šestihranného tvaru, a součásti s přesně definovaným tvarem, protože mikroprocesorem řízené svařovací zařízení kontroluje a nastavuje požadovaný úhel natočení.

Aplikací třecího svařování je velmi mnoho např. v automobilovém průmyslu – kardanové hřídele, řídicí tyče, pastorky, ventily spalovacích motorů, hnací hřídele, tlumičů, hřídelí turbodmychadel, vačkových hřídelí, komplety náprav atd. V oblasti těžebního průmyslu svařování vrtných tyčí, uzavíracích ventilů a trubkových systémů.

6. Difúzní svařování.

Vlastní spojení kovů při tomto způsobu svařování vzniká za působení teploty a odpovídajícího měrného tlaku na kontaktních plochách. Spoj je tvořen přiblížením kontaktních ploch v důsledku lokální plastické deformace, která zaručuje vzájemnou difúzi v povrchových vrstvách spojovaných materiálů.

Hlavní parametry difúzního svařování jsou teplota, tlak a čas. Teplota svařování závisí na tavicí teplotě svařovaných materiálů, přičemž u dvou rozdílných kovů se řídí nižší tavicí teplotou kovu. Teplota dosahuje 70 až 80 % teploty tavicí. Svařovací tlak musí zaručit přiblížení spojovaných ploch na takovou vzdálenost, aby mohla nastat difúze v celé ploše, ale současně nedošlo k tvorbě makroskopické deformace. Čas potřebný pro difúzi se pohybuje v minutách v rozmezí od 3 do 60 minut. Svařování se provádí ve vakuu nebo taveninách solí.

Příklady parametrů difúzního svařování

Svařované materiály	Teplota (K)	tlak (MPa)	čas (min)
nízkouhliková ocel	1223	16	6
ocel 12060 +19858	1273	20	3
austenitická ocel+ Cu	923	18	40
ocel 0,5 %C + Cu	1123	5	10
Cu	1158	6	8
AlMg	773	2	10
Mo	1873	10	20
Mo + Nb	1673	10	20
Grafit + Ti	1223	7	20
TiC + Mo	1700	5	10
ZrC + Nb	1673	15	10
WC + Mo	2123	5	10
TaC + Mo	1873	5	10
Al ₂ O ₃ + Cu	1300	20	15
silikáthliníkové sklo + Nb	840	50	20
borosilikátové sklo + kovar	770	5	20

Difúzním svařováním lze spojovat kovy různých vzájemných kombinací a také kovy s keramikou, sklem, a grafitem. Svařování se uplatňuje v oblasti nástrojů, přístrojové techniky, kosmické a letecké techniky.

7. Svařování tlakem za studena.

Svařování tlakem za studena patří mezi nejstarší technologie spojování kovů. Principem svařování je přiblížení povrchů svařovaných materiálů na vzdálenost řádově parametrů mřížky, kdy dochází k interakci mezi jednotlivými atomy kovu za vzniku pevné vazby. K dosažení požadovaného přiblížení je nutná výrazná plastická deformace, která musí být minimálně 60% a pro různé materiály platí hodnoty uvedené v tabulce. Výhodný je výrazný poměr mezi tvrdostí kovu a příslušným oxidem.

Velikost potřebné deformace svařovaného materiálu

Svařovaný kov	deformace v %	poměr tvrdosti oxidu k tvrdosti kovu
Al	60	4,5
Al - technicky čistý	70	-
Cd	84	1,5
Pb	84	1,33
Cu	86	1,3
Ni	89	1,1
Zn	92	-
Ag	94	-

Svařovací tlak závisí na druhu materiálu, jeho stavu, typu svarového spoje, tvaru a velikosti profilu. Běžně se svařovací tlaky pohybují mezi 500 MPa až 4 GPa.

Pro uvedené kombinace materiálů jsou tyto doporučované hodnoty měrného tlaku:

Al + Al do 1000 MPa, Al + Cu do 2500 MPa, Cu + Cu do 3500 MPa.

Výhodně lze svařovat materiály s kubickou plošně centrovanou mřížkou, která má kluzové roviny obsazené velkým počtem atomů – Al, Cu, Ni, Pb, Au, Ag, Pt, Pd, Ir a austenitická nerezavějící ocel. Značně menší deformační schopnost mají kovy s prostorově centrovanou mřížkou, které se pro svařování nedoporučují.

Aplikace a využití svařování tlakem za studena:

- 1) svařování hliníkových a měděných vodičů
- 2) svařování měděných jednožilných trolejí až do průřezu 150 mm²
- 3) při výrobě tlumivek spojování Cu a Al
- 4) v obalové technice – balení potravin, léčiv, radioaktivních, chemických a výbušných látek
- 5) výroba hliníkového nádobí
- 6) napojování drátů v tažárnách.

Výhody svařování tlakem za studena:

- při svařování nenastává tepelné ovlivnění materiálu a vznik taveniny
- spojovat lze i velmi rozdílné kovy které nejsou vzájemně rozpustné – Ti + Cu, Pt + Al, Cu, Ni, Ni + Al, Cu atd.
- struktura spoje je jemnozrnná se značným deformačním zpevněním
- není třeba kvalifikovanou pracovní sílu
- nevznikají exhalace, tepelné, viditelné a ultrafialové záření

8. Svařování ultrazvukem.

Tento způsob svařování využívá mechanického kmitání o vysoké frekvenci – ultrazvuku, pro vytvoření svarového spoje. Zdroj kmitání se skládá z ultrazvukového měniče, jehož vinutí je napájeno elektronickým vysokofrekvenčním generátorem proudu o frekvenci 4 – 100 kHz. Vlastní kmitač se skládá z magnetostrikčního měniče (Slitina Fe + Ni, Fe + Co + V), nebo piezoelektrického měniče (titanát baria, zirkontitanát olova) na který je připojen trychtýřovitý vlnovod zesilující amplitudu kmitání. Vlnovod je ukončen tzv. sonotrodou, která přenáší kmitání na svařovaný materiál. Sonotrody jsou přitlačovány silou, která zajišťuje přenos ultrazvukových kmitů do místa spoje. Kmitání je přenášeno na rozhraní dvou spojovaných materiálů, kde dochází k plastické deformaci kovů a relativně malému zvýšení teploty.

Výhodně se svařují materiály s kubickou, plošně centrovanou mřížkou – Al, Cu, Ni, Co atd., které se vyznačují velmi dobrou plastičností. Optimální amplituda svařování se pohybuje mezi 5 – 35 μm . Frekvenci kmitů v zásadě určuje typ ultrazvukového zařízení a pohybuje se v intervalu mezi 10 až 100 kHz. Svařovací časy jsou velmi krátké a dosahují obvykle 3 až 6 vteřin s maximem do 10 vteřin. Přítlačná síla zajišťuje přenos ultrazvukových kmitů na materiál a optimální hodnota měrného tlaku se pohybuje v rozmezí 0,4 až 1,2 MPa.

Svařitelnost materiálů

Svařitelnost kovů ultrazvukem je podobná svařitelnosti tlakem za studena. Při volbě kombinací jsme však omezení velikostí průměrů atomů, které se mohou lišit do 18 %, což odpovídá možnosti vzniku substitučního tuhého roztoku. Při rozdílech průměrů atomů 19 až 44% se ultrazvukový spoj nevytvoří. Obecně jsou čisté kovy lépe svařitelné než jejich slitiny. S růstem tloušťky materiálu vzrůstá útlum mechanického vlnění a maximální tloušťky materiálu jsou:

- a) hliník 3,17 mm
- b) měď 2 mm
- c) ostatní materiály – Ni, Mo, Fe, Co, Ta atd. se svařují v rozsahu 0,5 – 0,7 mm.
- d) folie zlata, stříbra a platiny se dají svařovat do tl. $4 \cdot 10^{-3}$ mm.

Svařitelnost materiálů je velmi široká a kromě stejných kovů, lze spojovat i celou řadu různorodých materiálů: hliník a jeho slitiny jsou svařitelné s téměř všemi kovy.

Měď, molybden, železo a stříbro mají také velmi širokou svařitelnost viz tabulka 13.9.

Aplikace ultrazvukového svařování

Ultrazvukové svařování je s výhodou použitelné tam, kde jiné technologie jsou nevyhovující a ultrazvukové spojování je jedinou možnou metodou. Nejčastější použití je v oblasti elektrotechniky, elektroniky, letecké a kosmické techniky. Například lze spojovat hliníkové a stříbrné drátky s napařenou tenkou vrstvou kovu, torzní svařování ve tvaru prstence a švové svařování se používá pro hermetické uzavírání obalů chemikálií, léčiv, výbušnin a radioaktivních látek. Velmi rozšířené je také svařování plastů v oblasti všeobecného strojírenství a potravinářství.

9. Svařování výbuchem.

Při svařování výbuchem dojde ke spojení materiálů působením tlaku vzniklého při detonaci výbušniny umístěné na horní ploše svařovaného materiálu. Poloha materiálů při svařování může být v rovnoběžném nebo šikmém uspořádání.

Sráz desek v místě kontaktu se řídí zákony ideální kapaliny a vzniká při něm rázová vlna s amplitudou tlaku dosahující 10 – 100 GPa. Tato hodnota v podstatné míře převyšuje mez kluzu materiálu v tlaku a proto se pro řešení vzájemného kontaktu materiálů používají vztahy

hydrodynamické teorie ideálních kapalin. Sráž desek musí být při vzájemné rychlosti pod hodnotou rychlosti zvuku svařovaných materiálů. Příklady rychlostí zvuku různých materiálů:

Složení prostředí a rychlosti zvuku

Vzduch – 335 m.s^{-1} , Voda – 1490 m.s^{-1} , Železo – 5850 m.s^{-1} , Hliník – 6260 m.s^{-1} , Měď – 4700 m.s^{-1} , Nikl – 5630 m.s^{-1} , Zirkon – 4900 m.s^{-1} atd.

Kovem postupuje rázová vlna, která způsobuje výraznou plastickou deformaci materiálu, část materiálu tzv. tlouk zůstává na linii srážu a druhá podstatně menší tzv. trysk se pohybuje rychlostí převyšující detonační rychlost trhaviny ve směru jejího hoření. Trysk je tvořen povrchovými oxidy, částicemi kovu, tuky na povrchu, stlačeným horkým vzduchem a jeho stabilita není rovnoměrná čímž se vytváří typické zvlnění rozhraní dvou materiálů. Plastická deformace je při svařování výbuchem určujícím faktorem vzniku spoje a musí dosáhnout min 30%. Deformace závisí na dynamickém úhlu srážu, rychlosti v místě kontaktu, rychlosti zvuku, hustoty a meze kluzu plátovaného materiálu.

V současnosti se pro svařování používají sypké trhaviny typu SEMTEX S 25, S 30, a S 35 výrobce Synthesia Semtín. Uvedené trhaviny (směs pentritu a hydrogenuhličitanu sodného) mají nízké detonační rychlosti od 2050 do 3000 m.s^{-1} , detonační tlaky od 1,9 do 3,5 GPa. a zrnitost optimální pro svařování..

Technologie spojování materiálů výbuchem se používá v těchto modifikacích a aplikacích:

- navařování (plátování) bimetálů a vícesložkových kompozitů ze speciálních slitin, přístrojová a měřicí technika, plátování částí chemických, petrochemických a potravinářských zařízení nerezavějící ocelí, navařování titanu při výrobě tepelných výměníků, svařování přechodových mezikusů pro následné tavné svařování různorodých – např. ocel a hliník pro spojení ocelové vany pro elektrolýzu s hliníkovým přívodem el. proudu, nebo spojení ocelového lodního trupu s hliníkovou palubou, svařování otěruvzdorných materiálů na ocel atd.
- výroba expandovaných voštin – letecký průmysl,
- švové svařování,
- bodové svařování – elektrické kontakty, nástroje,
- navařování práškových materiálů,
- svařování trubkovnic a trubkových systémů,

Svařitelnost materiálů:

Velmi dobře se spojují materiály s vysokou plasticitou. Vzhledem k tvorbě svaru při teplotách pod teplotou tavení můžeme svařovat mimo stejných materiálů i různorodé kombinace např. uhlíkovou ocel + CrNi austenitickou ocel, ocel + měď, titan, hliník, molybden, nikl, platinu a nástrojovou ocel, stříbro + měď, nikl, titan + stříbro, měď. Tloušťka plátovaných plechů může být až 30 mm, ale spojují se i 0,1 mm tenké folie pomocí rázu kapaliny. Lze spojovat hliníkové, mosazné, niklové a austenitické folie s měděnou podložkou.

Výhody výbuchového svařování:

Krátký svařovací čas, minimální ohřev v úzké kontaktní zóně, svařování různých tlouštěk, spojování různorodých materiálů, plátování jednostranné i oboustranné

Seznam použité literatury:

- [1] Engst, P., Horák, M.: Aplikace laserů. SNTL Praha 1989.
- [2] Minařík, V.: Tepelné dělení materiálu. ČVUT Praha 1993.
- [3] Kuncipál, J. a kol.: Teorie svařování. SNTL Praha 1986.
- [4] Kuncipál, J., Pilous, V., Dunovský, J.: Nové technologie svařování. SNTL Praha 1984.
- [5] Turňa, M.: Špeciálne metódy zvarania. ALFA Bratislava 1989.
- [6] Gibson S.W. : Advanced welding. Macmillan Press LTD , London 1997
- [7] Prospektový materiál firem Hypertherm, Thompson, AGA, Synthesia, Leybold, Lumonics, Bystronic, Thermacut, Rofin-Sinar.
- [8] Kučera J.: Teorie svařování VŠB Ostrava, 1991.
- [9] ČSN ISO 857 Metody svařování, tvrdého a měkkého pájení, 1997
- [10] Prospektový materiál firmy KOSTER CS spol. s r.o. Žacléř, Nádražní 235
Svorníkové svařování.
- [11] Trillmich, R., Keuchel, W.: Erfahrungen beim Bolzenschweissen in
Mullverbrennungsanlagen.
Der Praktiker. 1995, No. 7, s. 345
- [12] KOPŘIVA R.: Technologie zvarania v ochranných plynoch metódou MIG/MAG.
Zeross, Ostrava 1993.
- [13] MINAŘÍK V.: Obloukové svařování. Scientia Praha 1998.
- [14] ŽÁK J., NOVÁK M.: Teorie svařování. VUT Brno. 1988.
- [15] Prospektový materiál firem: LINDE, AGA, FRONIUS, MIGATRONIC, ESAB,
KEMPPI, LINCOLN-ELEKTRIC atd.