

TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K

ÚST, odbor svařování a PÚ

Autor: J.Kubíček

1. Teorie vzniku svarového spoje

Svařováním kovů a jejich slitin je definováno jako nerozebíratelná spojení s využitím tepelné, mechanické nebo radiační energie. Spojení nastane působením meziatomových sil, a adhezních vazeb na teplem nebo tlakem aktivovaných kontaktních plochách. Pevné látky mohou mít různý typ vazby, která odpovídá různým typům rozložení elektronů a iontů. Ionty jsou v atomu uspořádány tak, aby potenciální energie krystalu byla co možná nejmenší. Základem vazby je mrak valenčních elektronů, které mohou volně přecházet od atomu k atomu. Ke kovové vazbě tedy dochází, pokud přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převyšují odpudivé síly elektronů v tomto mraku. Ionty jsou uspořádány podle přesně definovaného rozložení, podle něhož v pevných látkách existují mezi ionty síly přitažlivé a odpudivé.

Proces svařování vyžaduje aktivaci kontaktních ploch, tj. dodání energie aktivace pro překonání bariery potenciální energie povrchových atomů

Pro svařování lze použít následující formy aktivační energie:

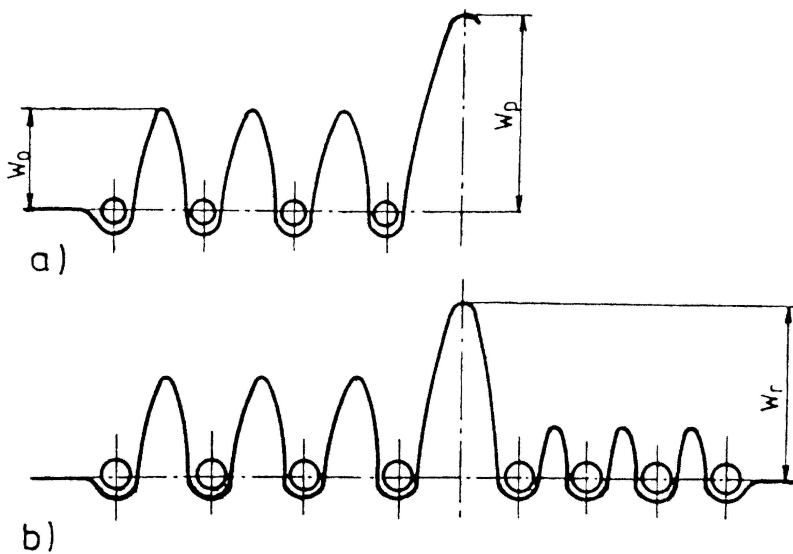
termická aktivace – tavné svařování

pružné a plastické deformace – mechanická aktivace – tlakové svařování

elektronové, fotonové nebo iontové ozáření – radiační aktivace – tavné svařování

Všechny běžné metody svařování lze rozdělit na dvě velké skupiny: tavné svařování a tlakové svařování. U tavného svařování je vytvoření spoje dosaženo přívodem tepelné energie do oblasti svaru, kdy dochází k natavení základního, případně přídavného materiálu. Tekutá fáze je vázána na povrch tuhé fáze adhezními silami a při tuhnutí taveniny se slabé adhezní síly mění na chemickou vazbu ve formě krystalové mřížky. Rostou nová zrna a původní rozhraní tavenina a tuhá fáze zaniká. Růst zrn je orientován proti směru odvodu tepla a kolmo na izotermy. Svarový kov je charakterizován tzv. dendritickou krystalizací, přičemž velikost dendritů závisí na množství přivedeného tepla na jednotku délky svaru.

Tlakové metody svařování jsou založeny na působení mechanické energie. Aktivací povrchových atomů a makro nebo mikro deformací se přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil, přičemž vznikne vlastní spoj. Pro snížení zatěžovací síly lze kontaktní místo ohřát pod teplotu tavení. U obou způsobů svařování je třeba překonat energetickou hladinu potenciální energie na rozhraní spojovaných ploch obr. 1.

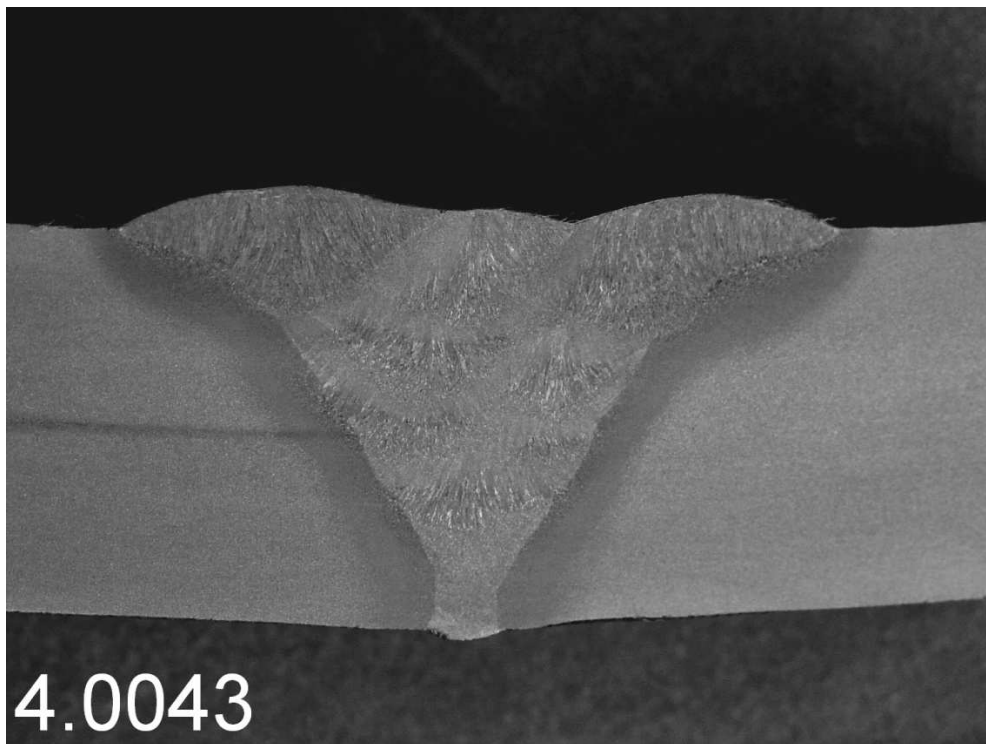


W_0 – potenciální energie nutná pro změnu polohy iontu uvnitř krystalu

W_p – vliv povrchu krystalu na velikost potenciální energie (energie nutná pro změnu polohy iontu) W_r – potenciální energie na rozhraní fází

Obr. 1. Energetické bariéry potenciální energie.

U tavných metod svařování je kolem roztavené části tzv. svarový kov pásma, kde dosáhla teplota hodnoty překrystalizačních pochodů a proběhla alespoň částečná překrystalizace tato oblast se nazývá tepelně ovlivněná oblast – obr.2.



Obr.2 Svarový spoj vytvořený tavným svařováním

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 ISO 4063 Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování.

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 (138)

k) Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu(132)

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

2. Plamenové svařování a související procesy

V oblasti tavného svařování zaujímá svařování plamenem stále důležité místo, i když objem konstrukcí svařovaných plamenem je dnes minimální. Velká výhoda procesu je v jeho univerzálnosti, mobilnosti a nezávislosti na zdroji elektrické energie. Samotné zařízení lze kromě svařování využívat také na řezání kyslíkem, pájení, rovnání plamenem, navařování, ohřev, čištění (otryskávání) plamenem a žárové nástřiky.

Předností acetylenu je různý redukčně-oxidační účinek svařovacího plamene, který lze snadno nastavit a regulovat. Svařování plamenem se vyznačuje dobrým přemostováním mezer, není nutná žádná nebo jen minimální opracování svárů, i jednoduchá příprava svarové plochy. Bezproblémové nasazení je také ceněné i při svařování v obtížných polohách například při montážním svařování potrubí v plynárenství, kde jiné svařovací metody zpravidla vůbec nepřicházejí v úvahu nebo jsou nevhodné.

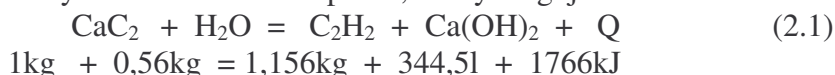
Naopak ke svařování se rozšiřuje navařování vrstev speciálních slitin kovů v oblasti renovací i prvovýroby. Existují např. speciální přídavné materiály s rozměrnými karbidy, které nelze jinak než plamenem navařit nebo pájet na tvrdo. Plamenové svařování je založeno na využití tepla chemické energie, která vznikne hořením směsi okysličujícího a hořlavého plynu. Vlastnosti plamene se řídí použitými plyny viz. tab.2.1 U kyslíko-acetylenového plamene je maximální teplota plamene 3162 °C, teplo primárního plamene 19 MJ·m⁻³, teplo sekundárního plamene 36 MJ·m⁻³ a hustota energie 5. 10³ W.cm⁻² Rychlost hoření plamene v kyslíku je 11,5 m·s⁻¹ a zápalná teplota v kyslíku je 296 °C.

Hořlavé plyny

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

Acetylén C₂H₂

Acetylén patří mezi nenasyčené uhlovodíky a je v ČR nejpoužívanější plyn pro svařování s dlouhou tradicí. Má typický nasládlý česnekový zápach, který jej detekuje i při nízkých koncentracích ve vzduchu. Vyrábí se z karbidu vápníku, který reaguje s vodou dle rovnice 2.1



Molekula acetylénu je složena ze dvou molekul uhlíku spojených trojnou vazbou a dvou symetrických atomů vodíku. Díky trojně vazbě uhlíku není za vyšších tlaků nad 0,2MPa stabilní, dochází k jeho rozkladu a následnému výbuchu. Z těchto důvodů je tlak v hořáku a hadicích omezen na 0,15MPa. Slučovací teplo uvolněné při rozpadu acetylénu je z hořlavých plynů nejvyšší a proto je acetylén nejlepší plyn na svařování. Skladování acetylénu je možné jen v tlakových lahvích naplněných vysoce pórovitou hmotou obsahující rozpouštědlo aceton, na kterém jsou molekuly acetylénu absorbovány a uvolňují se v závislosti na odběru plynu

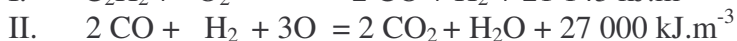
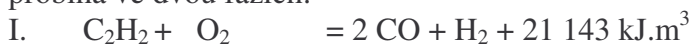
z lahve. Velkou výhodou acetylenu je, že je lehčí než vzduch (relativní hustota 0,91) a při případném úniku stoupá do atmosféry.

Kyslík O₂

Kyslík je nehořlavý plyn, ale oxidační hoření podporuje. Je těžší než vzduch s hustotou 1,429 kg.m³ a relativní hustotou 1,11. Při atmosférickém tlaku má teplotu varu – 183 °C. V oblasti svařování se používá jako oxidovadlo při svařování plamenem a pro spalování ocelí při řezání kyslíkem. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu stejně jako dusík a argon. Princip je založen na expanzi vyčištěného (molekulová síta) a stlačeného (čtyřstupňový turbokompresor) vzduchu v protiproudém chladiči, kde dochází ke zkapalnění. Teplota kapalného vzduchu je při atmosférickém tlaku cca - 200°C. Kapalný vzduch se nastříkuje do rektifikační kolony, kde na základě rozdílných teplot varu plynů (dusík –196°C, argon -185°C a kyslík – 183°C) dochází k jejich oddělení. Plyny se skladují v kryogenních tancích v kapalně formě a distribuce probíhá v tlakových lahvích jako plyn nebo pomocí kryogenních nádob jako kapalina.

Kyslíko – acetylenový plamen.

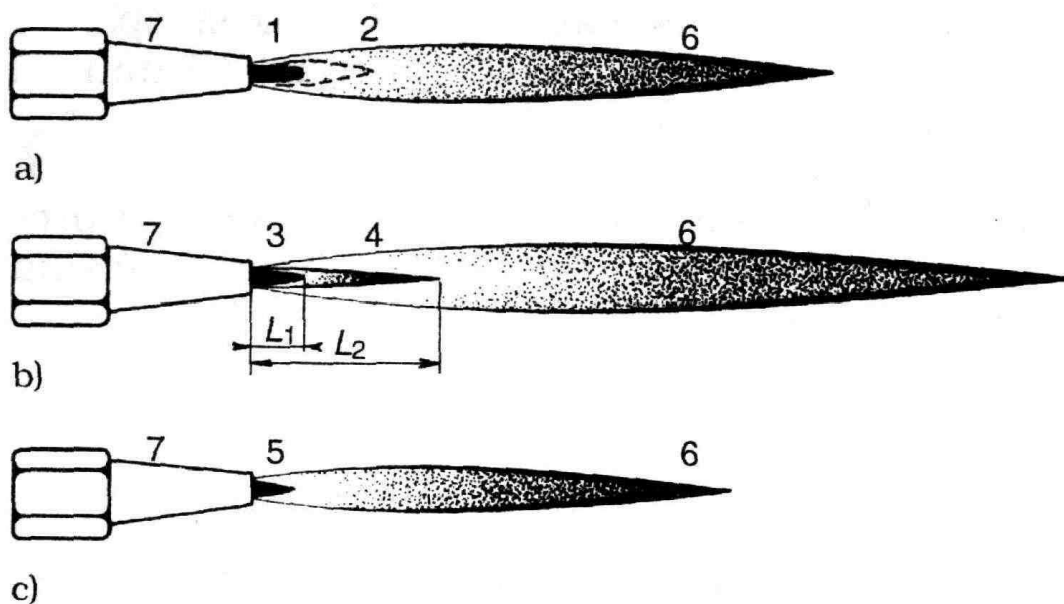
V neutrálním plameni je svařovací plamen ostře ohraničen a září oslnivě bíle. Proces spalování probíhá ve dvou fázích:



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

V druhé fázi hoření ve vnějším kuželu dochází ke spalování oxidu uhelnatého s kyslíkem na oxid uhličitý a vodík shoří na vodu. Kyslík potřebný k reakci si plamen odebírá ze vzduchu se značným přebytkem, takže vnější plamen má oxidační účinky.

Jednotlivé typy kyslíko-acetylenového plamene podle rozdělení na plamen neutrální, redukční a oxidační jsou uvedeny na obr. 3.



Obr.3 Rozdělení plamene kyslíko-acetylenového podle poměru kyslíku a acetylenu

a) neutrální

b) redukční(s přebytkem acetylenu)

c) oxidační(s přebytkem kyslíku)

Legenda:

1-svařovací kužel ostře ohraničený, oslnivě bílý, 2-redukční oblast plamene, 3-svařovací plamen oslnivě bílý, překrytý bělavým závojem, 4-bělavý závoj, 5-svařovací oxidační plamen zkrácený, modrofialový, 6-vnější oxidační plamen, 7-svařovací hubice

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

neutrální, poměr $O_2 : C_2H_2 = 1$ až $1,1 : 1$

redukční, poměr $O_2 : C_2H_2 < 1$

oxidační, poměr $O_2 : C_2H_2 = 1,2 : 1$

Neutrální plamen se v praxi používá pro svařování ocelí, slitin niklu, mědi a dále pro nahřívací plamen při řezání kyslíkem. Plamen s přebytkem acetyleny (přebytek acetyleny 5 až 15%) se používá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin z důvodu vysoké afinity ke kyslíku. Dále k navařování tvrdokovu a k cementování plamenem. Přebytek acetyleny v plameni lze také určit podle délek svítících kuželů L_1 a L_2 , viz obr. 2.1b. Plamen s přebytkem kyslíku (přebytek kyslíku 5 až 20%) se používá pro svařování mosazi a bronzů z důvodu vytvoření oxidické vrstvy bránící odpařování zinku, případně cínu z těchto slitin.

Rozdělení plamenů dle výstupní rychlosti:

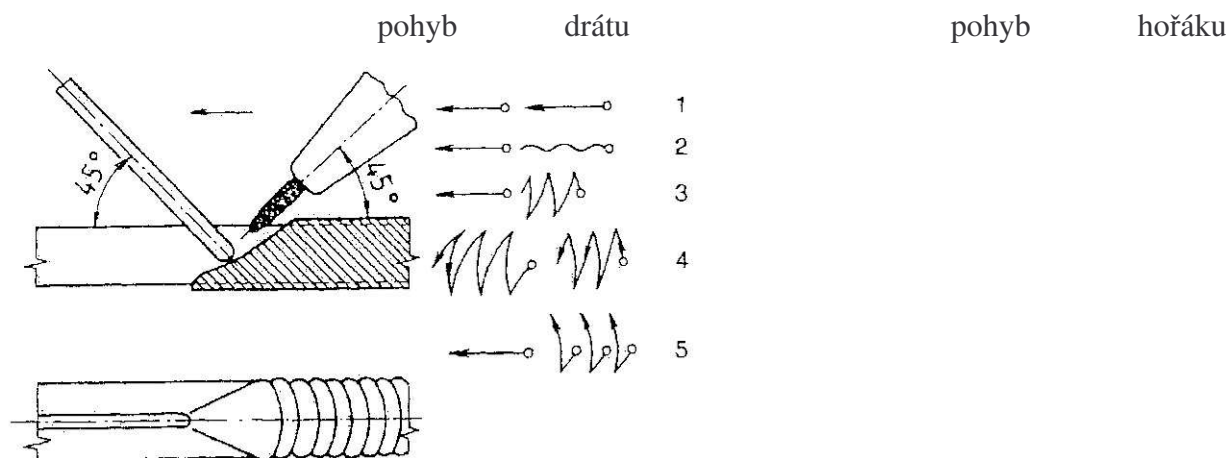
Měkký - výstupní rychlost 70-100 m/s, nestabilní, náchylný ke zpětnému šlehnutí, malé víření tavné lázně, používá se minimálně - jen pro návary, kde požadujeme rovinnost povrchu svaru.

Střední - výstupní rychlost 100-120 m/s, stabilní, přiměřený dynamický účinek, zaručuje dobrou jakost svaru a dostatečný výkon. Pro svařování ocelí i ostatních kovů.

Ostrý - výstupní rychlost větší než 120 m/s, má velký dynamický účinek na svarovou lázeň, rozpouští se více plynů ve svarové lázni a zvětšuje tepelné ovlivnění. Vyšší výkon při svařování na úkor jakosti svaru.

Technika svařování

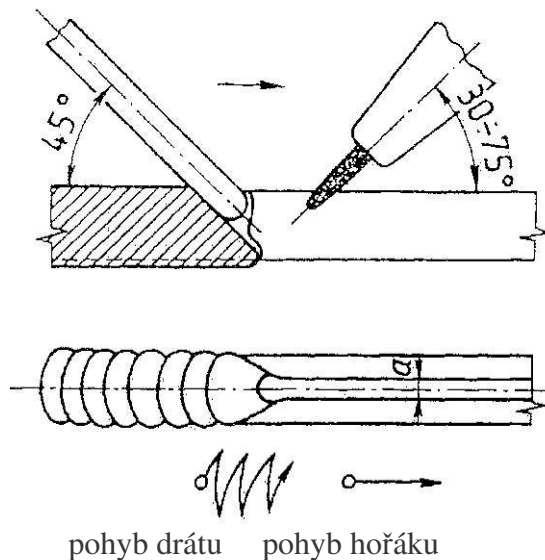
Svařování vpřed - přídavný materiál je veden před hořákem ve směru svařování. Je méně náročný způsob svařování, než vzad. Tímto postupem je větší nebezpečí nedokonalého provaření kořene svaru vlivem předbíhání svarové lázně. Plamen předehtívá základní materiál, ale netemperuje a nechrání vytvořený svar - vyšší oxidace a tvrdost svaru. Použití tohoto postupu je vhodné pro tenké plechy do tloušťky 4 mm.



Obr. 4 Svařování vpřed - tupý V svar

Vedení hořáku a drátu: 1- tenké plechy, 2- svar I do 4mm, 3- svar V do 8mm, 4- svar V nad 8mm, 5 nesprávné vedení hořáku

Svařování vzad - přídavný materiál postupuje za hořákem a tvaruje povrch svarové housenky. Plamen je směřován na tavnou lázeň i na chladnou svar, který je spaliny chráněn a ohřevem se snižuje rychlost chladnutí. Dochází tím k ochraně tavné lázně i tuhnutí svaru před nepříznivými účinky okolní atmosféry. Svařováním vzad dosáhneme kvalitnější svař, zaručené provaření kořene, menší pnutí a deformace. Tento způsob je předepsaný pro namáhané svař nejrozličnějších konstrukcí.



Obr. 5 svařování vzad tupý V svar

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.

Zařízení pro svařování a bezpečná manipulace se zařízením při svařování.

Zařízení pro svařování plamenem se skládá z **tlakových lahví** s lahvovými ventily. Láhve jsou kované s tloušťkou stěny 8 mm pro tlak 200barů (kyslík a další stlačitelné plyny) a min 3 mm pro acetylén. Láhve musí být zajištěné proti pádu a minimální vzdálenost od otevřeného ohně je 3m. Vodní objem lahví je 10, 20, a dnes nejčastěji 50l. U acetylenové láhve je maximální odběr 1000 l/hod a v případě potřeby většího odběru plynu se používají svazky lahví s jedním místem připojení na rozvod. Lahvové ventily je možné otevírat pouze rukou, plynule a bez použití náradí. Nelze-li ventil otevřít rukou, láhev je nutno vrátit příslušnému distributorovi technických plynů, poněvadž při násilném otevření se může poškodit těsnění a láhev nepůjde zavřít. U kyslíku se ventil nesmí otevírat prudkým trhnutím – nebezpečí vzplanutí přípojky redukčního ventilu. Před připojením redukčního ventilu na kyslíkovou láhev je třeba nakrátko otevřít ventil, aby se vyfoukly nečistoty z přípojky. U acetylenového ventilu se nečistoty odstraní mechanicky.

Redukční ventily jsou připojeny k lahvovým ventilům třmenem u acetylénu a šroubením u kyslíku. Slouží ke snížení vysokého tlaku z láhve na pracovní tlak vhodný pro svařování a

zajištění konstantního průtoku v průběhu svařování. Redukční ventily se skládají z vysokotlaké části s manometrem lahvového tlaku spojenou škrťací kuželkou s nízkotlakou částí. Ovládání pracovního tlaku se děje pomocí rovnováhy na membráně mezi silou pružiny a tlakem v nízkotlaké části ventilu. Při odběru acetylénu klesá pracovní tlak a síla pružiny zvedá škrťací kuželku, čímž přepouští plyn z vysokotlaké části do pracovní.

Suchá předloha je významná součást svařovací soupravy a připojuje se za redukční ventil na oba svařovací plyny. Obsahuje čtyři bezpečnostní prvky- zpětný ventil k zabránění zpětnému proudění plynu,- zhášecí vložku, která zabraňuje zpětnému šlehnutí plamene – tepelný uzavírací ventil a tlakový uzavírací ventil.

Hadice slouží pro vedení plynu od ventilů do hořáku. Používají se barevně odlišené vysokotlaké hadice s textilní vložkou, které mají různý vnitřní průměr (acetylén 8mm a kyslík 6,3mm), jejich délky je min 5m a podle normy ČSN 050610 se zkouší nejvyšším pracovním přetlakem 1x za 3 měsíce na těsnost včetně spojů. Nejvyšší pracovní přetlak je u acetylénu - 0,15 MPa a u kyslíku v rozmezí 0,8 – 1,5 MPa.

Svařovací hořák se skládá z rukojeti s regulačními ventily a vyměnitelného nástavce hořáku. Hořáky se používají injektorové a rovnotlaké. Ve svařovacím hořáku injektorovém (obr. 2.x) je acetylén nasáván kyslíkem proudícím pod vysokým tlakem a u rovnotlakého se mísí oba plyny při stejném tlaku ve směšovací komoře. Pro svařování plamenem injektorovým hořákem se nastavuje pracovní tlak kyslíku asi 0,3 až 0,5MPa, acetylénu 5 až 100 kPa a při zapalování se nejprve pustí malým průtokem kyslík a pak pracovním acetylén. Po zapálení se nastaví požadovaný typ plamene.

Přídavné materiály

Jako přídavný materiál pro svařování plamenem se používá drát podobného nebo stejného chemického složení a mechanických vlastností jako základní materiál. Dráty se dodávají v délkách 1m a jsou leskle tažené, případně poměděné s označením na prolisu u jednoho konce. Průměry drátů jsou 1,6-2,0-2,5-3,2-4,0-5,0-6,3-8,0-a 10,0mm. Pro označování platí norma ČSN EN 12536, Svařovací materiály - Dráty pro plamenové svařování nelegovaných a žáropevných ocelí – Klasifikace. Značení drátů jsou O - Z,I,II,III,IV,V až VI.



obr.6 Injektorový svařovací hořák

K výbavě svářečů patří i ochranné brýle pro možnost sledování tvorby tavné lázně a ochranu před rozstříkáním kovu při svařování a řezání. Tmavost skel je uvedena v tabulce 2.2 a 2.3.

Tab.2.2 Tmavost skla při řezání kyslíkem:

Spotřeba kyslíku v l/hod	Do 900	900 - 2000	2000 - 4000	4000 - 8000	Nad 8000
Stupeň ochrany - číslo skla	4	5	6	7	8

Tab.2.3 Tmavost skla při svařování acetylen s kyslíkem:

Spotřeba acetylenu v l/hod	Do 70	70 - 200	200 - 800	Nad 800
upeň ochrany - číslo skla	4	5	6	7

Rovnění plamenem

Při tavném svařování nebo výrobních postupech, při nichž je materiál tepelně ovlivněn, dochází v důsledku nerovnoměrného ohřevu k napětím a plastickým deformacím. Rovnění plamenem představuje účinný a po dlouhou dobu osvědčený způsob opravy deformovaných dílců. Někdy je rovnání plamenem často jedinou možností opravy konstrukce a je podstatně levnější než výroba nových dílů.

Rovnění plamenem je založeno na známém fyzikálním principu, roztažnosti kovů při ohřevu a smrštění při ochlazování. Při lokálním ohřevu kovu na teplotu odpovídající výraznému poklesu meze kluzu se materiál plasticky deformuje. Okolní studený materiál brání roztažení, čímž vzniká tlakové napětí a plastická deformace. Po rychlém ochlazení (vodou) plastické deformace zůstanou, dané místo se smršťuje a vzniklé tahové napětí srovnává danou součást.

Nízkouhlíkovou ocel ohříváme na teplotu 600 až 700°C, legované oceli na teplotu 400 až 600°C a při velké deformaci je možno ohřev provést několikrát.

V závislosti na tvaru součásti lze při rovnání plamenem využít následující způsob ohřevu:

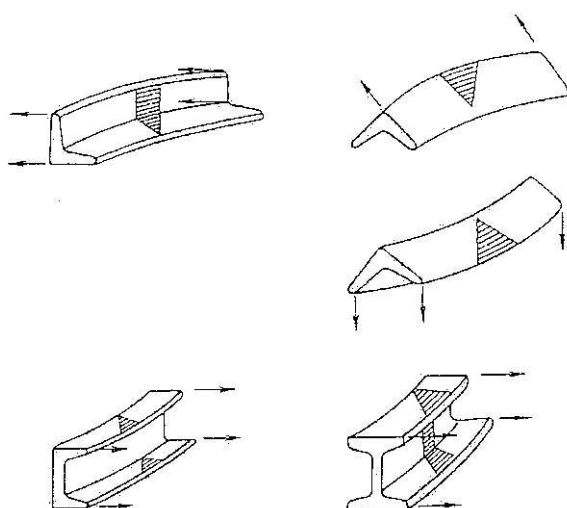
bodový a čárový ohřev pro tenké plechy

klínový ohřev pro rovnání profilů

pásový ohřev pro rovnání konstrukcí

prstencový ohřev pro rovnání trubek

U jednoduchých tvarů – profilů, trubek, tyčí atd. je rovnání snadné, ale u prostorových konstrukcí vyžaduje dlouhodobou zkušenost pracovníků. Tenké plechy a desky do tloušťky až 15 mm lze vyrovnávat standardním hořákem. Pro vyrovnávání velkých desek, jako jsou paluby a stěny palubních nástaveb na lodích, je k dispozici zařízení se třemi nebo více tryskami opatřené kolečky pro snadné vedení po rozměrných plochách.



Obr. 7 Způsob ohřevu u rovnání profilů

Drážkování kyslíkem

Drážkování kyslíkem se používá k odstraňování svarového kovu při odstraňování vadného svaru před opravou, při přípravě kořenových svarů (podložený kořen) a pro přípravu tvarově složitých svarových ploch. Princip je velmi podobný řezání kyslíkem, kdy se kov v proudu kyslíku spaluje na tekutou strusku a proud kyslíku ji vyfukuje ze spáry. Zcela odlišná je při drážkování poloha trysky,

kteřá je vedena téměř rovnoběžně s povrchem materiálu pro vytvoření požadované drážky nebo je nakloněna dle polohy a hloubky odstraňované vady.

Čištění plamenem

Principem čištění (tryskání) plamenem je využití různého koeficientu teplotní roztažnosti relativně studeného materiálu a ohřáté vrstvy oxidů na povrchu. Vlivem vzniklého napětí se poruší vzájemní vazby a tlakem oxidačního plamene jsou povrchové vrstvy odstraněny.

Technologie může být použita k čištění různých materiálů - za tepla válcovaných a kovaných profilů a plechů s vrstvou okují, ocelových konstrukcí pokrytých korozí nebo nátěry, i pobřežních systémů pokrytých vodní vegetací. Čištění plamenem se používá také pro termické opracování a přípravu plochy při opravě betonových povrchů a přírodního kamene. Využívá se vzniku napětí mezi studeným podkladem a teplým povrchem a tím vzniku podpovrchových trhlin, které vedou k odloupení povrchové vrstvy.

3. Aluminotermické svařování

Aluminotermické svařování využívá jako zdroje tepla aluminotermické reakce, která je svou povahou a tepelným zabarvením exotermickou reakcí. Při aluminotermickém svařování probíhá redukce oxidu železa hliníkem, přičemž získáme vysoko přehřátý kov se značným tepelným obsahem. Tento získaný kov slouží jednak jako zdroj tepla pro svařování a jednak jako přídatný materiál (svarový kov) pro svarový spoj.

Pro vlastní svařování se v praxi používá aluminotermická dávka, která obsahuje:

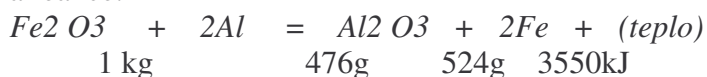
oxidy kovů přídatného materiálu, hliník, legující přísady.

Zápalná teplota směsi je 800 až 1100°C a délka trvání reakce je několik vteřin.

Výtěžnost aluminotermické dávky je v případě oceli přibližně 50% ocele a 50% strusky.

Teplota vyredukovaného kovu je asi 2100 až 2200°C.

Pro aluminotermické svařování oceli lze použít do aluminotermické dávky jeden ze tří oxidů, které tvoří železo. V případě použití oxidu železitého (Fe_2O_3) proběhne následující exotermická reakce:



4. Svařování elektrickým obloukem.

4.1 Elektrický oblouk.

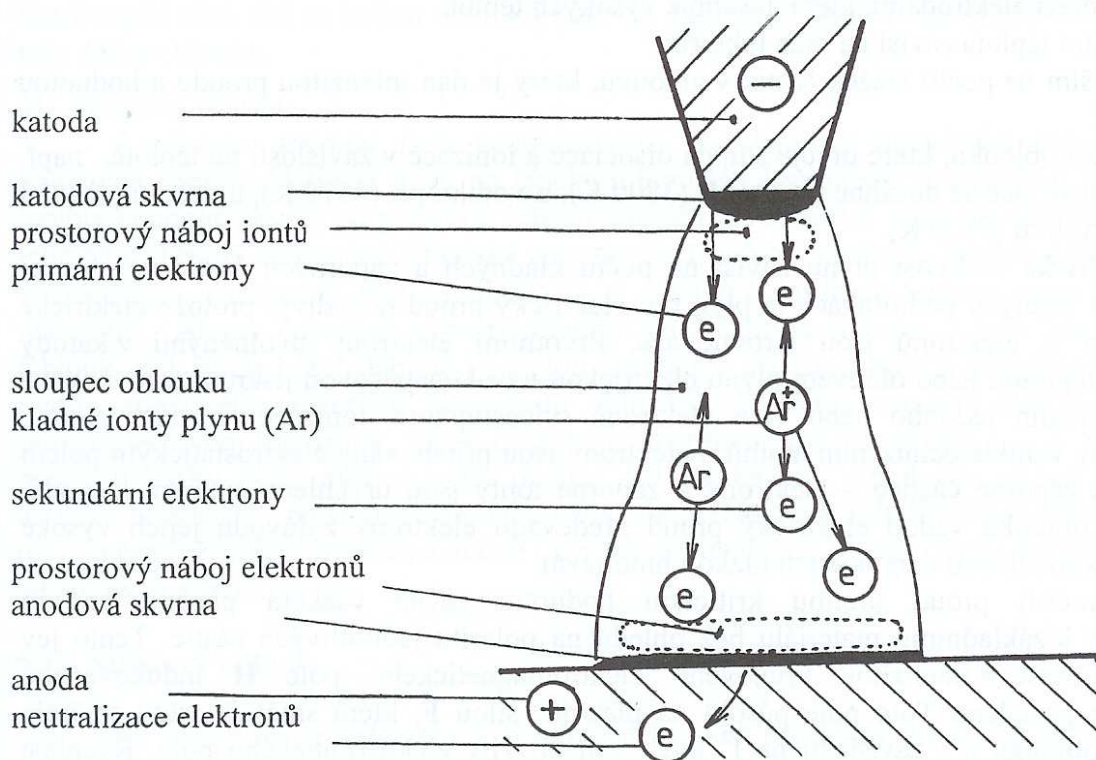
Elektrický oblouk využitelný ve svařování je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Stabilně hoří za předpokladu napětí dostatečného pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku v ionizovaném stavu.

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.



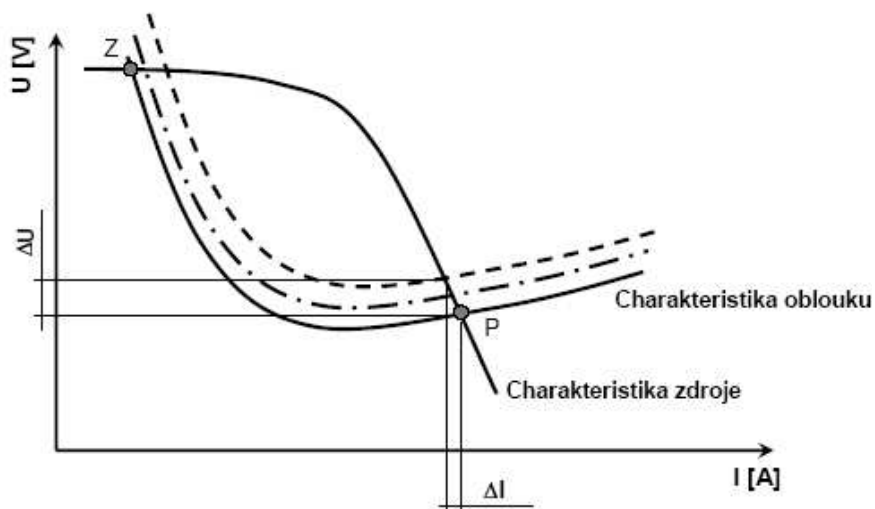
Obr. 8 Elektrický oblouk

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



obr. Voltampérová charakteristika oblouku

P – pracovní bod, Z – zápalný bod

Obr. 9 Voltampérová charakteristika oblouku a zdroje

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**:

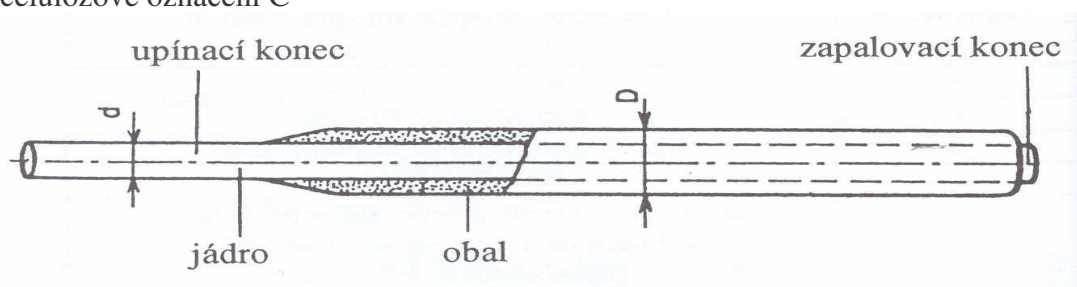
$$U = 20 + 0,04 \cdot I \text{ [V]}$$

4.2 Svařování ruční obalenou elektrodou

Pro ruční svařování elektrickým obloukem se jako přídatné 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



Obr. 10. Obalená elektroda

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

kde d je průměr jádra elektrody

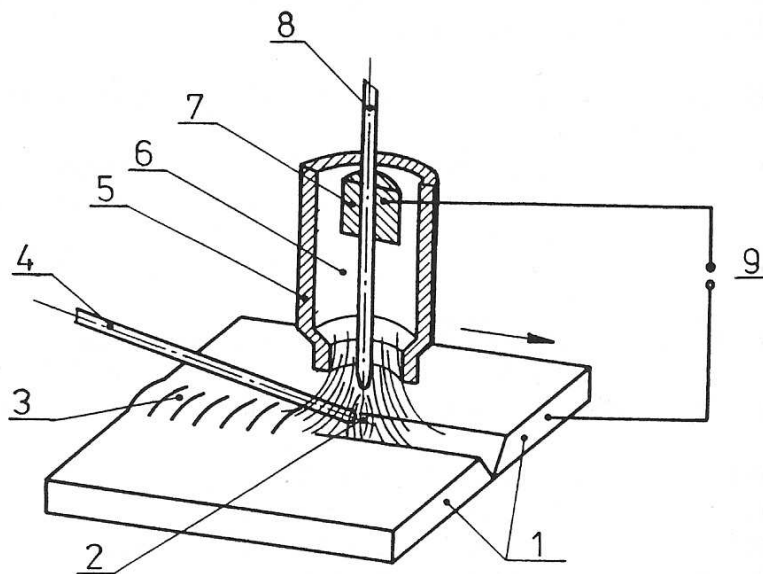
Napětí na el. oblouku nemusí svářeč nastavovat a jeho hodnota je dána statickou charakteristikou elektrického oblouku.

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.

4.3 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 přídatným materiálem ve formě drátu ručním způsobem, nebo automatické svařování s podavačem drátu s proměnnou rychlostí jeho podávání dle postupu svařování.



obr. 11 Princip svařování WIG

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, operativnosti řízení procesu svařování a vysokému stupni automatizace a robotizace.

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 vyjíměčně 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.

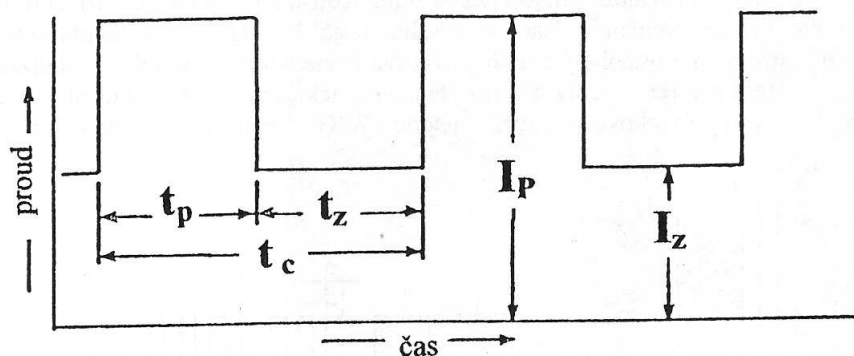
Svařování impulsním proudem.,

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 pravouhlý, 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 neztuhne, 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 přídavného 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.



Obr.12 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 $19,1\text{ g cm}^{-3}$.

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

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 přídatného drátu se u tenkých plechů rovná tloušťce svařovaného materiálu.
- Jako přídatný 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 předeřev 200 až 300 °C dle složitosti a tloušťky svařence.
- Při začátku svařování přidat přídatný 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 slévarenských 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 přídatné materiály o rozměrech menších než tl. materiálu. Doporučené množství niobu je desetinásobek množství uhlíku.
- Pro větší tloušťky svařovaných materiálů použít přídatný 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.
 - Přídatný 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 oblokem, 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 přídatné 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, přídatný 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 přídatného 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 zabraňuje 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:

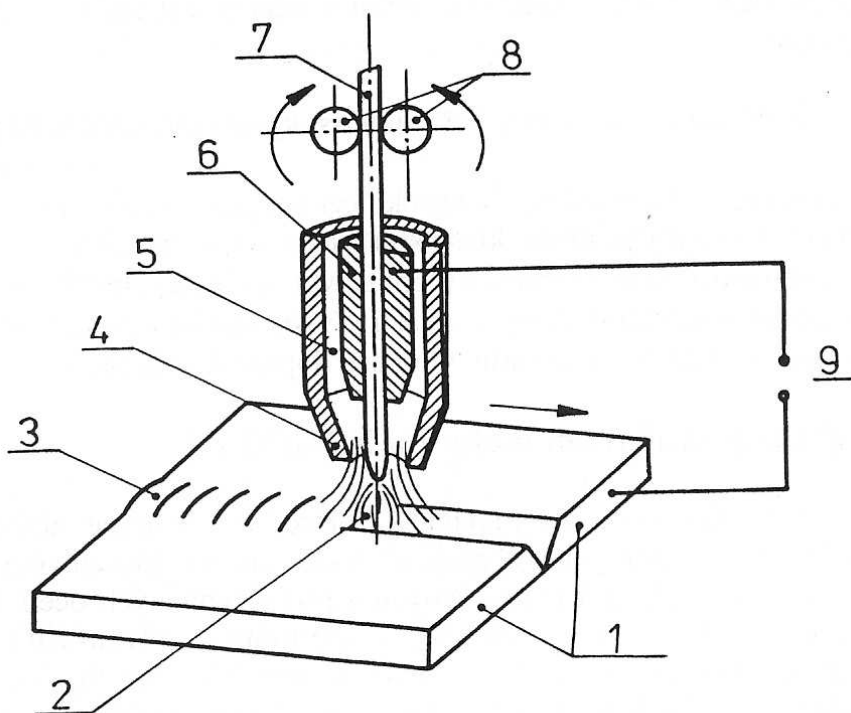
- svařované konstrukce z vysokolegovaných ocelí pro chemický, farmaceutický a potravinářský průmysl, klasickou i jadernou energetiku

- 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.

4.4 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



Obr. 13 Princip svařování MIG/MAG

-2

a dosahuje až 600 A.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 tavicí 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 směsi $\text{Ar} + \text{CO}_2$, 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.

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

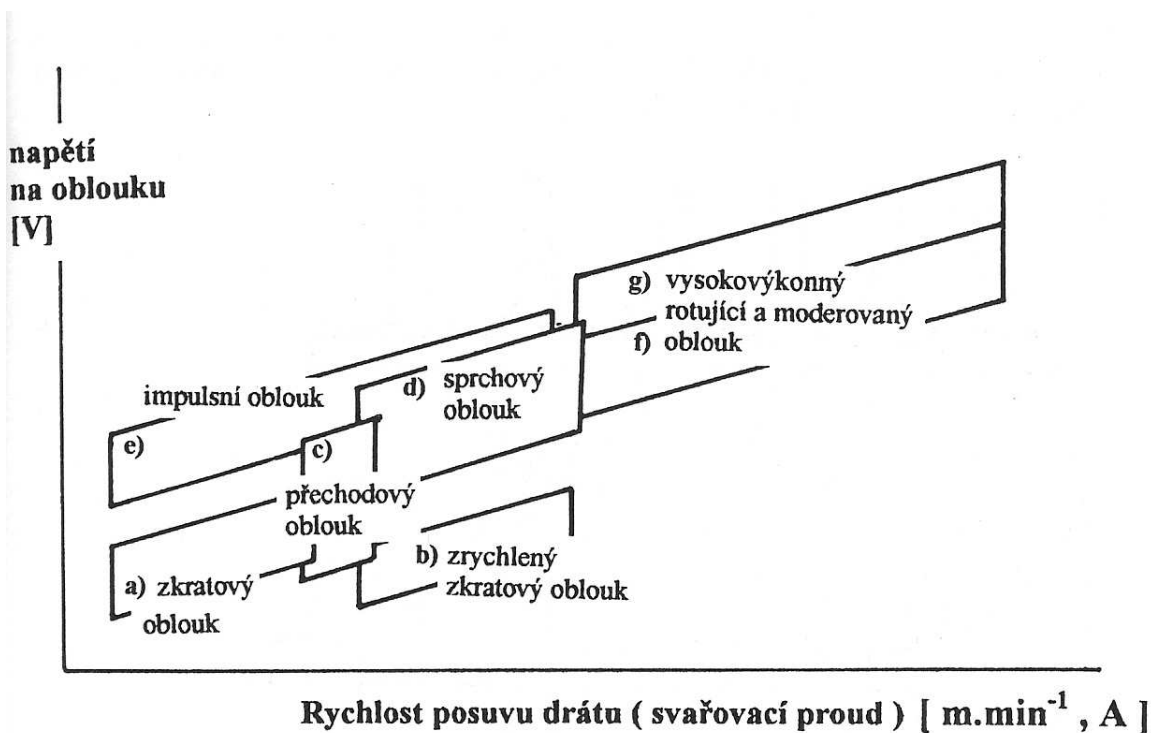
Doporučený poměr mezi $\text{Mn} : \text{Si}$ je cca $1,5 : 1$ až $1,8 : 1$ a optimální složení přídatných materiálů je: $\text{C} = 0,1\%$, $\text{Mn} = 1,7\%$, $\text{Si} = 1,0\%$.

Přenos kovu v oblouku

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

Přenos kovu v oblouku můžeme rozdělit na jednotlivé typy :

- a) krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu
- b) krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem
- c) přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty
- d) dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem
- e) impulzní bezzkratový oblouk
- f) moderovaný bezzkratový přenos
- g) dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu



Obr. 14 Druhy přenosů kovu obloukem

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 CO₂, případně O₂, 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.

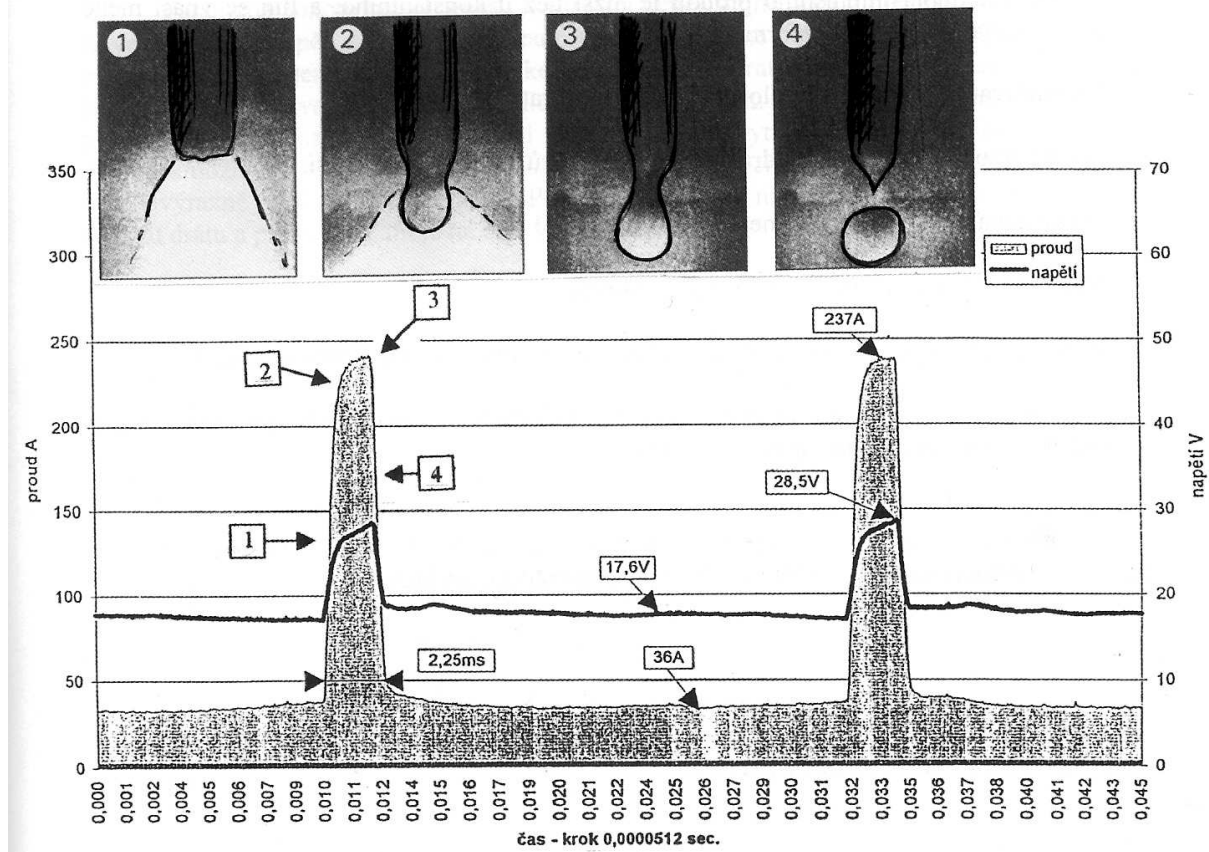
Svařování impulsním proudem je zvláštní formou bezzkratového přenosu kovu, Parametry svařování impulsním proudem překrývají oblast zkratového i sprchového přenosu.

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 bezzkratovým 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.



Obr. 15 Impulsní přenos kovu v oblouku

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 směšného 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.

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 ISO 14341 označuje klasifikaci přídavných materiálů pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí MIG/MAG takto:

EN ISO 14341 -A - G 46 3 M G3Si1 kde

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 $-30\text{ }^\circ\text{C}$

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 ISO 17632** takto:

Plněná elektroda EN ISO 17632- A – 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.

CTM – COLD METAL TRANSFER – proces svařování MIG/MAG krátkým zkratovým obloukem.

Tato nová modifikace svařování CMT taví se elektrodou v ochranné atmosféře kombinuje horkou fázi hoření oblouku, kdy se taví drát i ZM se studenou částí procesu, kdy po kontaktu nataveného drátu s tavnou lázní se snižuje intenzita proudu a drát se vrací do hubice. Tím je podpořeno oddělení kapky bez rozstříku a s nízkou hodnotou vneseného tepla do svaru. Celý proces je digitálně řízený a zpětný pohyb drátu probíhá až 70 x za sekundu. Procesor se zpětnou vazbou udržuje konstantní vzdálenost i rozměr housenky bez ohledu na podmínky svařování. Pro vyrovnání pohybu drátu je do bowdenu zařazen tzv. absorpční člen. CTM umožňuje zajistit požadavek nízkého tepelného zatížení, dobré přemostitelnosti spáry a co možná nejmenší tepelné deformace (zejména při spojování hliníku a ušlechtilých ocelí), tak aby se vyloučily nároky na následné opracování. Stále výrazněji vystupují do popředí také kombinované konstrukce především v automobilovém průmyslu.

Požadavky, které klade průmysl na spojovací technologie jsou stále náročnější. Stále vyšší nároky v oboru termického spojování jsou kladeny především na oblast tenkých plechů (< 2mm).

Proces CTM umožňuje například spojovat automatizovaným procesem, bez podložky a na tupo, tenké hliníkové plechy (0,8 mm) svařovacími rychlostmi kolem 2 m/min. Tento proces je zajímavý rovněž v oboru mechanizovaného nebo robotizovaného spojování plechů z ušlechtilých ocelí o tloušťkách do 1,5 mm, kde nabízí značné možnosti pro automatizaci, jak v důsledku nízkého tepelného zatížení z hlediska metalurgie, tak v důsledku výborné stability oblouku také hledisko spolehlivosti pracovního procesu. MIG procesem je možné realizovat pájené spoje pozinkovaných plechů, které se často využívají v automobilovém průmyslu, s minimálním rozstříkem (a tedy prakticky bez nutnosti následného opracování), prováděné rychlostí až 1,5 m/min.

Kombinace MIG/MAG a laserového svařování – METODA LASERHYBRID

Princip využívá výhod obou technologií: vysoké rychlosti tavení a hluboké tavné lázně u laseru, spolu s podáváním a pulzním tavením drátové elektrody u MIG metody.

Laserový paprsek a elektrický oblouk působí v jedné svařovací zóně a vzájemně se podporují. Rychlost svařování až 14 m.min⁻¹ zajišťuje minimální vnesené teplo do svaru. Výhoda je také úspora přídavného materiálu cca 1/2 a zlepšená přemostitelnost mezer při vysoké rychlosti svařování. Svary se vyznačují vysokou pevností a velmi dobrou povrchovou kresbou.

Proces se využívá pro spojování hliníkových konstrukcí, především karoserií automobilů, v oblasti letecké techniky a ve stavbě lodí. Dále lze svařovat vysokolegované i nelegované povlakované oceli.

Tandemové svařování - dvoudrát tavený v jedné tavné lázni

Tento moderní způsob mechanizovaného svařování využívá dvě drátové elektrody, které jsou umístěné v jedné plynové hubici obr. 9.33. Drátové elektrody jsou vzájemně izolované a jsou napájené dvěma řízenými zdroji řízenými jedním řídicím systémem. Svařuje se impulsním proudem a jedna elektroda má časově posunutý počátek nárůstu proudu v pulsu. Odtavování kapky na jedné elektrodě tedy probíhá v době kdy na druhé elektrodě je svařovací proud na základní úrovni. Na přední elektrodě se obvykle nastavuje vyšší výkon, kterým je zajištěno dokonalé natavení studeného základního materiálu a provaření kořene. Přídavný materiál z druhé elektrody lázeň vyplní a svařovací oblouk prodlouží dobu krystalizace tavné lázně.

Delší dobou tuhnutí se zajistí dokonalejší odplynění tavné lázně a omezí sklon k trhlinám. Celkový proud napájející oba dráty dosahuje až 900 A a rychlost svařování se pohybuje mezi 70 až 200 cm. min⁻¹.

Využití tandemového svařování: - svařování hliníku vysokými rychlostmi, stavba skříní kolejových vozidel hliníkových i ocelových, trupů lodí, disků kol automobilů, jeřábů stavebních konstrukcí atd. Svařuje se mechanizovaně i automaticky.

MIG – pájení pozinkovaných plechů

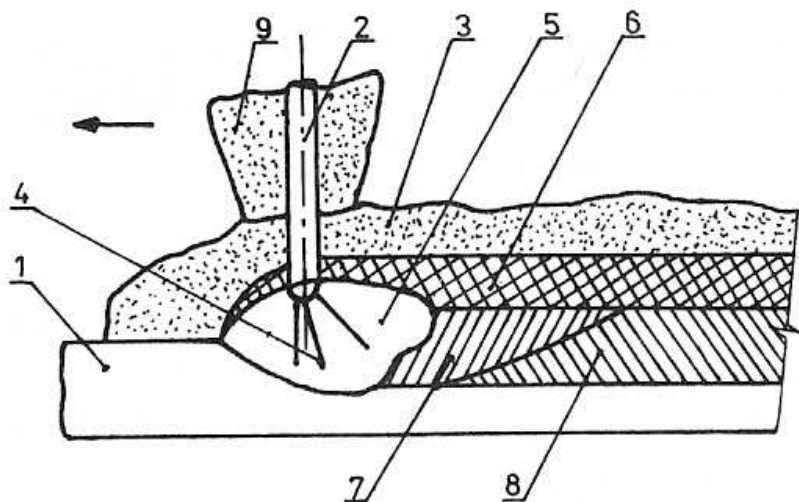
Pozinkované plechy jsou v současné době stále častěji používány v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, vzduchotechnice, nábytkářství a výrobě domácích spotřebičů. Tloušťka zinkového povlaku se pohybuje od 5 do 20 mikrometrů a požadavkem při spojování je nepoškodit povlak který katodickým účinkem chrání základní materiál. Při klasickém svařování způsobují páry zinku, které se odpařují při 906 °C, pórovitost svaru, neprůvary a trhliny. Pro spojování těchto plechů byla vyvinuta metoda MIG – pájení křemíkovým bronzem CuSi₃, CuSi₂ nebo hliníkovým bronzem CuAl₈, CuAl₈Ni₂ kterým se pozinkované plechy spojují v intervalu teplot 1030 až 1080 °C.

MIG – pájení se provádí impulsním proudem do 350 A v ochranné atmosféře Ar nebo Ar + 2,5 % CO₂.

Výhody MIG - pájení: minimální opal povlaku vedle svaru i na spodní straně plechu, svar bez koroze – katodická ochrana v těsné blízkosti svaru, žádné dodatečné úpravy materiálu, minimální tepelné ovlivnění materiálu a deformace, možnost robotizace.

4.4 Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem

Svařování pod tavidlem je metoda založená na hoření oblouku pod vrstvou sypkého tavidla. Teplem oblouku se taví drát, základní materiál a část tavidla v kaverně vytvořené ve vrstvě tavidla a naplněné parami kovu a strusky. Vlivem rozměrné tavné lázně jsou difúzní pochody mezi natavenou struskou a svarovou lázní velmi intenzivní, což vede ke vzniku velmi čistého svarového kovu s dobrými mechanickými vlastnostmi. Na probíhající metalurgické reakce má také vliv vysoká teplota tavné lázně cca 1800°C a teplota kapek kovu odtavujících se elektrody cca 2300°C, spolu s intenzivním promícháváním taveniny kovu a strusky.



Obr. 16 Princip svařování pod tavidlem: 1- základní materiál, 2- přídavný materiál – drátová elektroda, 3- tavidlo, 4-, elektrický oblouk, 5- kaverna, oblast hoření oblouku, 6- natavená struska, 7- tavná lázeň, 8- násypka tavidla.

Charakteristické parametry svařování pod tavidlem jsou :

svařovací proud – 100 až 2000 A, napětí - 20 až 60 V.

Zdroje svařovacího proudu jsou především transformátory s výstupem střídavého proudu, které jsou vhodné pro neutrální a kyselá tavidla nebo vícedrátové svařovací zařízení. Pro bazické tavidla je vhodnější stejnosměrný proud s kladným pólem na elektrodě. Pro svařování pod tavidlem se používá plochá voltampérová charakteristika s možností samoregulace délky oblouku.

Přídavné materiály

Elektrody:

Plné dráty: ČSN EN 756 pro nelegované a jemnozrnné oceli - nejčastější průměry jsou od 2 do 5 mm. Pro spojovací svary ocelových konstrukcí.

Plněné dráty: ČSN EN 12 073 pro korozivzdorné návary. Dále návary Tvrdíkovu.

Páskové elektrody: ČSN EN 12 072 pro korozivzdorné návary. Rozměr 0,5 x 60 mm.

Plněné pásky pro tvrdé návary. Rozměr 2 – 3 x 40 mm.

Dle výroby se tavidla dělí na:

Tavená - vyráběná v elektrických obloukových pecích

tavidlo pro nelegované materiály

Aglomerovaná (keramická) - vyráběná z práškových komponentů a pojená vodním sklem.

Tavidla s přesně daným chemickým složením vhodná pro legované materiály a pro navařování.

Sintrovaná – spěkaná z práškových komponentů za působení tlaku. Vhodná pro legované materiály a pro svařování do úzkého úkosu z důvodu dobré odstranitelnosti strusky.

Technika svařování.

Základem svařování pod tavidlem je jednodrátový způsob.

Vysoký výkon svařování spolu s širokým závarem je možné dosáhnout svařováním dvojdrátem, kde dráty menších průměrů (2,5) jsou umístěné vedle sebe. Dráty jsou napojené na jeden zdroj proudu.

Naopak charakteristické pro tandemové svařování je uspořádání drátů za sebou. Dnešní moderní zařízení běžně disponují dvěma až čtyřmi dráty, ale jsou nabízeny i šestidrátové.

Pro navařování se někdy používá přídavek studeného drátu, který zmenšuje hloubku závaru a zředění návary.

Aplikace svařování pod tavidlem.

Svařování pod tavidlem se využívá od tloušťky 3 mm. Ekonomicky výhodné je především u tloušťek nad 50 mm, kdy se svařuje do tzv. úzkého úkosu s úhlem rozevření 0 až 8°. Jedná se o svařování tlustostěnných tlakových nádob, rotorů turín nebo chemických zařízení. Technologie je používána také při výrobě lodních, mostních, stavebních a jeřábových konstrukcí. Navařování vysokolegovaných ocelí v chemickém průmyslu je realizováno páskovou elektrodou.

SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ.

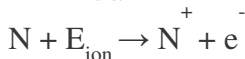
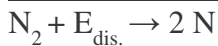
U těchto metod svařování se dosahuje protavení celé tloušťky materiálu pomocí vysoké hustoty energie nad 10^5 W.cm^{-2} . Teplota v tavné lázni u těchto metod dosahuje velmi rychle bodu varu kovu a tvoří se kapilára vyplněná parami kovů. Svar se tvoří po průchodu zdroje tepla. Patří sem svařování plazmou,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

5. Svařování plazmou

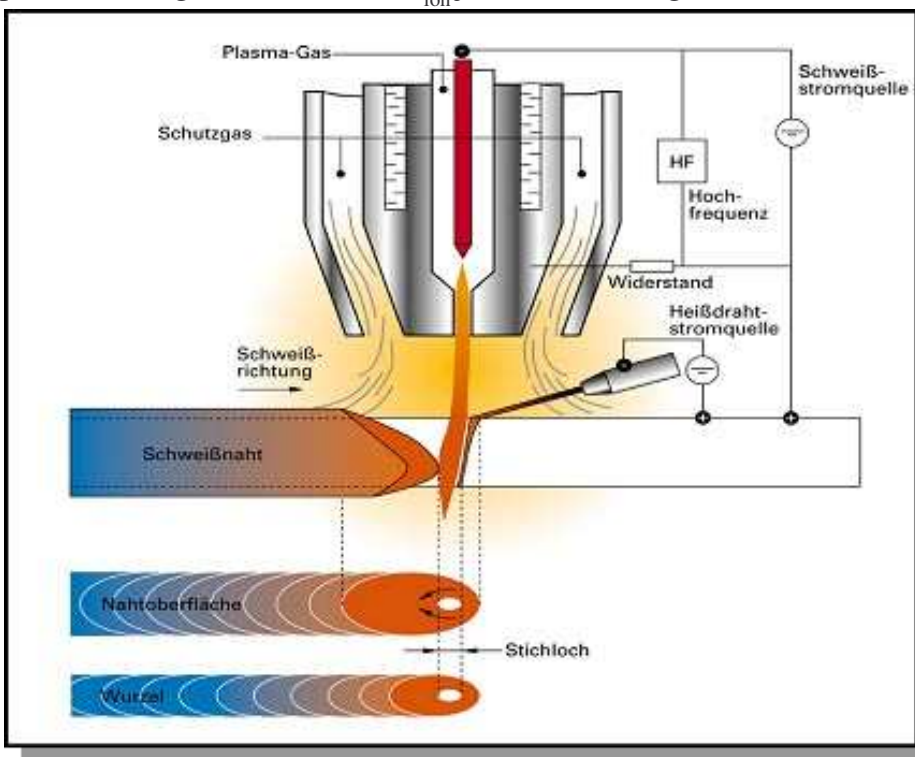
Princip svařování plazmou je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem.

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



Obr. 17 Princip svařování plazmou

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

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.

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.

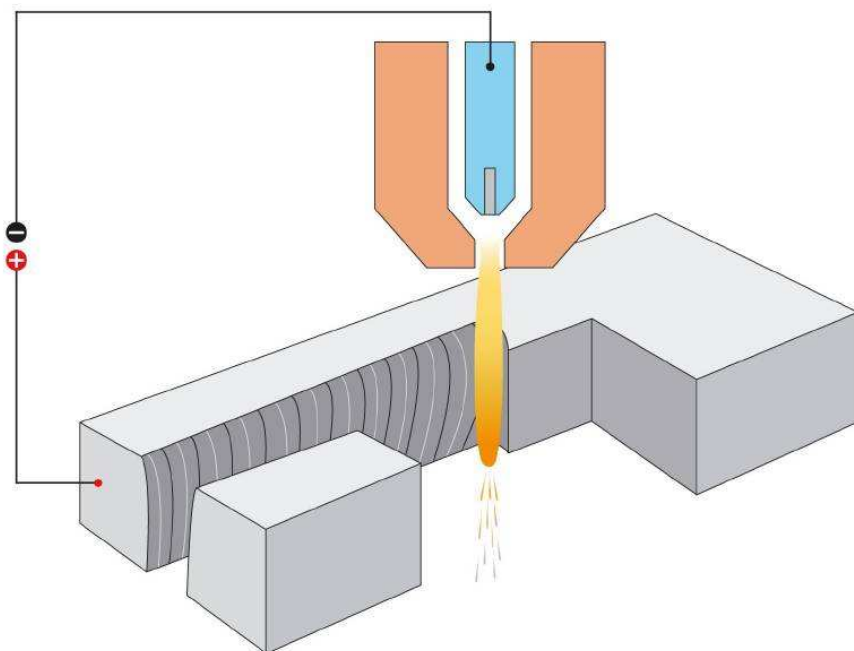
Příklad úpravy svarových hran je uveden na obr. 13.4.

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.

5.1 Řezání plazmou

Plazmové řezání využívá vysoké teploty a výstupní rychlosti plazmového paprsku. Při zvýšení průtoku a tlaku plazmového plynu se zvýší dynamický účinek vystupující plazmy a dochází k vyfouknutí nataveného materiálu z řezné spáry. Při řezání jsou výstupní rychlosti plazmy vyšší a dosahují hodnoty kolem 1500 až 2300 m.s⁻¹. Vysoká teplota plazmového paprsku umožňuje řezat všechny kovové vodivé materiály bez ohledu na jejich řezatelnost kyslíkem.



Obr. 18 Princip řezání plazmou

Plynová plazma je stabilizovaná směsí Ar + H₂, elektroda je wolframová a používá se především pro řezání vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu, mědi a dalších kovů.

Vzduchová plazma je současně velmi rozšířená a její provoz je ekonomicky velmi výhodný do tloušťky cca 40 mm na řezání oceli. Ke stabilizaci se používá stlačený vzduch (0,4 až 0,8 MPa) o vysokém průtočném množství až 130 l.min⁻¹.

Kyslíková plazma je velmi podobná vzduchové má však vyšší entalpii a hustotu. Kyslík dává vysokou rychlost řezání, čisté řezy bez ulpívajících oxidů a zvýšení kvality řezu s malým deviačním úhlem a jemnou strukturou povrchu.

Dusíková plazma kombinovaná s injekčním přívodem vody je určena především pro řezání velkých tloušťek vysokolegovaných ocelí. Konstrukčním uspořádáním hořáku se k okrajovým vrstvám plazmového paprsku tangenciálně přivádí voda (někdy oxid uhličitý). Vytváří se vodní vír, který ochlazuje vnější vrstvy plazmy a dochází k disociaci vody, čímž se dosahuje jejího zúžení a zvýšení teploty.

Vodní parou stabilizovaná plazma nepotřebuje procesní plyny, kdy voda přiváděná do hořáku se odpařuje a vodní pára je ionizovaná. Dává čisté řezy bez oxidů.

Výhody plazmového řezání:

- vyšší rychlost řezání než u řezání kyslíkem pro tenké a střední tloušťky
- snížení vneseného tepla do materiálu - menší TOO a deformace
- možnost řezání všech kovových materiálů především vysokolegovaných ocelí, hliníku, niklu, mědi, a jejich slitin
- snadná automatizace a mechanizace
- minimální vliv kvality povrchu řezaných materiálů

Nevýhody plazmového řezání:

- úhel řezné hrany je větší než u řezání kyslíkem
- horní hrana plechu je oblejší než u kyslíkového řezání
- velký vývin dýmů, par kovů, ozónu a oxidů dusíku
- vysoká hladina hluku od 80 do 100 dB
- intenzivní UV záření
- obtížné propalování otvorů u tloušťek nad 15 mm.

6. Svařování svazkem elektronů.

Princip svařování svazkem elektronů.

Vlastní zdroj elektronů je válcová vakuovaná nádoba na jednom konci opatřená přímo nebo nepřímo žhavenou emisní 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:

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

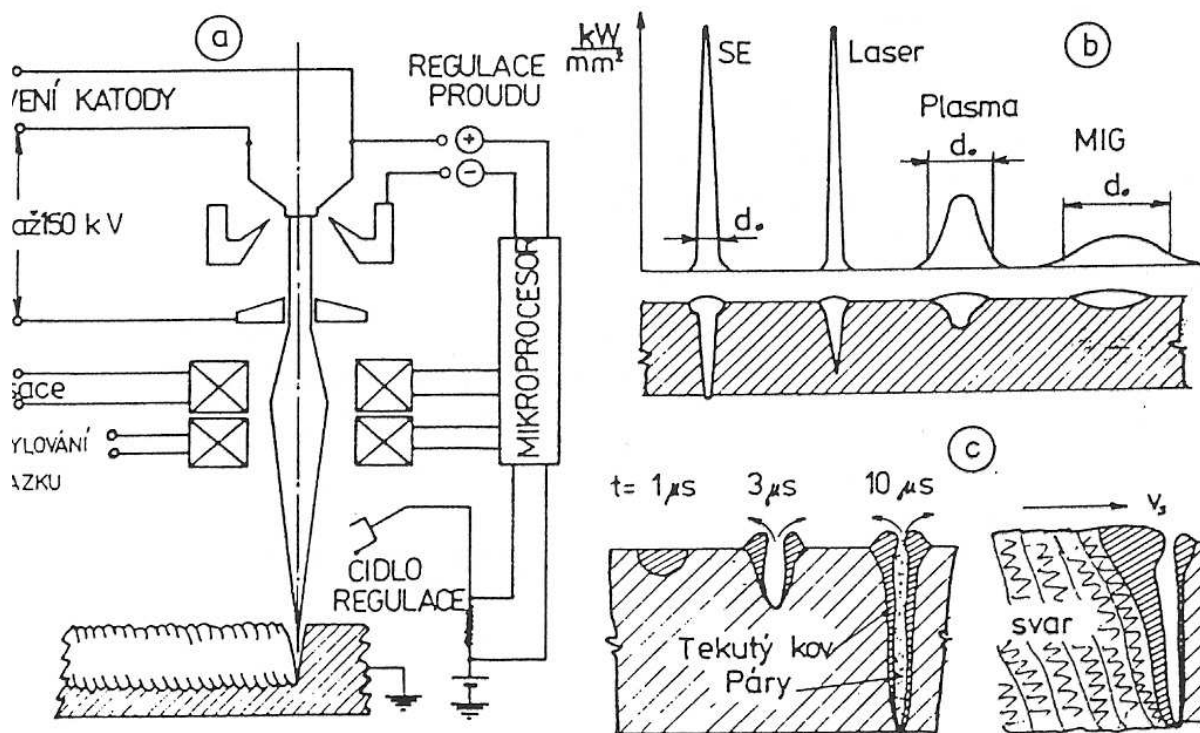
Elektrony dopadají na povrch materiálu a jejich kinetická energie se mění na tepelnou.

Během několika μ s 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.

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 vysokotavitěné 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.



Obr. 19. Princip svařování svazkem elektronů

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.

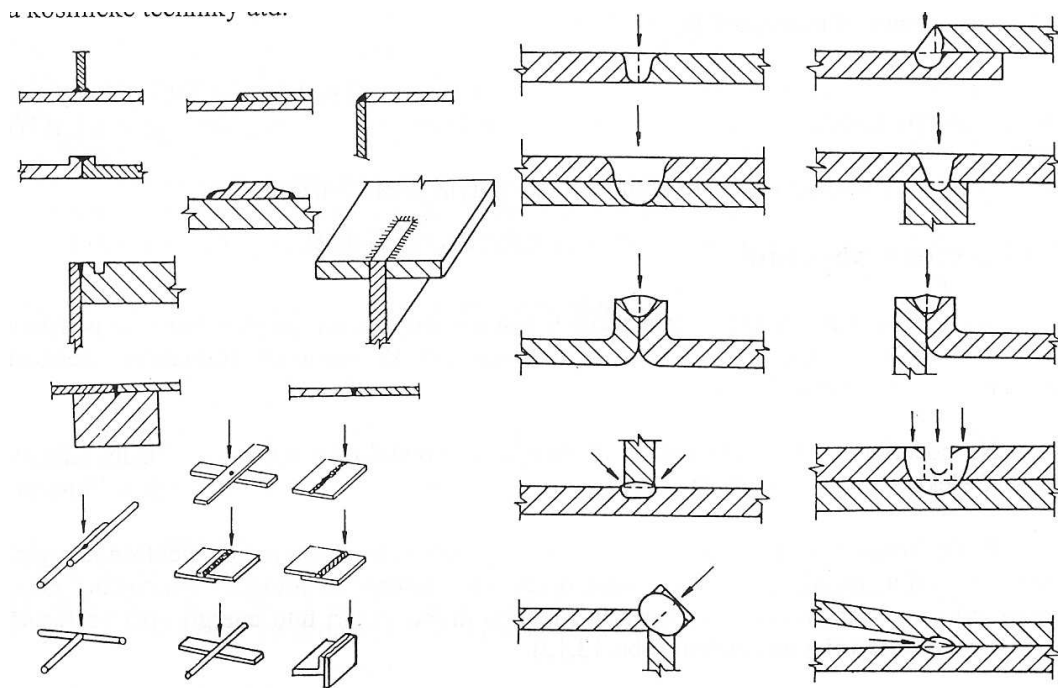
Výhody svařování svazkem elektronů:

- 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.



Obr. 20 Typy svarů pro svazek elektronů a pro laser

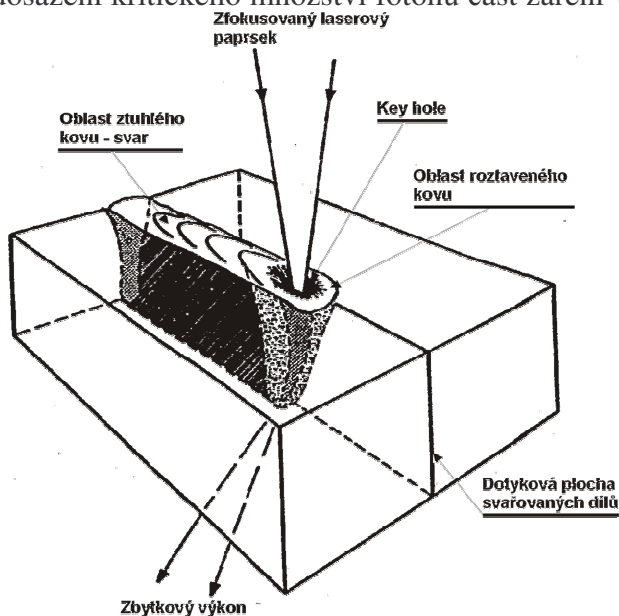
7. Laserové svařování.

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.

Celý proces zesílení začíná excitací iontů nebo molekul na horní vibrační hladinu. Vyzáření fotonu je realizováno při přechodu iontů nebo molekul z vyšší metastabilní hladiny zpět na hladinu základní. Přechod je stimulován fotonem o stejných vlastnostech.

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.



Obr. 21 Princip svařování laserem

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. Vlnová délka pevnolátkových laserů je kolem 700 až 1200 nm.

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. 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 30%.

Fokusovaný 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 10⁵ W.cm⁻² dochází k přenosu tepla a formování svarové lázně hlavně vedením a je vhodné pro spojování tenkých plechů. Vysokou hustotou výkonu nad 10⁸ W.cm⁻² 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. Fokuseovaný laserový svazek 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. Povrch je bez oxidů.

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 svařovacích plochách vyvíjí v důsledku elektrického přechodového odporu, třecích nebo makrodeformačních pochodů. Ve svaru nevzniká licí struktura jako u tavného svařování.

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

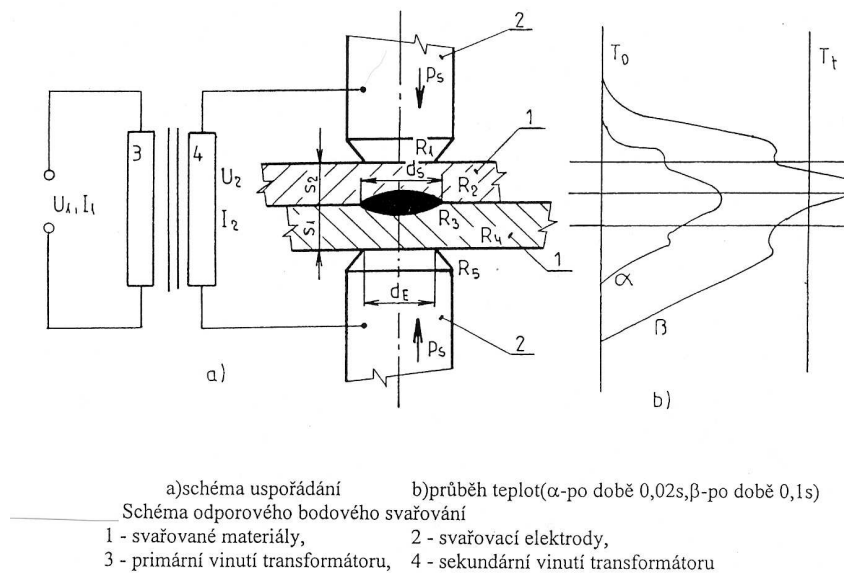
$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

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

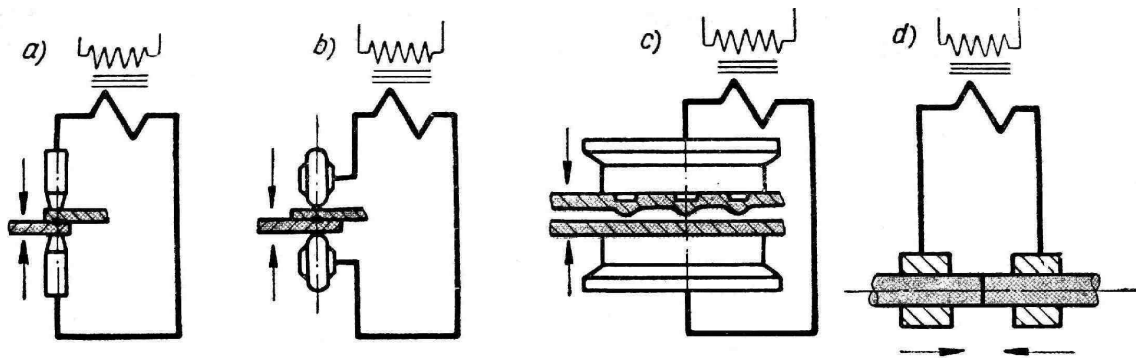


Obr. 1. Princip bodové odporové svařování

Parametry svařování

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

- svařovací proud $I_s = 10$ až 10^3 A
- přítlačná síla $P_s = 500$ až $10\,000$ N
- svařovací čas $t_s = 0,04$ až 2 s



Obr. 2 Čtyři hlavní druhy odporové svařování

- a) bodové odporové svařování b) švové odporové svařování
c) výstupkové odporové svařování d) stykové odporové svařování

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.

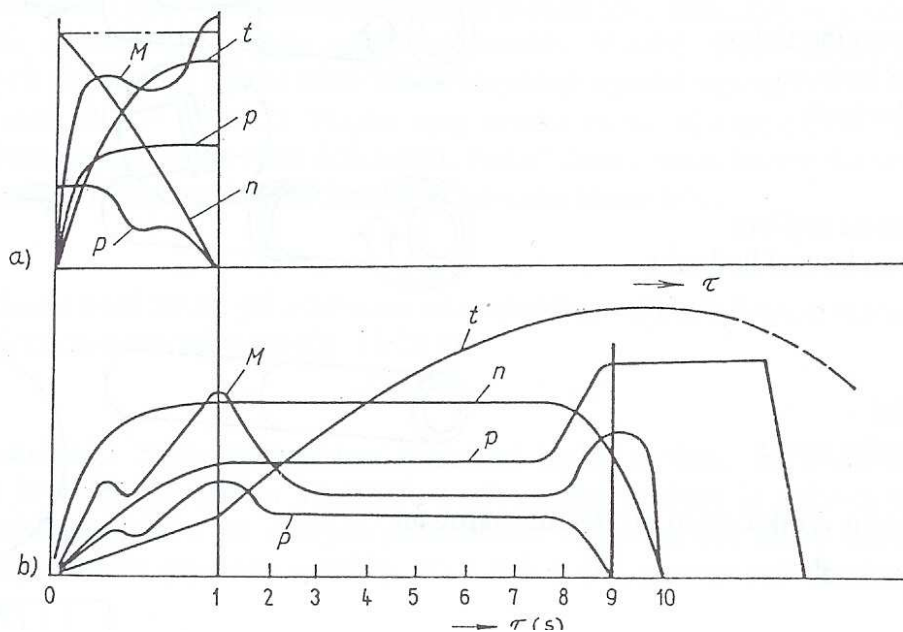
2. Svařování třením

Základní princip svařování třením je založen na vzájemném pohybu dvou součástí při působení přitlačné 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 přitlačná síla, která dává vzniknout třecím silám. Přiváděná mechanická energie se mění na tepelnou při značně vysoké účinnosti. Vysokým měrným tlakem se oba povrchy nejprve zarovňávají, 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:

a) 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.

b) svařování s akumulovanou energií – setrvačnickové, kdy svařování začíná po roztočení setrvačnicku a svar vzniká po spotřebování akumulované energie za 1 až 3 sec.



Obr. 3 Dva základní způsoby svařování třením

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

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 Ce (3):
 $C_e = C + 0,04 Si + 0,02 Ni + 0,2 Cr + 0,25 Mo + 0,17 Mn$ (%) (13.8)

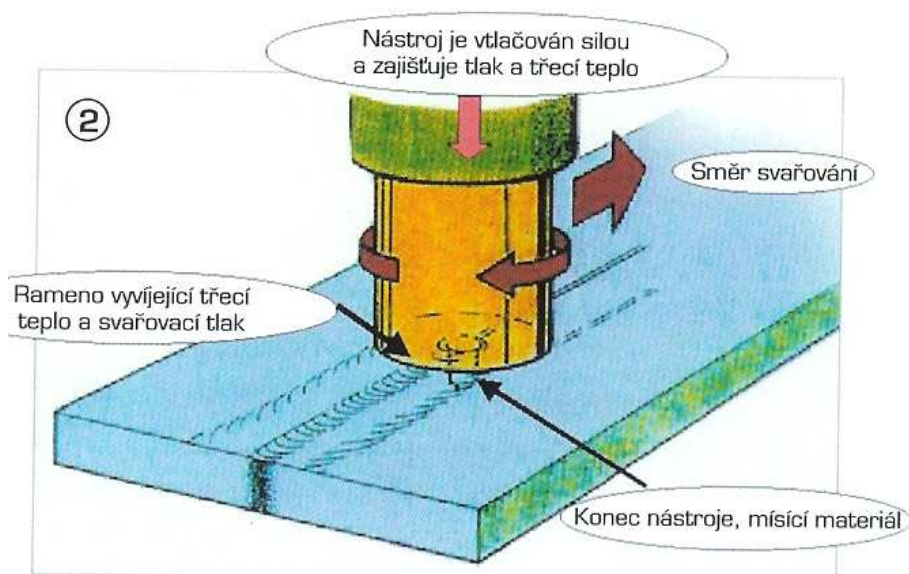
Při uhlíkovém ekvivalentu:

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.



Obr. 4 Svařování promísením rotujícím nástrojem

Třecí svařování promísením rotujícím nástrojem FSW –Friction Stir Welding

Princip metody je založený na vtlačování rotujícího nástroje do svarové mezery tupého spoje a byl vyvinutý již v roce 1991 firmou TWI v Anglii . V místě kontaktu trnu se svařovaným materiálem dochází k ohřevu kovu a vytvoření vysoce plastické oblasti kde dochází k vzájemnému promísení kovu. Plastický materiál je velkou kovací silou vytlačován na zadní stranu trnu, kde dochází k vytvoření svarového spoje. Oba svařované díly musí být velmi pevně a přesně uchyceny k základní desce zařízení. V současnosti se uvedený princip běžně používá pro svařování hliníkových slitin a ověřené byly svary na slitinách z hořčíku, titanu, olova a zinku. Vývoj směřuje ke svařování oceli – již jsou ověřené vzorkové svary.

Vlastnosti spojů

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 s kovy.

V oblasti strojírenské výroby tvoří největší podíl rotační součásti typu hřídelí, čepů, trubek, válců atd. Lze spojovat i profily např. čtvercového nebo šestihenného 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.

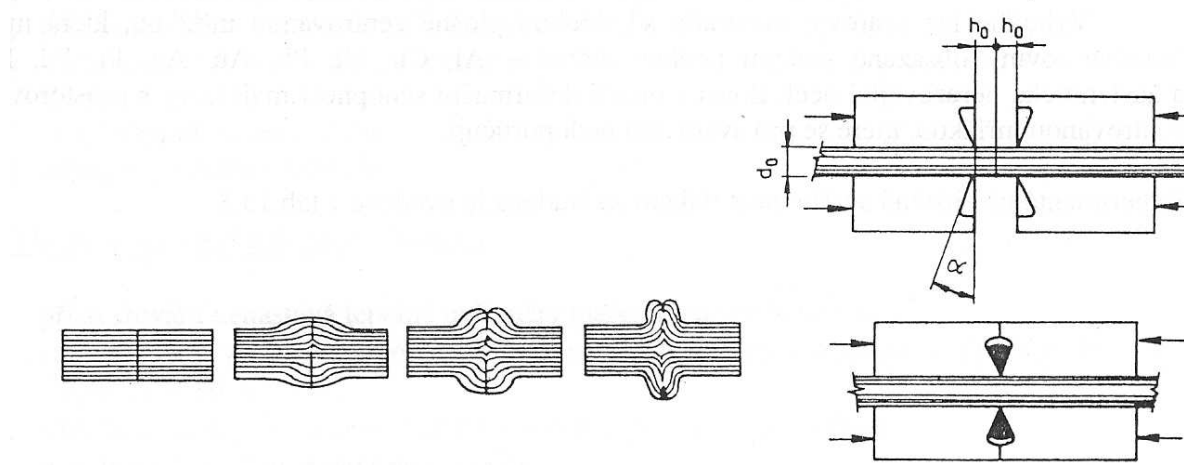
3. Difúzní svařování

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. 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.

4. 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. 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.



Obr. 5 Princip svařování tlakem za studena

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 mm

- 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.

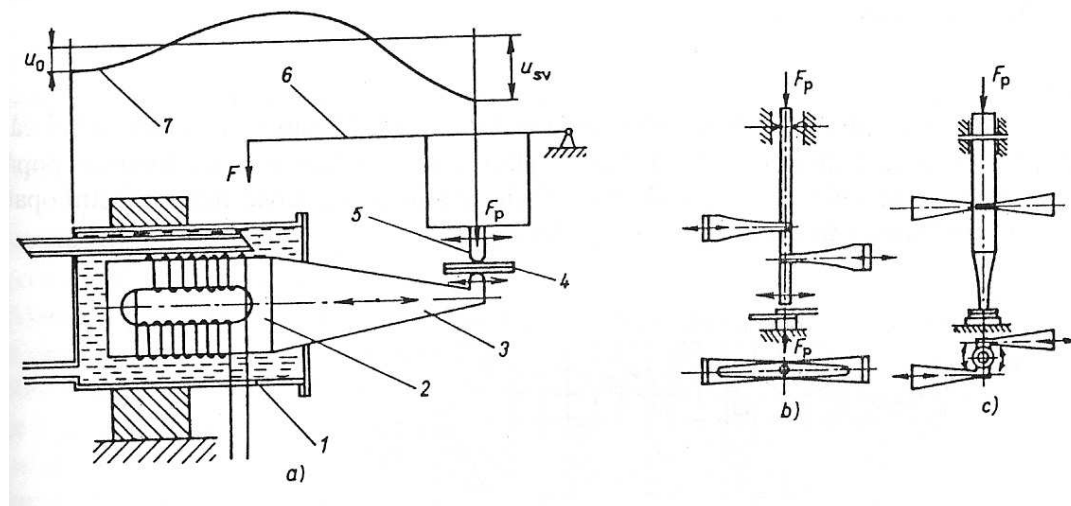
Výhody svařování tlakem za studena:

- při svařování nenastává tepelné ovlivnění materiálu a vznik taveniny
- spojit 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

5. 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.



Obr. 6. Princip svařování ultrazvukem

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. 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.

6. Svařování výbuchem

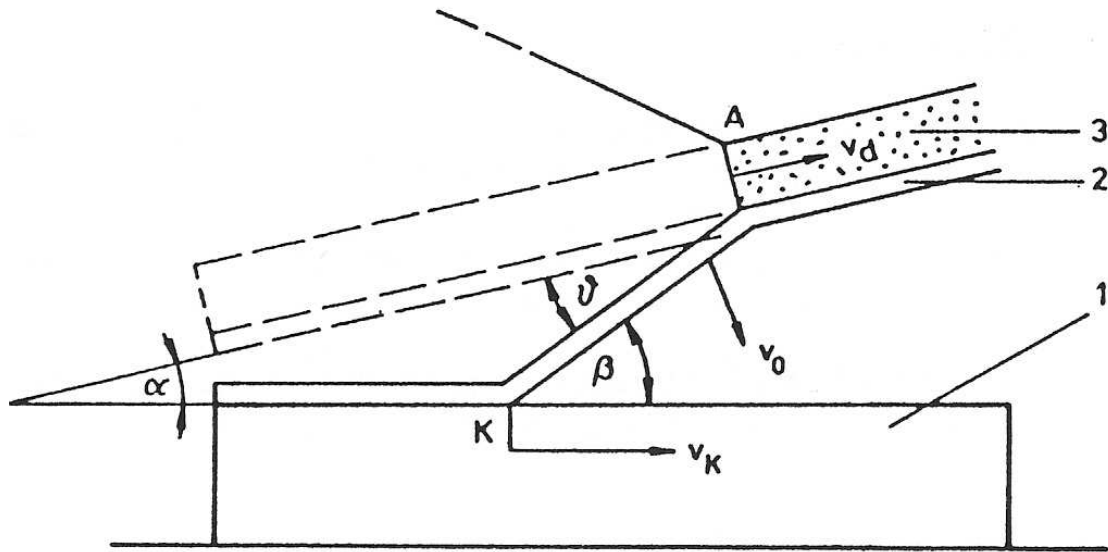
Při svařování výbuchem dojde ke spojení materiálů působením tlaku vzniklého při detonaci výbušniny umístěné na horní ploše svařovaného materiálu. Poloha materiálů při svařování může být v rovnoběžném nebo šikmém uspořádání.

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. Sráz 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.

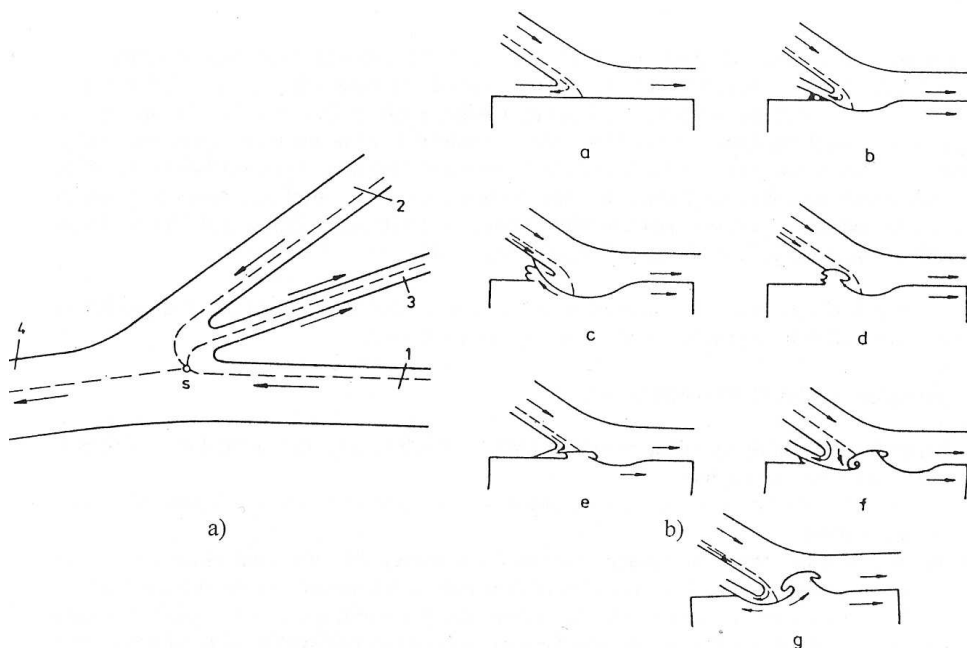
Kovem postupuje rázová vlna, která způsobuje výraznou plastickou deformaci materiálu, část materiálu tzv. tlouk zůstává na linii srázu a druhá podstatně menší tzv. trysk se pohybuje rychlostí převyšující detonační rychlost trhaviny ve směru jejího hoření. Trysk je tvořen povrchovými oxidy, částicemi 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 srázu, rychlosti v místě kontaktu, rychlosti zvuku, hustoty a meze kluzu plátovaného materiálu.



Obr. 7 Princip svařování výbuchem

1,2 - svařované materiály, 3 – trhavina, A- čelo detonační vlny, K – místo srážu,
 v_0 – rychlost letu urychleného materiálu, v_d – detonační rychlost trhaviny
 v_k – rychlost svařování α – úhel odklonu urychlovaného materiálu, β – dynamický úhel srážu

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..



Obr. 8 Vznik souvislého proudu (a), mechanismus tvorby vln v místě rozhraní kovů (b)

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 trubkovic 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 tloušťek, spojování různorodých materiálů, plátování jednostranné i oboustranné.

Doporučená literatura pro oblast svařování:

1. DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
2. PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009
3. BARTÁK, J. Výroba a aplikované inženýrství, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5
7. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1