

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚST, TECHNICKÁ 2896/2, 616 69 BRNO**

Odbor svařování a povrchových úprav

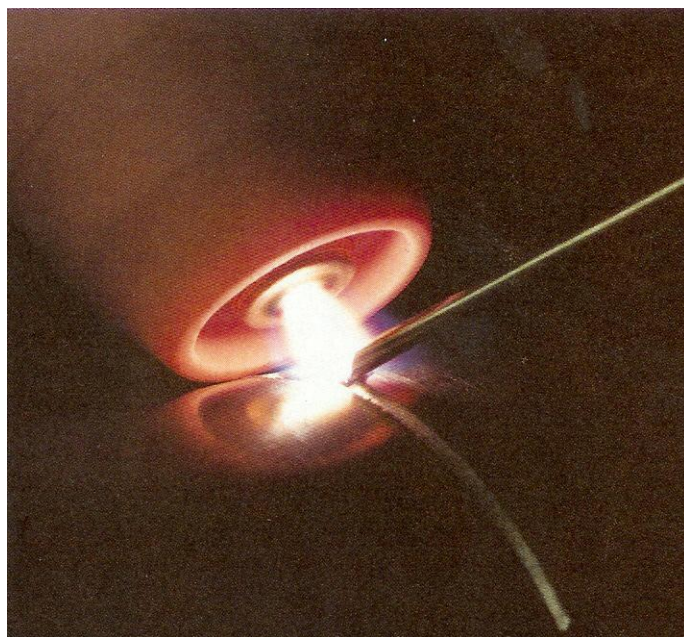
Sylabus přednášek

TECHNOLOGIE II

ČÁST SVAŘOVÁNÍ

Díl 2

**SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ
TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ**



Určeno pro výuku v předmětech CTV, 5TE, ETV-K, ETR, HSV, HRP

**Autor: Ing. Jaroslav KUBÍČEK
Brno 2006**

OBSAH:

SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ

1. Charakteristika speciálních metod tavného svařování	2
2. Plazmové svařování	3
Řezání plazmou	9
3. Elektronové svařování	15
Interakce elektronů s materiálem	18
4. Laserové svařování	23
Pevnolátkový laser	24
Plynový laser	26
Polovodičový laser	28
Svařování laserem	31
Řezání laserem	36
 5. METODY TLAKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	 43
6. Odporové svařování	43
7. Třecí svařování	50
Konveční způsob	52
Setrvačnickový způsob	53
Rotujícím nástrojem	53
8. Difúzní svařování	55
9. Tlakové svařování za studena	59
10. Ultrazvukové svařování	62
11. Výbuchové svařování	64
Odkazy	67
Zkušební otázky	68

1. CHARAKTERISTIKA SPECIÁLNÍCH METOD TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ

Využívání nových materiálů a typů slitin vede k rozvoji aplikací netradičních technologií svařování.

Vývoj některých průmyslových odvětví např. klasická a jaderná technika, dopravní technika elektrotechnika, měřicí a přístrojová technika, letecký a kosmický průmysl se neobejde bez nutnosti spojovat obtížně svařitelné, různorodé nebo rozdílně tlusté materiály. V oblasti tavného svařování jsou pro uvedené aplikace vhodné metody s vysokou koncentrací tepelné energie na jednotku plochy:

- svařování plazmou
- svařování svazkem elektronů
- svařování laserem

Charakteristickým znakem těchto metod je podstatné snížení spotřeby tepelné energie na jednotkovou délku svaru, kterého se dosahuje vysokou hustotou energie v dopadové ploše.

Pokud je energie vyšší než 10^5 W.cm^{-2} , přenos tepla vede k velmi rychlému ohřevu kovu na teplotu varu a vytvoření dutiny ve tvaru kapiláry.

Tato kapilára proniká celou tloušťkou materiálu, případně zaniká ve značné hloubce pod povrchem. Při pohybu zdroje je proudění taveniny v kapiláře řízené povrchovým napětím závislým na teplotě. S poklesem teploty tavné lázně za zdrojem roste povrchové napětí a gradientem povrchového napětí se tavenina přemísťuje za kapiláru kde dochází ke krystalizaci. Podle anglického označení KEY HOLE se uvedený postup v naší literatuře nazývá svařování klíčovou dírkou nebo svařování průchozím paprskem.

Společně lze speciální metody tavného svařování charakterizovat těmito výhodami:

- 1) Vysoká rychlost ohřevu i vysoká rychlost svařování omezuje difúzi tepla do okolí svaru a tím i rozsah transformačních změn v materiálu.
- 2) Se vzrůstající hustotou výkonu v dopadové ploše klesá množství specifického vneseného tepla do svaru, které v konečném důsledku vede ke zmenšení šířky tepelně ovlivněné oblasti, snížení zbytkových napětí a deformací.
- 3) Minimální deformace umožňují svařování polotovarů s konečným opracováním především svazkem elektronů, mikroplazmou a laserem.
- 4) Nové typy svarů umožňují navrhovat nová konstrukční řešení svařenců.

2. PLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ

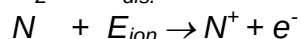
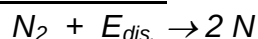
Fyzikální pojem plazma zavedl v roce 1923 **I.Langmuir** pro speciální stav plynů, někdy označovaný jako čtvrtý stav hmoty. Ke vzniku plazmy je nutná ionizace plynu (mechanická nebo tepelná), při které dochází k vyražení nebo uvolnění elektronů z vnějších valenčních orbitů atomů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou v plazmě elektrický proud. Ionizované jádro atomu – iont se zbývajících elektrony má kladný náboj. Navenek se však plazma chová jako elektricky neutrální.

Na ionizaci plynů je potřeba značná energie. V technické praxi se často jako zdroj tepla používá elektrický oblouk, který je kontrahován a zvýšením teploty se dosáhne vyššího stupně ionizace.

Princip svařování plazmou je tedy 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 ionizace je závislý na teplotě a úplná ionizace se dosahuje při teplotách kolem 100 000 K. V oblasti svařování jsou dosahovány teploty podstatně nižší, plazma je částečně ionizována a pro jednotlivé plyny jsou teploty disociace a ionizace v závislosti na entalpii znázorněné na obrázku, Část plynu, která není ionizována a je chladnější stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky.

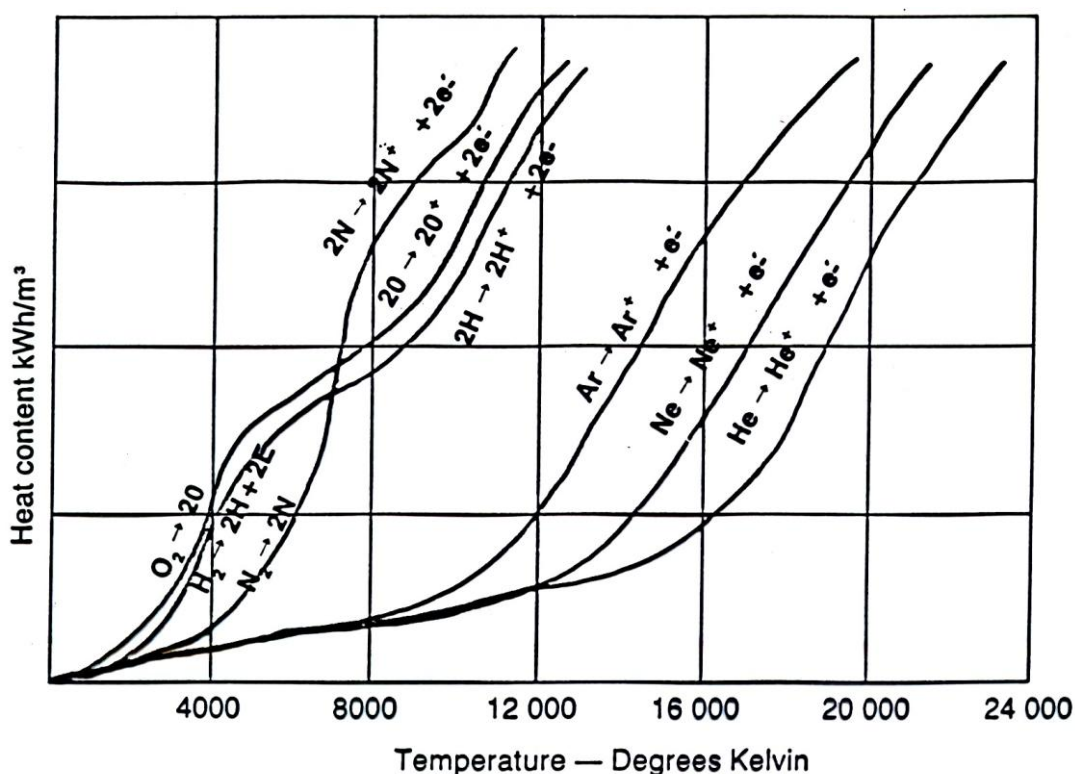
Disociace a ionizace dusíku:



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

Pro používaná prostředí platí tyto přibližné průměrné teploty plazmy:

dusíková plazma do	9 000 K
vodíková plazma	10 000 K
argonová plazma	16 000 K
heliová plazma	20 000 K
plazma stabilizovaná vodou až	35 000 K



Obr. 2.1 Závislost entalpie plynů na teplotě

Obecně se pro plazmové svařování používají tři druhy plynů:

- plazmový: Ar, Ar + H₂, Ar + He, s průtokem 0,5 až 9 l.min⁻¹
- fokusační pro zúžení plazmového paprsku a průtokem 3 až 18 l.min⁻¹
- ochranný pro ochranu svarové lázně proti oxidaci s průtokem 2 až 20 l.min⁻¹, u aktivních materiálů Ti, Zr, Ta se průtok zvyšuje na 20 až 30 l. min⁻¹.

Běžná technická plazma se vyznačuje těmito vlastnostmi:

- Současně s pružnými srážkami molekul (atomů) se v podstatné míře vyskytují i nepružné, které vedou k disociaci a ionizaci plynu.

- Chemicky stejnorodý plyn se mění na směs atomů, iontů, elektronů, fotonů atd.
- Směs částic v plazmě je kvazineutrální, tzn. počet kladných a záporných částic je přibližně stejný.
- Elektrická vodivost plazmy je závislá na pohyblivosti elektronů (100x vyšší než iontů).
- Na plazmu silně působí elektrické a magnetické pole.

Vlastní princip je odvozený od svařování metodou WIG, kde keramická hubice je nahrazena kovovou tryskou chlazenou vodou nebo plynem. V principu existuje dvojí elektrické zapojení hořáku. Zapojení závislé (přenesený oblouk) u kterého je záporný pól připojen na wolframovou elektrodu a kladný pól na materiálu. Pro nastartování a zapálení pomocného oblouku se používá VF ionizátor připojený ke kovové trysce. Pomocný (pilotní) oblouk vytvoří dostatečně vodivé prostředí pro zapálení hlavního oblouku i na relativně dlouhou vzdálenost. Závislé zapojení se používá především u svařování, navařování a řezání.

Připojení pólů zdroje pouze na elektrodu a kovovou trysku se nazývá nezávislé zapojení (nepřenesený oblouk) a používá se především u žárových nástřiků nebo povrchového kalení.

Plazmový hořák má zúženou výstupní trysku, která přispívá ke kontrakci plazmového paprsku.

Kontrakce je podporována také fokusačním plynem přiváděným k plazmovému paprsku. Jako fokusační plyny se používají směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Dvouatomové plyny s vysokou spotřebou energie na disociaci a velkou tepelnou kapacitou odebírají teplo z vnějších vrstev plazmatu a vysokou tepelnou vodivostí vodíku je tento efekt ještě zesílen. Plazma se tím zužuje a protože musí přenést výkon odpovídající nastaveným hodnotám zvýší se její teplota a tím i stupeň ionizace a následně elektrická vodivost. Ochlazení plazmy při kontaktu se svařovaným materiálem vede k opačnému pochodu tzv. rekombinaci, kdy dochází ke slučování elektronů s ionty na atomy.

Při rekombinaci se disociací a ionizací akumulované teplo uvolňuje a přenáší do materiálu.

Účinnost přenosu tepla se pohybuje kolem 70 – 80 %.

Při ohřevu plynu obloukem se mnohonásobně zvyšuje jeho objem a tím výstupní rychlost plazmy dosahuje vysokých hodnot. Dynamická účinnost dopadající plazmy spolu s vysokou teplotou umožňuje proniknutí paprsku v celém průřezu materiálu. Při svařování musí být dosažena rovnováha mezi tímto dynamickým účinkem a povrchovým napětím taveniny tak, aby nedošlo k vyfouknutí taveniny ze spáry. Výstupní rychlost plazmy při svařování a navařování se pohybuje mezi 200 až 500 m.s⁻¹. [Svařování plazmou](#). Další možnost je [pájení bronzovým přídavným materiálem](#).

2.1 SVAŘITELNOST MATERIÁLŮ PLAZMOVÝM SVAŘOVÁNÍM

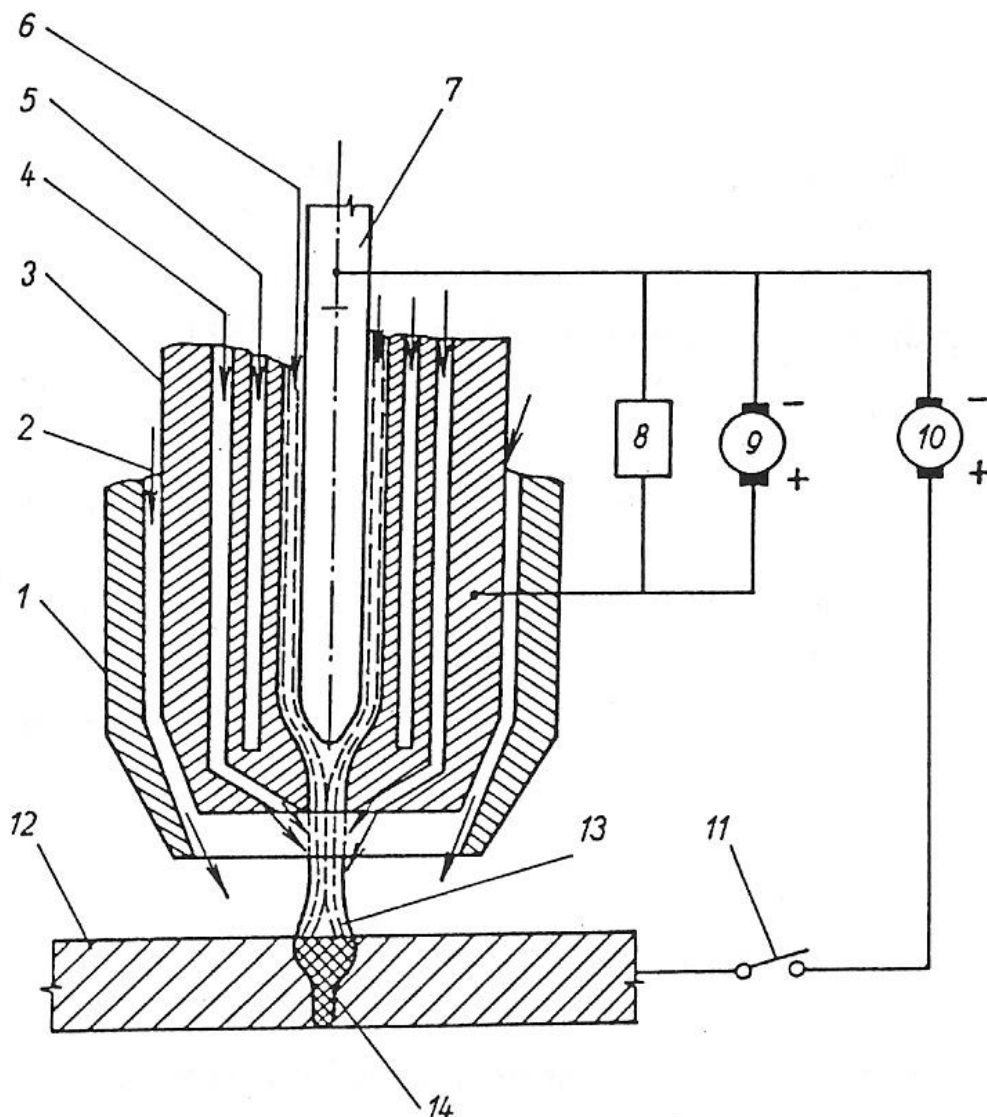
Svařitelnost materiálů i parametry svařování jsou u plazmového svařování podobná jako u metody WIG. Plazmové svařování však dosahuje vysokých svařovacích rychlostí, výhodnější poměr šířky k hloubce (1:1,5 až 1 : 2,5) a spolehlivé provaření kořene. Svařují se všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl molybden a jejich slitiny. Parametry svařování vysokolegovaných ocelí se pro tloušťky 2 až 10 mm pohybují v těchto mezích: 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

Hliník se svařuje střídavým proudem a např. tl. 6 mm lze svařovat s tímto průběhem:

- přímá polarita na elektrodě svařovací cyklus 140 A v čase 20 ms, (nebo 125 A, 20 ms)
- obrácená polarita na elektrodě – čistící cyklus 180 A v čase 3 ms, (nebo 200 A, 2 ms).

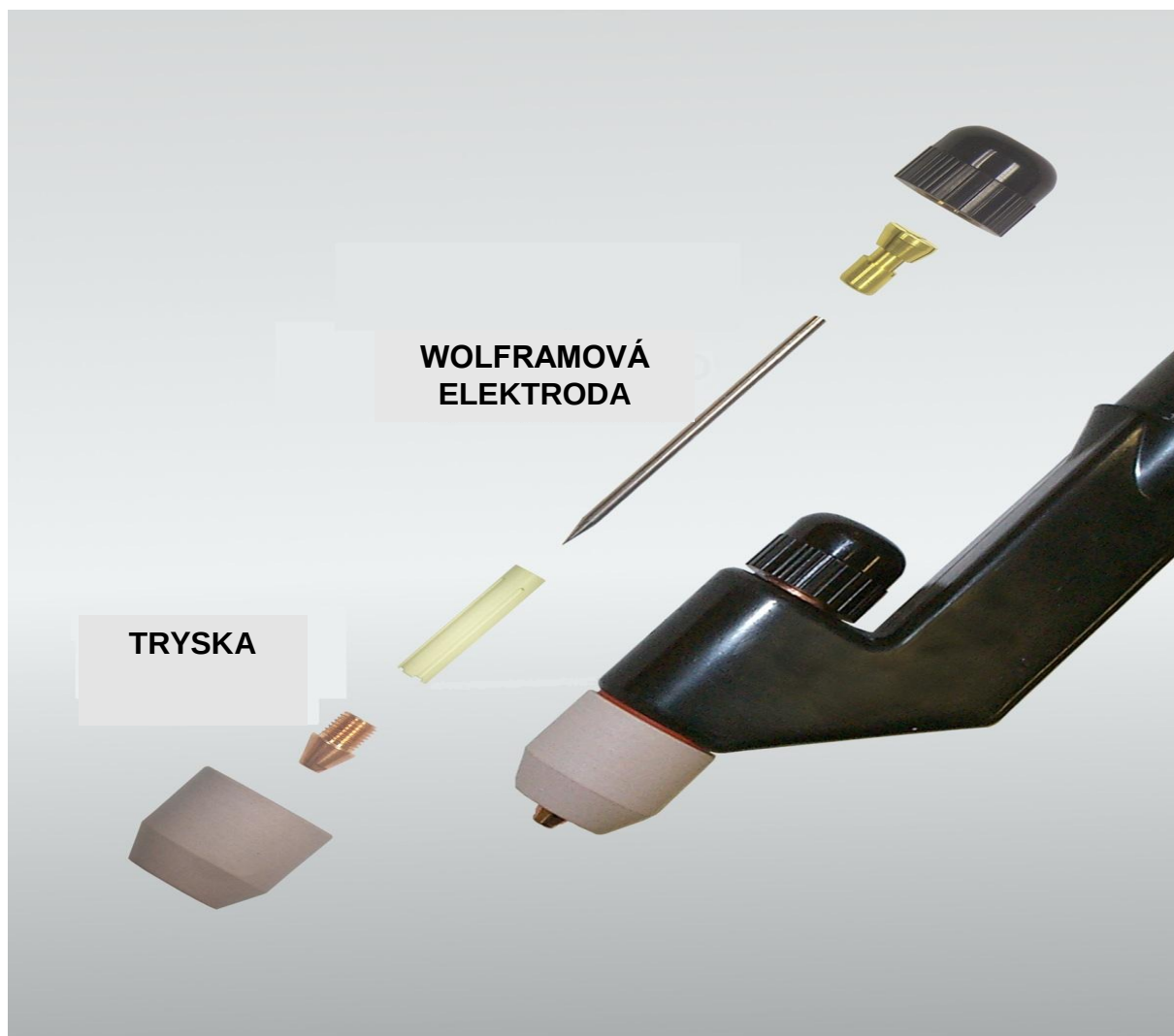
Materiály náchylné na přehřátí se svařují s použitím impulsního proudu.



- 1) hubice pro přívod ochranného plynu
- 2) ochranný plyn
- 3) tryska hořáku
- 4) fokusační plyn
- 5) vodní chlazení
- 6) plazmový plyn
- 7) wolframová elektroda

- 8) vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor
- 9) zdroj pomocného oblouku tzv. nezávislé zapojení
- 10) zdroj hlavního elektrického oblouku tzv. závislé zapojení
- 11) spínač
- 12) základní svařovaný materiál
- 13) plazmový paprsek
- 14) provedený svar

Obr.2.2 Řez plazmovým hořákem



Obr. 2.3 Plazmový hořák



Obr. 2.4 Plazmový paprsek – vlevo, elektrický oblouk WIG - vpravo

2.2 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.

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.

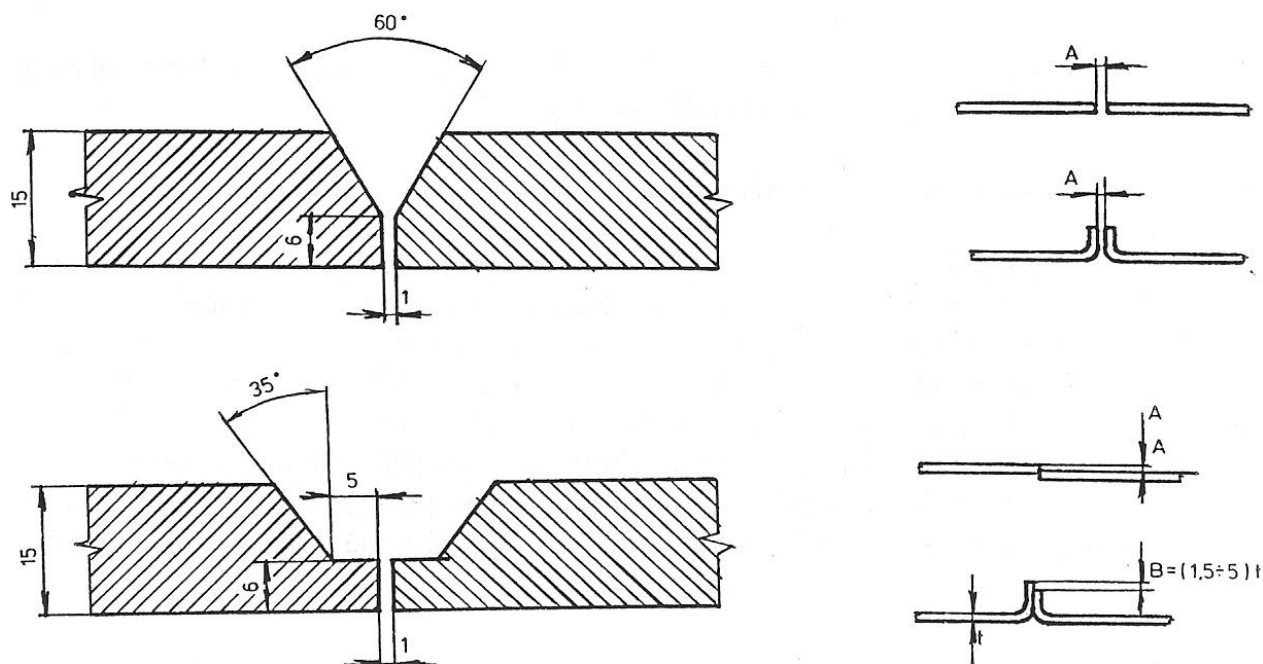
2.3 MIKROPLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ

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.

Příklady parametrů mikroplazmového svařování:

CrNi ocel, tloušťka 0,25 mm, proud 5,6 A, rychlost svařování 38 cm.min⁻¹,
 Slitina niklu Inconel, tl. 0,3 mm, proud 6 A, rychlost svařování 40 cm.min⁻¹,
 Měď, tloušťka 0,075 mm, proud 10 A, rychlost svařování 15 cm.min⁻¹,
 Titan, tloušťka 0,2 mm, proud 5 A, rychlost svařování 12,5 cm.min⁻¹.



Obr. 2.5 Úpravy svarových ploch pro plazmové a mikroplazmové svařování oceli.

2.4 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. Omezeně lze nezávislým zapojením řezat i elektricky nevodivé materiály.

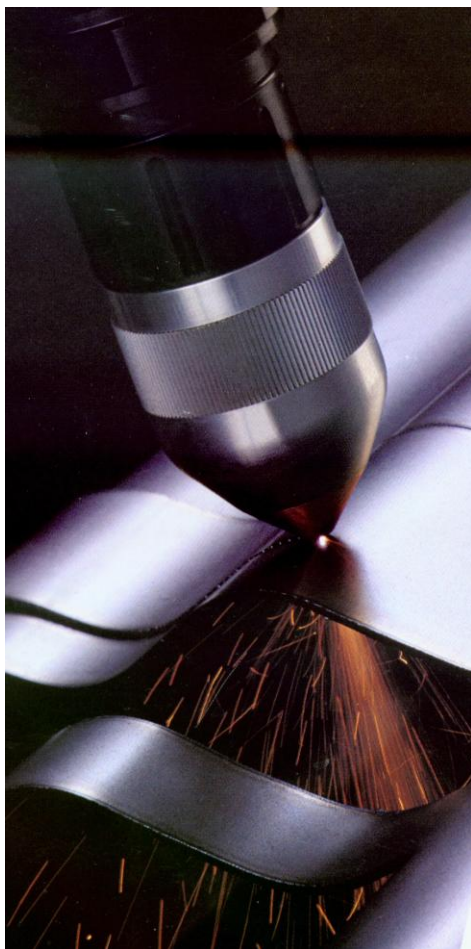
Rychlost řezání je závislá na výkonu zdroje, tloušťce a druhu řezaného materiálu a jeho fyzikálních vlastnostech. Maximální tloušťka materiálu kterou lze řezat je cca 250mm. Zdroje pro řezání mají vysoké napětí naprázdno cca 250 až 350 V a při řezání dosahuje hodnota napětí mezi 110 až 150 V. Na začátku řezání je pomocí VF ionizátoru zapálen tzv. pilotní oblouk, který hoří mezi elektrodou a kovovou hubicí po dobu 6 až 10 vteřin. Pilotním obloukem se zajistí ionizace prostoru mezi elektrodou a řezaným materiálem a tím se vytvoří podmínky pro zapálení hlavního řezacího oblouku.

Rychlost řezání tenkých plechů se pohybuje mezi 9 až 12 m.min⁻¹.

V současnosti se používají pro stabilizaci plazmy různé plyny

Tab.2.1 Typy řezacích plazmových zařízení

Typ plazmy	Rychlost řezání	Kvalita řezu
Vzduchová	Vysoká	Průměrná
Plynová	Nízká	Vysoká
Dusíková kombinovaná s vodou	Vysoká	Vysoká
Kyslíková	Vysoká	Vysoká
Stabilizovaná vodní parou	Vysoká	vysoká



Obr. 2.6 Řezání kyslíkovou plazmou

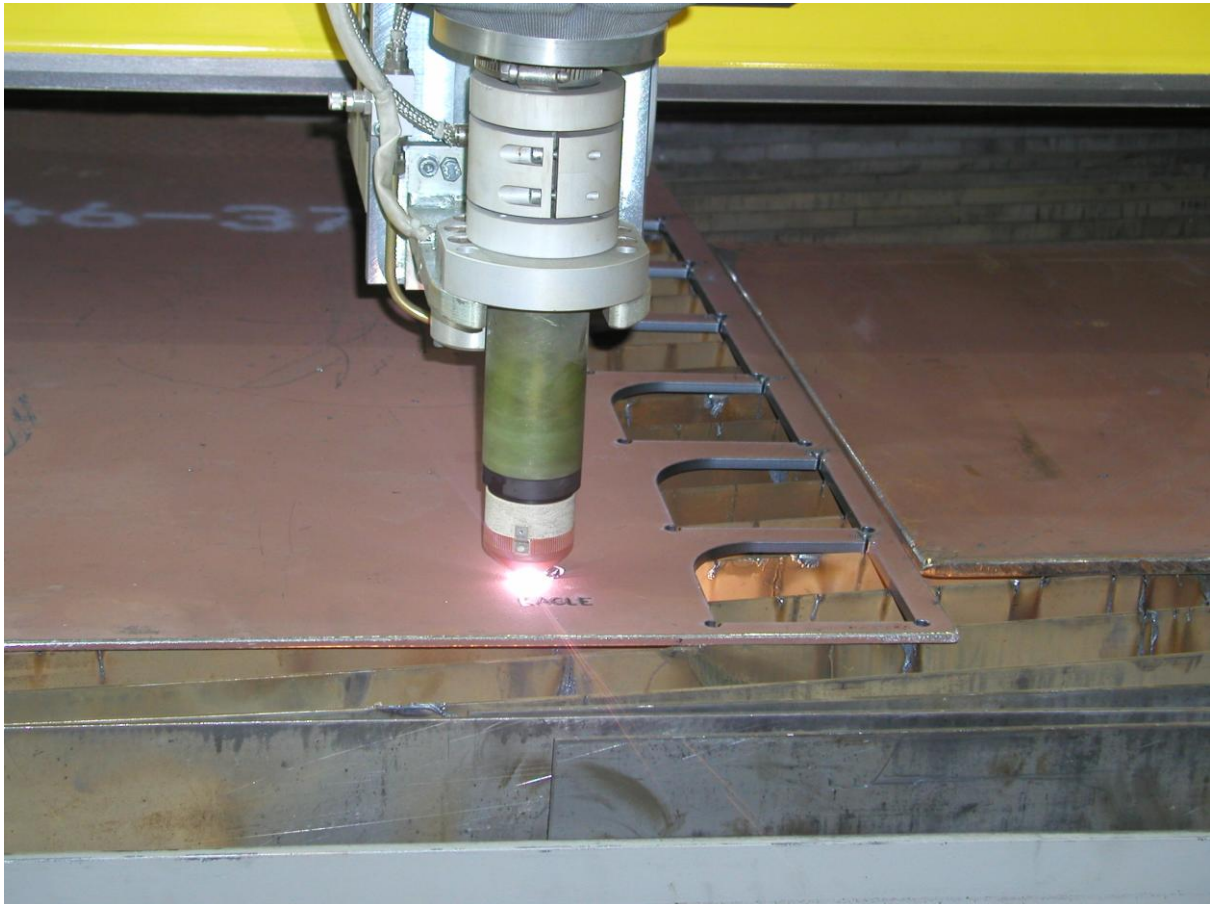
Plynová plazma je stabilizovaná směs $\text{Ar} + \text{H}_2$, elektroda je wolframová a používá se především pro řezání vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu, mědi a dalších kovů. Kombinací argonu a vodíku od 5 do 35% lze dosáhnout optimálních výsledků s ohledem na teplotu plazmatu, řeznou rychlost a kvalitu řezné plochy u většiny kovů. Někdy se místo vodíku používá dusík, nebo může být použita tříložková směs. U malých tloušťek materiálů je řezání plynovou plazmou několikanásobně rychlejší než u řezání kyslíkem a k vyrovnání rychlostí dochází v rozmezí tl. 20 až 35 mm.

Vzduchová plazma je současně velmi rozšířená a její provoz je ekonomicky velmi výhodný do tloušťky cca 40 mm. Ke stabilizaci se používá stlačený vzduch (0,4 až 0,8 MPa) o vysokém průtočném množství až $130 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Vysokým průtokem vzduchu se ochlazuje vnější vrstva plazmy, čímž se kontrahuje plazmový paprsek a získá se úzká rovnoběžná řezná spára. Současně se vysokým průtokem zlepšuje chlazení hořáku. Vzduchová plazma má ve srovnání s plynovou výrazně větší tepelnou kapacitu a tím i vysokou rychlost řezání. Ke spalování řezaného materiálu kyslíkem dochází je omezeně, ale v chladnější zóně řezu na spodní straně dochází k výraznější oxidaci, což zajišťuje čistou spodní hranu řezu.

Velmi rozšířené je řezání vzduchovou plazmou u nelegovaných a středně legovaných ocelí.

Vzhledem k výrazné reakční schopnosti vzduchu nelze použít wolframovou elektrodu (teplota tavení oxidů wolframu se pohybuje mezi 1270 až 1473° C) , ale zirkonovou nebo hafniovou elektrodu jejichž oxidy a nitridy mají vysoké teploty tavení 2500 až 3300 °C. Vlastní hafniová elektroda je uložena v niklovém pouzdře měděného nosiče. I v tomto případě není životnost elektrod příliš velká.

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.

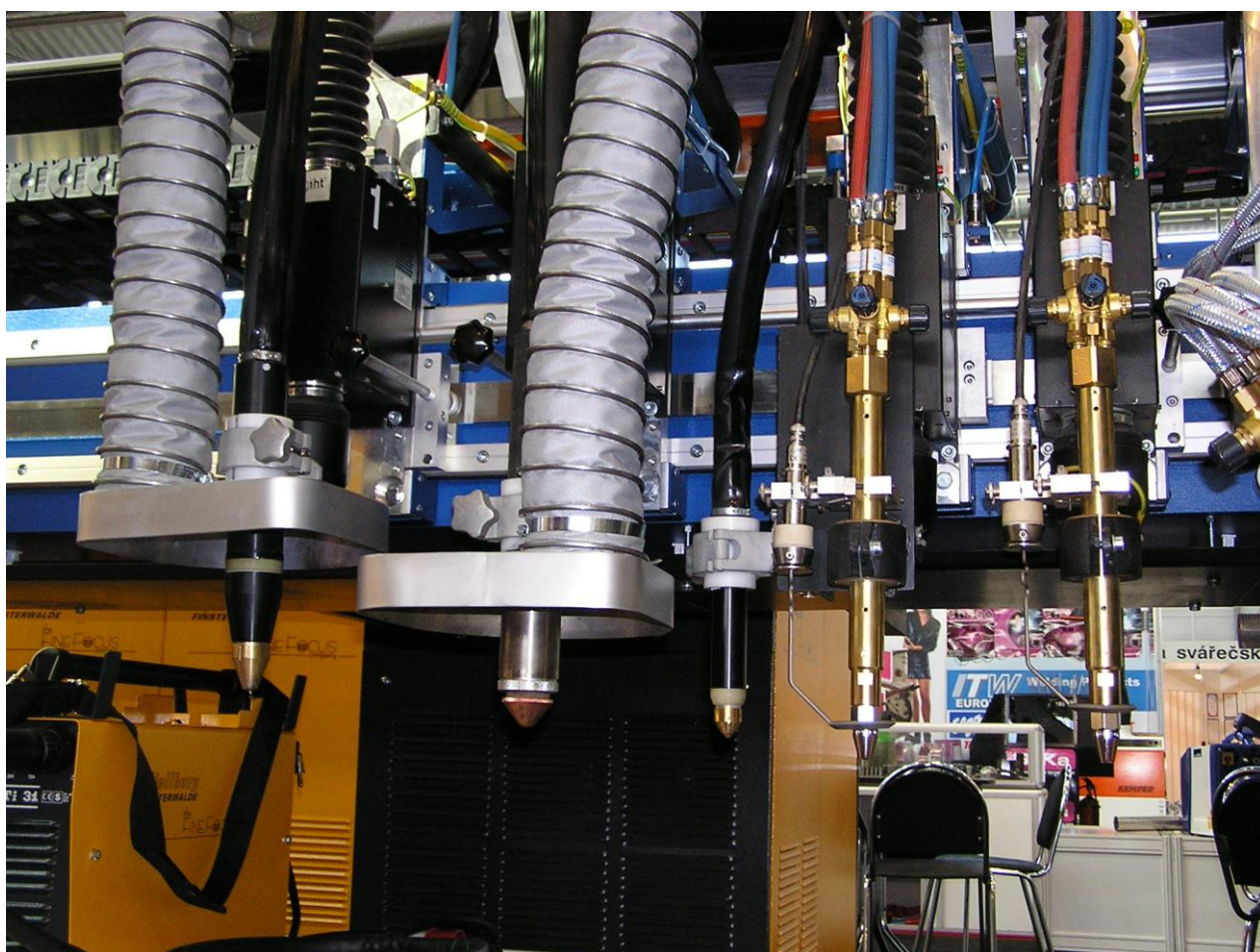


Obr. 2.7 Řezání přesnou kyslíkovou plazmou

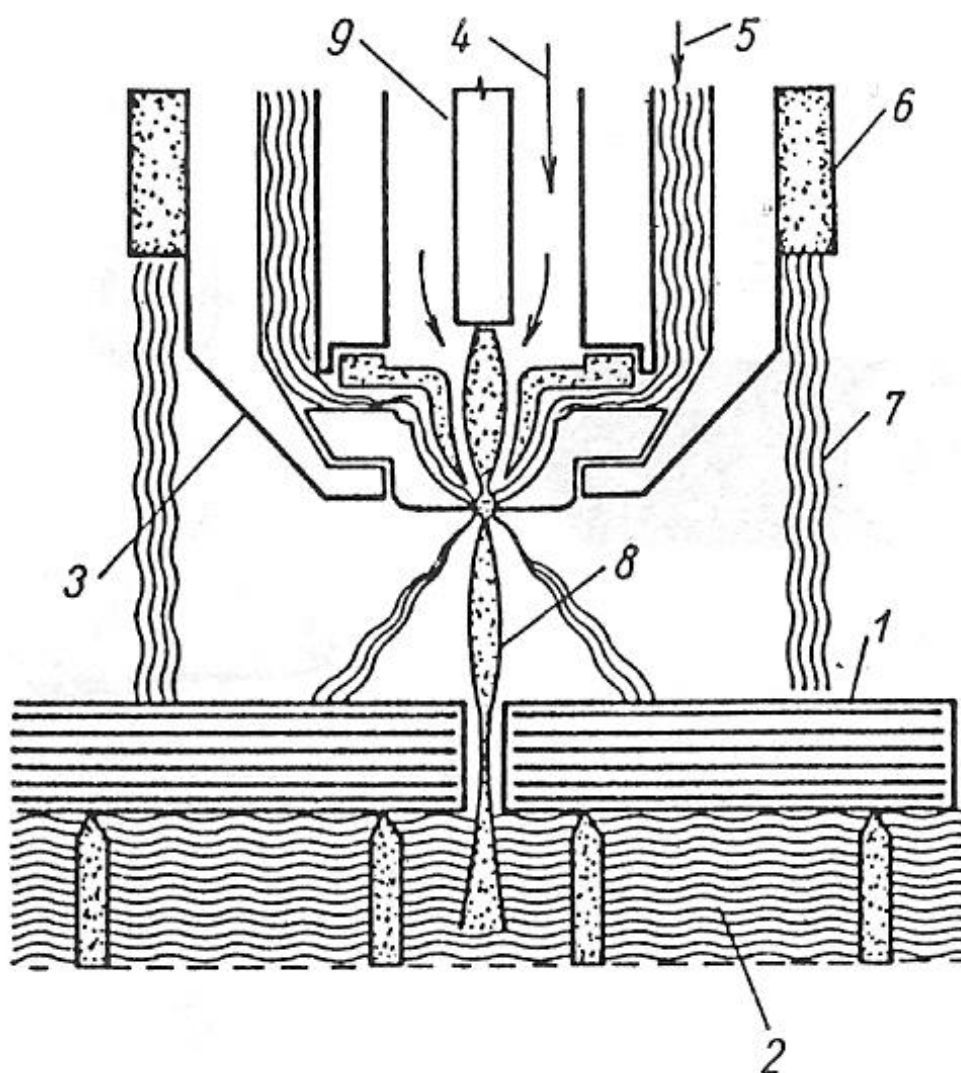
Dusíková plazma kombinovaná s injekčním přívodem vody je určena především pro řezání velkých tloušťek vysokolegovaných ocelí obr.13.7. Konstruktivním uspořádáním hořáku se k okrajovým vrstvám plazmového paprsku tangenciálně přivádí voda (někdy oxid uhličitý). Vytváří se vodní vír, který ochlazuje vnější vrstvy plazmy a dochází k disociaci vody, čímž se dosahuje jejího zúžení a zvýšení teploty. Dusíková plazma kombinovaná s vodou zlepšuje kvalitu řezných ploch, jejich kolmost a zvyšuje řeznou rychlost. Řezání dusíkovou plazmou lze kombinovat s vodní sprchou, nebo se hořák po zapálení ponoří pod hladinu vody, která výrazně zvyšuje hygienu práce.

Plazma stabilizovaná vodní parou je generována disociací a ionizací odpařené demineralizované vody v topném tělese hořáku. Zařízení vyvinuté firmou Fronius není tedy závislé na přívodu plynu nebo stlačeného vzduchu, což přináší vysokou mobilitu. Plazma tvořená 66% H₂ má vynikající redukční účinky a řezné hryny mají jen velmi tenkou vrstvu oxidů.

HD – High Definition plazma představuje poslední vývojový stupeň plazmového řezání. Celý název zní „High Tolerance Plasma Arc Cutting“ a vlastní plazmový hořák patentovala firma Hypertherm. V principu se jedná o velmi intenzivní zúžení plazmového paprsku odvedením vnějšího chladnějšího obalu plazmy. Z hořáku vycházející plazmový paprsek má až trojnásobné zvýšení hustoty energie při současném zvýšení teploty a výstupní rychlosti. Výsledkem je poloviční zúžení řezné spáry, zvýšení řezné rychlosti a dosažení kolmosti řezných ploch bez otřepů na spodní hraně plechu. Při použití vysoce čistého kyslíku (99,95%) jako plazmového plynu se dosáhne u nelegovaných ocelí kvality řezných ploch srovnatelných s řezáním laserem. Při řezání vysokolegovaných ocelí, hliníku a mědi se používá směs dusíku (99,999%) a kyslíku. HD plazma je velmi vhodná alternativa za řezání laserem s nižšími pořizovacími i provozními náklady.



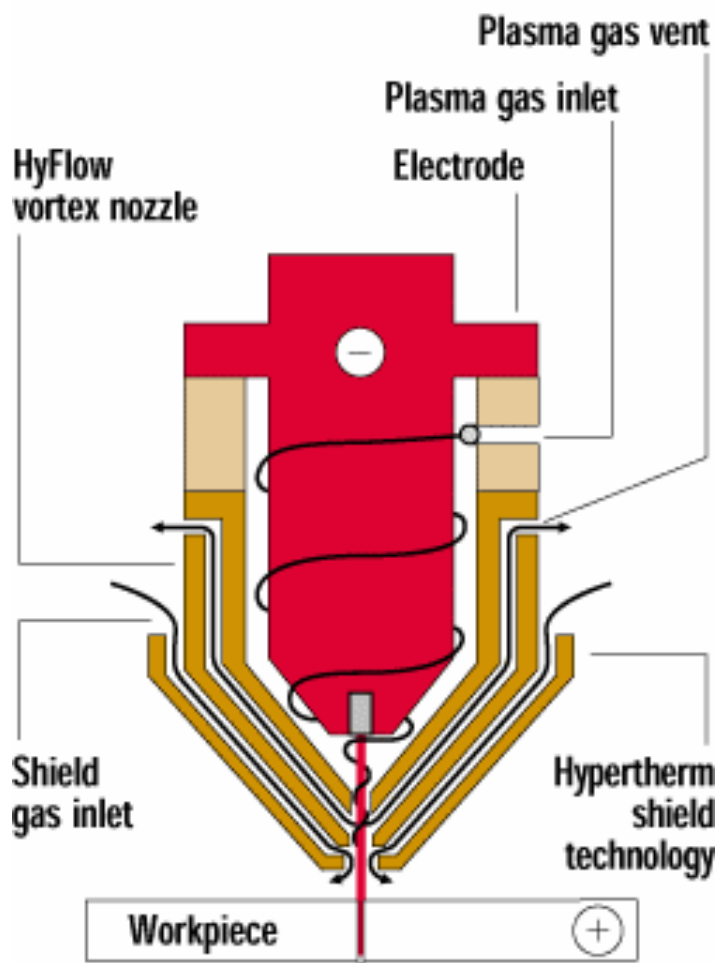
Obr.2.8 Řezací zařízení s plazmovými i kyslíko-acetylénovými hořáky



1. dělený materiál
2. vodní lázeň
3. hubice plazmatronu
4. plazmový plyn
5. voda
6. vnější plášť vodní sprchy
7. vodní sprcha
8. plazmový paprsek
9. wolframová elektroda

Obr.2.9 Dusíková plazma s injekcí vody.

Patented HyFlow vortex technology



Obr. 2.10 Princip plazmového řezání s vysokou přesností (HD plasma)

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
- vysoké pořizovací náklady
- obtížné propalování otvorů u tloušťek nad 15 mm.



Obr.2.11 Řezací zařízení na plasmu kyslík i vodní paprsek

Bezpečnost svařování a řezání plazmou

Při plazmových procesech je nutné dodržovat stejné zásady jako při svařování obloukem. Plazma je však vyjímečná svojí vysokou teplotou a výrazným ultrafialovým zářením. Proti svařování el. obloukem má plazma výrazně vyšší napětí – až 300V u zapalování plazmy při řezání. Nutnost ochrany sluchu především u řezacích a stříkacích hořáků, kde může hlučnost dosáhnout až 120 dB. U žárových nástřiků a řezání plazmou musí být zajištěno dokonalé odsávání zplodin.

3. ELEKTRONOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Svařování svazkem elektronů je proces tavného svařování, při kterém se kinetická energie rychle letících elektronů mění na tepelnou při dopadu na povrch svařovaného materiálu.

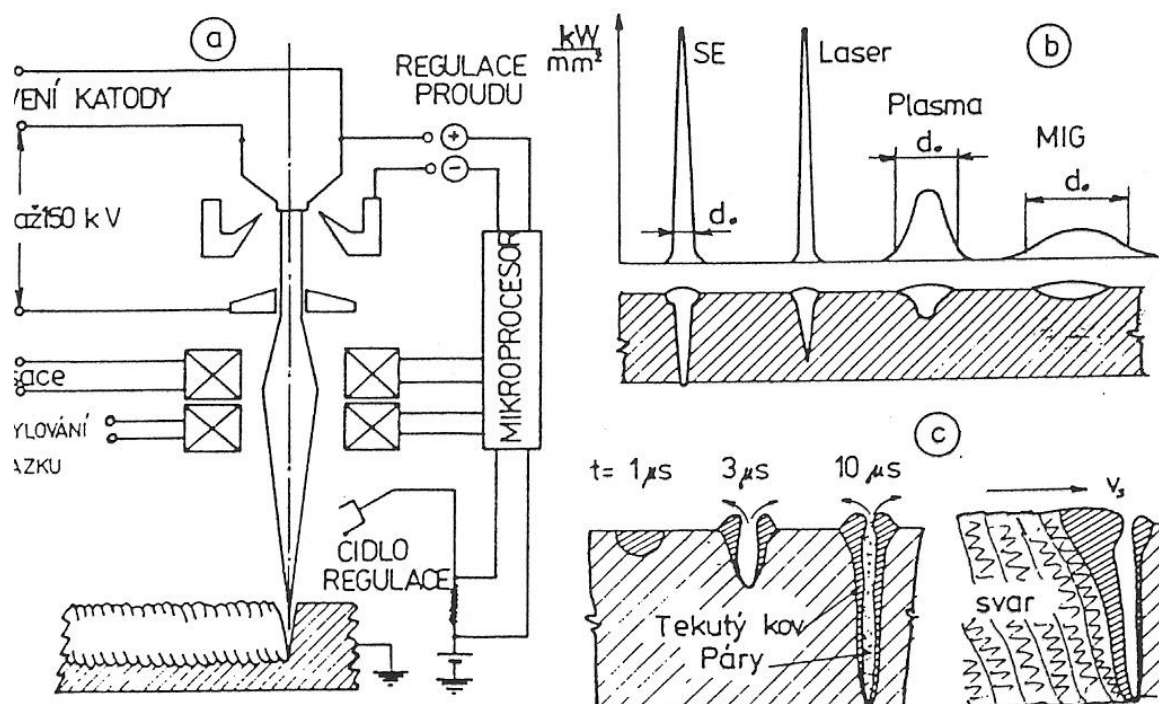
První aplikaci svařování fokusovaným svazkem elektronů uskutečnil **J.A. Stohr** ve francouzské atomové komisi CEA v roce 1954 až 1957 a dnes je uvedená metoda svařování rozšířená ve všech průmyslově vyspělých státech světa včetně ČR, kde pracuje cca 20 zařízení.

3.1 PRINCIP SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ

Vlastní zdroj elektronů je válcová vakuovaná nádoba na jednom konci opatřená přímo nebo nepřímo žhavenou emisí elektrodou a na druhém konci vybavená oddělovacím uzávěrem, který je kombinovaný s hranolem pozorovací optiky. Zdroj elektronů na obr. 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. V současnosti existují zařízení které využívají vysokého vakua stejného v pracovní komoře i ve zdroji elektronů. Vlastní svařování probíhá v pracovní vakuové komoře, kde svařovací pohyb je zajištěn programovatelným polohovadlem s několika stupni volnosti

Pracovní komory jsou různě velké a jejich vnitřní objem se pohybuje od několika litrů po 20 i více m^3 .

Elektrony jsou termoemisí uvolněny ze žhavené záporné elektrody (W, Mo, Te, Ta, Nb a pro nejvyšší výkony LaB_6) a od elektrody jsou elektrony odtaženy tzv. zaostřovací elektrodou (Wehneltovou clonou), která má vůči katodě záporné předpětí přibližně 100 V. Elektron je nejmenší elektricky nabitá částice s velmi nízkou hmotností $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg a lze ho proto elektrickým polem urychlit na vysokou rychlost, u nejvýkonnějších zdrojů až na 75% rychlosti světla.



Obr. 3.1 Princip svařování svazkem elektronů

a) schéma zařízení b) rozložení hustoty energie a odpovídající závar
c) mechanismus tavení.

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:

$$W = e \cdot U \text{ eV}$$

kde e je elementární náboj elektronu $= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ a U je urychlovací napětí ve voltech.

Při výpočtu kinetické energie elektronů se vychází také ze vztahu:

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

kde m_e je hmotnost elektronu $9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ a

v_e je rychlost elektronu, kterou můžeme ze vztahu vyjádřit jako

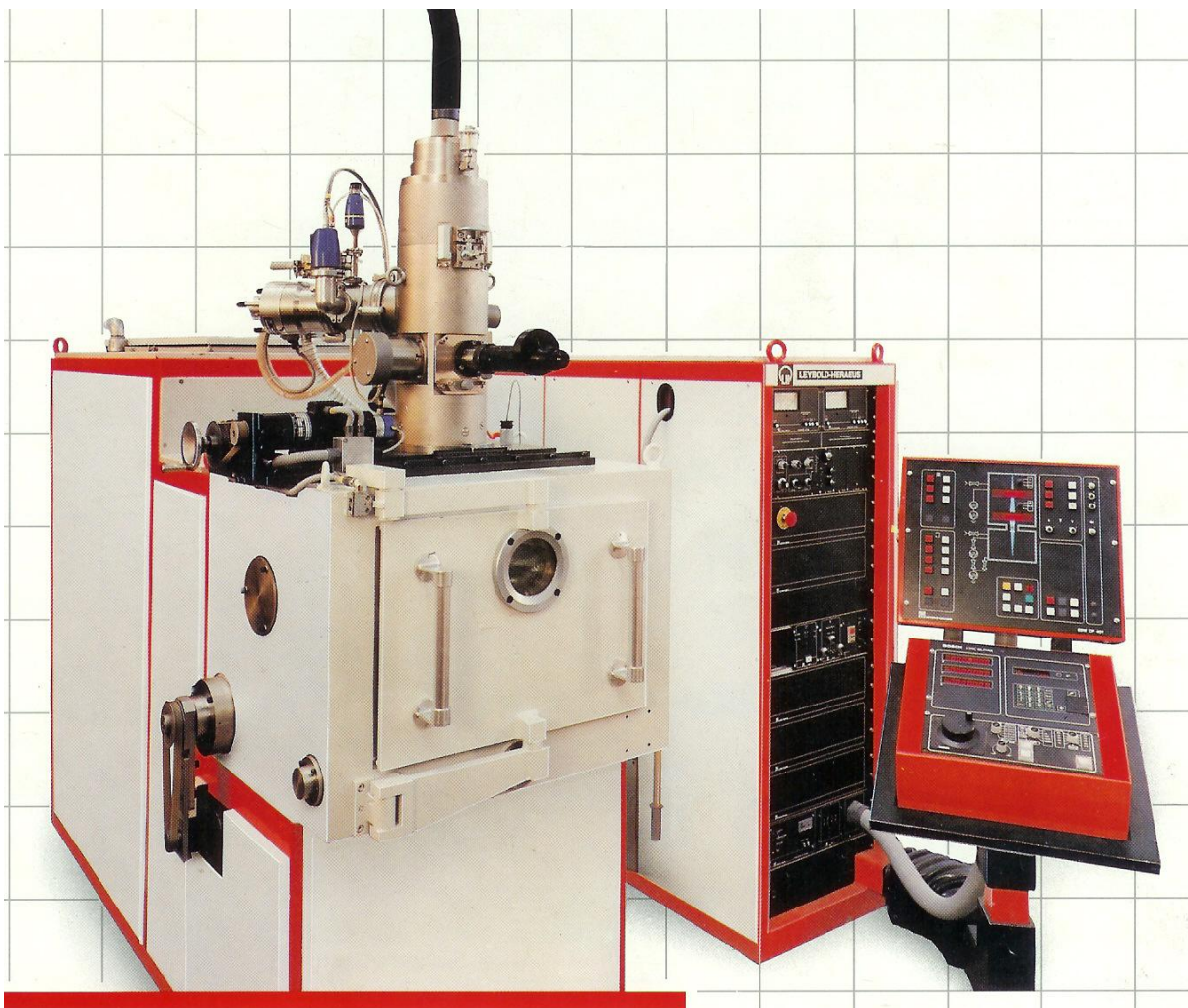
$$v_e = 600 \cdot \sqrt{U} \text{ (km.s}^{-1}\text{)}$$

Svazek elektronů je fokusován pomocí magnetických polí do místa dopadu. Tato fokusace je nutná z důvodu rozbíhavosti vlivem odpuzivých sil mezi záporně nabitými elektrony. Dále jsou elektrony ovlivňovány vychylovacím systémem, který paprsek směřuje do místa svaru a slouží k zaměření svazku na svarovou spáru před svařováním. U některých zařízení se vychylování používá pro skenovací (sledovací) cyklus, kdy v době 0,5 – 2 ms je svařovací paprsek se sníženým výkonem využit pro vedení svazku ve svarové spáře během svařování nebo pro skenování a snímání odražených elektronů pro získání obrazu svarové plochy na obrazovce svařovacího zařízení.

Tato zařízení mohou svařovat velice úzkým svazkem o průměru až 0,05 mm a tloušťky materiálu se běžně pohybují v rozmezí 0,1 až 50 mm, ale při vodorovné poloze svaru lze svařovat až 400 mm.

Zařízení využívající poloviční vakuum musí mít svazek elektronů vyvedený do pracovní komory přes několik komor se snižující se hodnotou vakua. Svar u takového zařízení je širší a hloubka dosahuje jen několik desítek mm. Zařízení je vhodné např. pro kontinuální svařování.

Existují i zařízení pro svařování se svazkem vyvedeným do ochranného plynu při atmosférickém tlaku pro mělké svary.

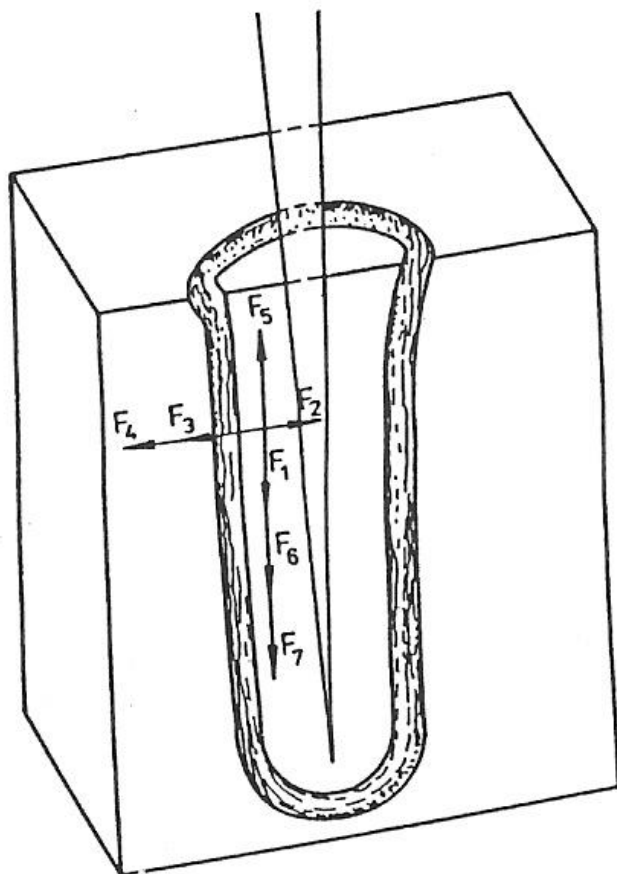


Obr. 3.2 Zařízení pro elektronové svařování (vakuová komora 80 l, zdroj elektronů nad komorou)

3.2 INTERAKCE ELEKTRONŮ S MATERIÁLEM

Při dopadu elektronů na povrch materiálu dochází k jejich částečnému odrazu (až 70%). Interakcí elektronů s atomy kovu je emitováno z místa dopadu RTG a tepelné záření, dále se uvolňují sekundární elektrony, molekuly kovu a kladné ionty. Dopadem svazku na materiál pronikají zbývající elektrony (cca 30%) do hloubky několika desítek mikrometrů, přičemž dochází k vibračnímu přenosu energie, která urychluje kmitání atomové mřížky kovu. Elektrony neztrácejí svoji energii ihned, ale postupně ji předávají atomům mřížky.

Během několika μs dosáhne materiál teploty tavení, posléze teploty varu kovu a vytvoří se úzká kapilára vyplněná parami kovů o nízkém tlaku. Tento tlak je však dostatečně vysoký, aby spolu s reakční silou udržel taveninu na stěně kapiláry. Tloušťka taveniny na stěně se pohybuje jen do desetiny mm. Páry kovu nebrání průchodu elektronů a proto úzká spára proniká postupně celou tloušťkou materiálu. V kapiláře působí tato řada sil závislých na parametrech svařování: síla proudu elektronů F_1 , elektromagnetická síla vznikající od svazku elektronů F_2 , síla reakce na odpařování F_3 , statický tlak par v kapiláře F_4 , síla vznikající z povrchového napětí F_5 , gravitační síla F_6 a hydrostatická síla tekutého kovu F_7 .



Obr.3.3 Rozložení sil ve svarové kapiláře

Při pohybu svazku materiálem dochází k narušení termodynamické rovnováhy v mezeře a rozdílu sil povrchového napětí na hraně kapiláry a v místě krystalizace taveniny vlivem gradientu teplot. Rozdílem povrchového napětí se přemísťuje tavenina za postupující elektronový paprsek a vytváří svár. Přídavný materiál se u tohoto způsobu používá jen výjimečně (drát, pásek nebo prášek) a svár se tvoří metalurgickým natavením obou polovin svařované součásti. Vysoká koncentrace energie až $5 \cdot 10^8 \text{ W.cm}^{-2}$ umožňuje vytvořit svár s minimální oblastí natavení a velmi malým množstvím vneseného specifického tepla. Důsledkem je jemnozrnná krystalizace svarové lázně s mechanickými vlastnostmi, které se málo odlišují od základního materiálu. Díky vysoké rychlosti svařování je také tepelně ovlivněná oblast velmi malá a dosahuje jen několika desetin mm. Výsledkem uvedených skutečností je minimální deformace svařence, což umožňuje svařování polotovarů s konečným opracováním.

Pro svařování svazkem elektronů je charakteristická minimální mezera mezi spojovanými materiály s velmi dobrým opracováním - $R_a = 0,8 - 1,6 \text{ } \mu\text{m}$. Optimální mezera je cca 0,1mm. Šířka paprsku při dopadu na materiál se řídí šířkou spáry a průměr by měl být přibližně čtyřnásobný, aby bylo zajištěno dokonalé překrytí. Svařování také vyžaduje vysokou čistotu svaru s dokonalým odmaštěním, protože i malý zbytek tuku na povrchu svarových ploch při ohřevu zplynuje a vytvoří vady typu bublinatosti a pórovitosti.

Ve většině případů se svařuje s vertikálně orientovaným svazkem elektronů, ale při velkých tloušťkách jsou síly hydrostatického tlaku a gravitace příliš velké. Výsledkem je zalití dna kapiláry taveninou a tím zabránění dalšímu průniku elektronů. Z těchto důvodů se silnostěnné aplikace svařují v horizontální poloze. Svařování svazkem elektronů je charakteristické vysokým poměrem štíhlosti svaru ψ , kde poměr hloubky h k šířce b' dosahuje hodnot 20 až 50 v závislosti na fokusaci paprsku.

3.3 SVAŘITELNOST MATERIÁLŮ

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. Tyto plyny reagují s kovem při podstatném zhoršení mechanických vlastností, především snížením houževnatosti. Je možné svařovat i vysokotavitené a žárupevné slitiny typu Inconel, Nimonic. V poslední době se elektronovým svařováním spojují materiály tavným způsobem nesvařitelné z důvodu vzniku křehkých intermetalických fází. Intermetalické fáze způsobují výrazné snížení plastických a pevnostních vlastností svarového kovu a způsobují praskání spoje. Při svařování urychlenými elektrony je úzkou svarovou lázní omezena tvorba těchto křehkých fází a přesným zaostřením můžeme dosáhnout požadované vzájemné rozpustnosti kovů a získání tuhého roztoku s vhodnými plastickými vlastnostmi.

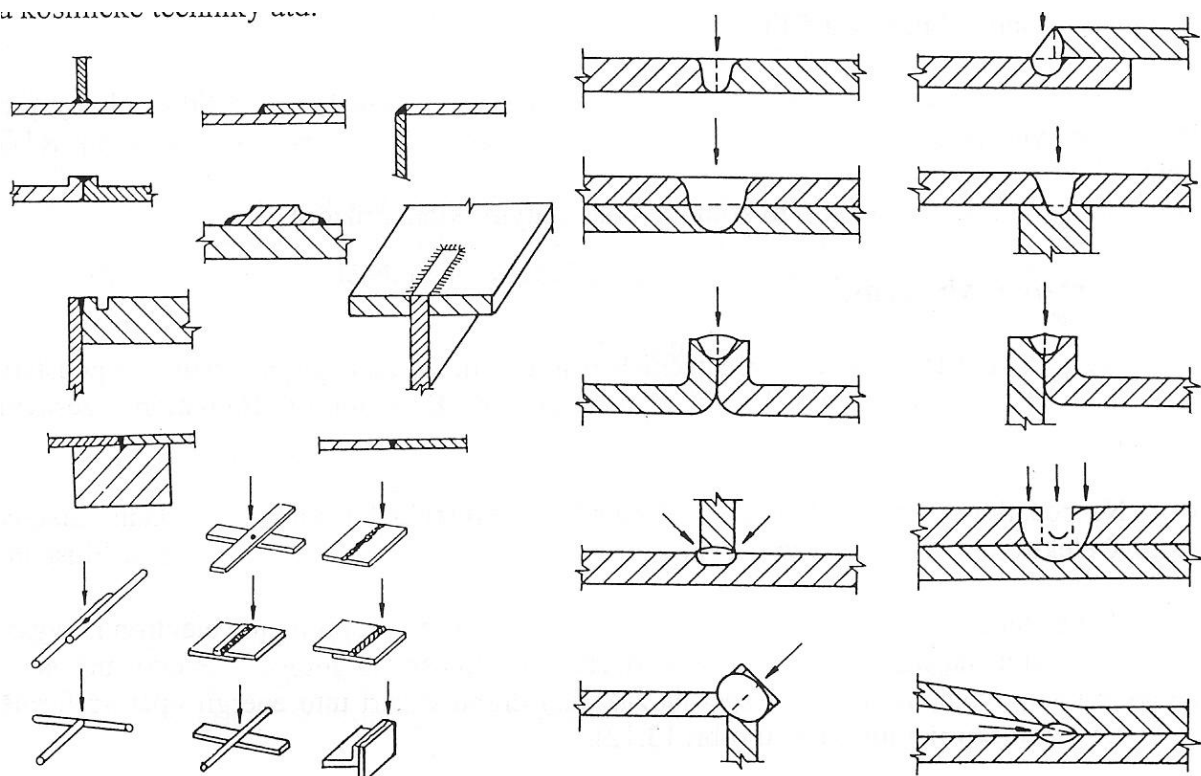
Tímto způsobem lze svařovat tyto vzájemné kombinace materiálů: Ti – Al, CrNi ocel – Al, Cu – Al, Cu – ocel, Al – Ni, atd.

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

Tvary svarových spojů, které jsou podobné i pro svařování laserem umožňují navrhovat i složité a netradiční konstrukce svařenců.

Využití elektronového svařování v technické praxi

V současnosti je uvedená metoda spojování využívána téměř ve všech strojních oborech. Svařují se tenké plechy řádově v desetínách mm v oblasti přístrojové techniky, oblast vakuové techniky, trubkové systémy a trubkovnice u výměníků tepla, kontrolní a měřicí sondy v oblasti jaderné i klasické energetiky, tlustostěnné svařence při výrobě rotorů parních turbín, rotory turbodmychadel, části leteckých motorů, velkoplošné součásti v oblasti letecké a kosmické techniky atd.



Obr.3.4 Tvary svarových spojů pro svařování svazkem elektronů a laserem

Výhody svařování svazkem elektronů:

- Velmi dobrý vzhled svaru s jemnou povrchovou kresbou.
- 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.
- Vysoký stupeň automatizace, bez ovlivnění svaru lidským činitelem.

Metoda svařování svazkem elektronů má i nevýhody:

- Vysoké nároky na čistotu svarových ploch a jejich přesné opracování.
- Přesné vedení svazku ve spáře.
- Vysoké investiční náklady.
- Nutnost vakua a dlouhý čas na jeho čerpání.
- Požadavek vnitřní čistoty materiálů.

Hygiena a bezpečnost.

Svařování svazkem elektronů nemá nepříznivé účinky na ovzduší poněvadž případné páry kovu kondenzují na vnitřním povrchu pracovní komory. Z toho důvodu se komora vykládá výměnnou hliníkovou folií.

Při práci s elektronovými svářecími zařízeními je však třeba se řídit pokyny pro práci s vysokým napětím a ionizujícím zářením, poněvadž průvodním jevem je vznik RTG záření.

Toto záření je eliminováno pláštěm komory a olovnatým sklem průzoru.



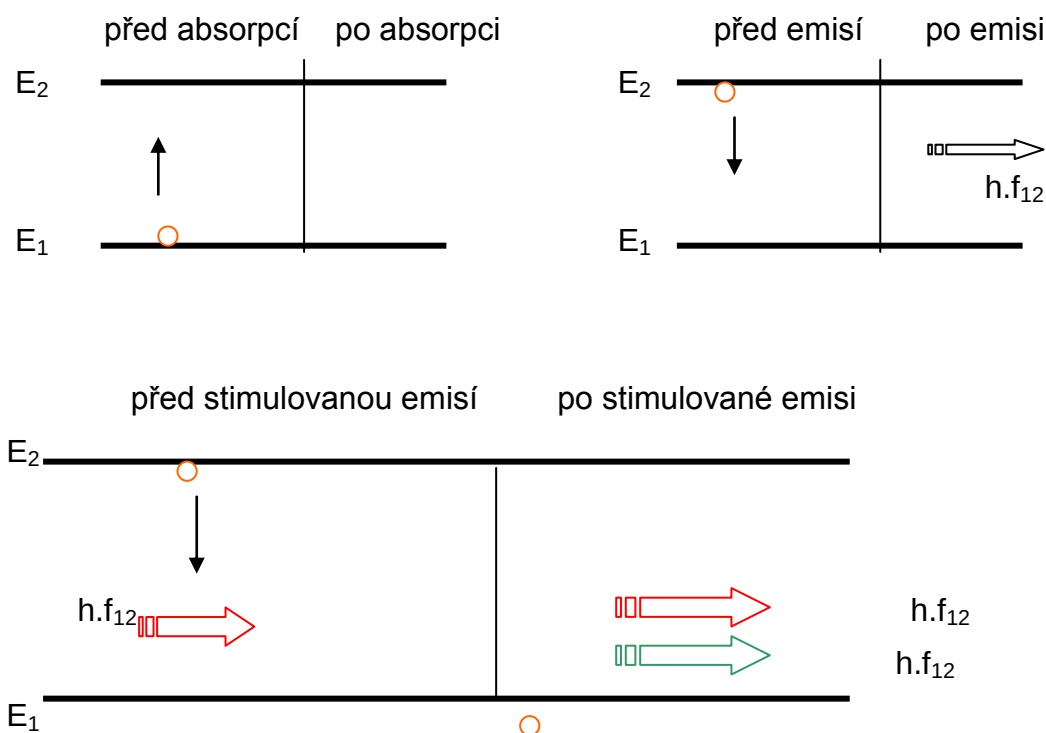
Obr. 3.5 Ukázka aplikací svařování svazkem elektronů

4. 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.

Na počátku století **M.Planc**, **N. Bohrn** a **A. Einstein** formulovali základní zákony kvantové elektroniky a podstatu vynucené emise záření popsal v roce 1917 a Albert Einstein.

Podle Bohrovy teorie elektronového obalu při absorpci fotonu přejde elektron na vyšší kvantovou dráhu na niž má energii větší o energii pohlceného fotonu - excitovaný stav. Naopak při samovolném přechodu zpět na základní dráhu vyzáří tuto energii opět ve formě fotonu tzv. **spontánní emisí záření**.



Obr. 4.1 Schéma přechodů mezi dvěma energetickými hladinami

A. Einstein popsal vybuzení atomů aktivního prostředí ozářením vlnou s příslušnou frekvencí kmitání. Kvant vnějšího elektromagnetického záření (foton) s energií rovnající se rozdílu energetických hladin dopadá na atom (iont, molekulu), který je ve vybuzeném (excitovaném) stavu na hladině E_2 . Vlivem vnějšího podnětu se vybuzený atom vrací na základní hladinu, přičemž emituje nový foton se stejnou energií jakou má iniciační foton. Tento proces se nazývá **stimulovanou (vynucenou) emisí záření** a je využitelný pro zesílení záření jedné vlnové délky, na rozdíl od spontánní emise, kdy vyzářená energie ve formě fotonů různých vlnových délek je nevyužitelná pro zesílení, ale je ztracená ve formě tepla.

Energie fotonů se rovná rozdílu energetických hladin:

$$h \cdot f_{12} = E_2 - E_1$$

kde h je Planckova konstanta $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s

f_{12} je frekvence kmitání odpovídající přechodu E_1 až E_2 .

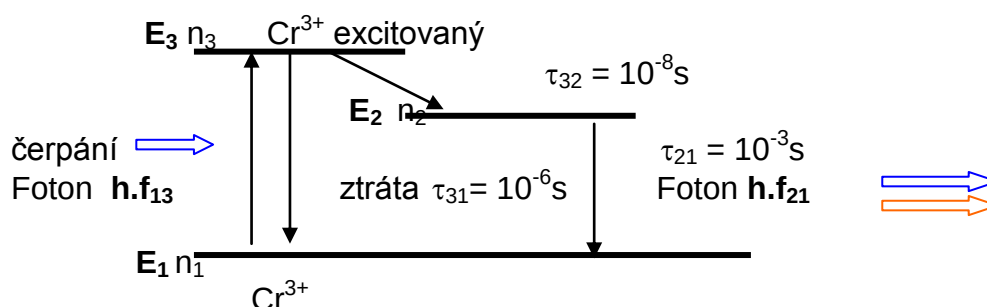
První laserový efekt se podařilo dosáhnout v krystalu syntetického rubínu **Theodoru Maimanovi** v r. 1960. Od té doby pronikají aplikace laseru téměř do všech oblastí lidské činnosti od fyzikálních aplikací, měření délek, medicíny, holografie, přenosu informací až po výkonné lasery ve strojírenství a vojenské technice.

4.1 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY

Princip pevnolátkového laseru lze vysvětlit na rubínovém krystalu dopovaného trojmocnými ionty chrómu, které jsou zabudovány v mřížce oxidu hlinitého. Rubín ozařovaný bílým světlem výbojky absorbuje zelenou a modrou složku světla. Ionť chrómu pohltí kvantum energie odpovídající přechodu z energetické hladiny E_1 na hladinu E_3 . Na této hladině setrvávají excitované ionty jen velmi krátkou dobu a v čase $\tau_{32} = 10^{-8}$ s padají na energetickou hladinu E_2 bez emise světelného záření.

Na střední - metastabilní hladině E_2 setrvávají ionty delší čas $\tau_{21} = 10^{-3}$ s a tím zvyšují obsazení této hladiny. Tento proces přečerpávání iontů se neustále opakuje a dochází k inverzi obsazení hladin, kde počet iontů na hladině E_2 převyší počet iontů na základní hladině. Stimulovaná emise může nastat za podmínky - $N_2 > N_1$.

Při průchodu fotonů s frekvencí f_{21} tímto prostředím, stimulují přechod excitovaných iontů chrómu z energetické hladiny E_2 na hladinu E_1 za současného vyzáření fotonů stejné energie, směru, vlnové délky, polarizace a fáze kmitání jako stimulující záření.



Obr. 4.2 Princip pevnolátkového laseru

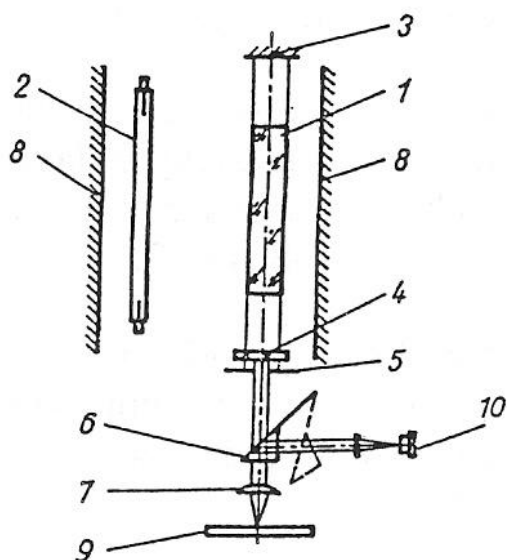
Proces má charakter řetězové reakce a je dále zesilován průchody rezonátorem – aktivním prostředím laseru, které je uzavřeno dvěma zrcadly se vzdáleností rovnající se násobku vlnové délky emitovaného záření. Zrcadlo se 100% odrazivostí vrací všechny fotony do aktivního prostředí, ale polopropustné zrcadlo s 80% až 90% odrazivostí propustí po dosažení kritického množství fotonů část záření ve formě krátkého vysokoenergetického pulsu. Opakovací frekvence současných pevnolátkových laserů se pohybuje mezi 1 až 500 Hz

(laser Nd:YAG může pracovat i v kontinuálním provozu) a celková energie pulsu 0,1 až 200 J.

Tab. 4.1 Druhy pevnolátkových laserů používaných ve svařování

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

Konstrukce laserů na pevné fázi je na obrázku. 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.



- 1- aktivní prostředí (výbrus)
- 2- výbojka
- 3- zrcadlo se 100% odrazivostí
- 4- zrcadlo s odrazivostí 80 – 90%
- 5- clona
- 6- optický hranol
- 7- zaostřovací optika
- 8- eliptická reflexní dutina
- 9- svařovaný materiál
- 10- pozorovací optika

Obr. 4.3 Schéma pevnolátkového laseru

Diodami čepaný Nd:YAG laser

Vývoj v oblasti pevnolátkových laserů směřuje k získání vyšší účinnosti u zdrojů na zesílení záření. U běžných Nd:YAG laserů je čerpání zajištěno kryptonovými výbojkami s bílým světlem, ze kterého je absorbováno jen zelené a modré spektrum. Vlnový rozsah kryptonových výbojek se pohybuje od 0,450 do 0,850 μm , přičemž absorpční rozsah Nd:YAG laseru je 0,790 až 0,830 μm . Účinnost laseru je tedy velmi nízká do 5%.

Zvýšení účinnost čerpání je u nových typů laserů Nd:YAG uskutečněno laserovými diodami, které září ve velmi úzkém spektru absorpční čáry iontů Nd^{3+} .

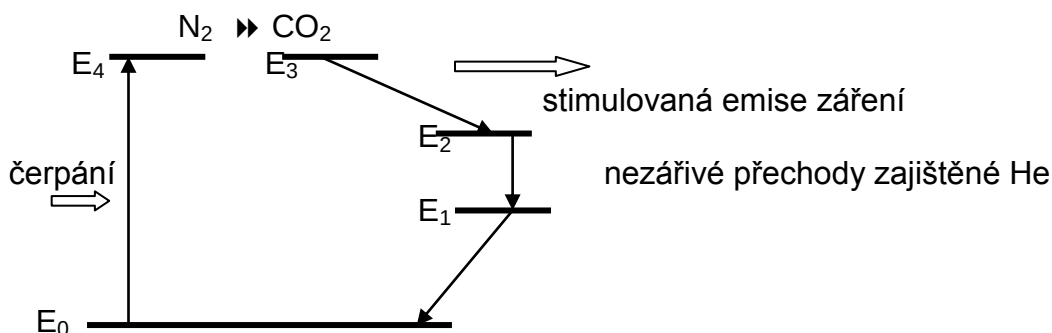
Současné diodami čerpané Nd:YAG lasery používané v průmyslu mají kontinuální výkon až 5kW při účinnosti 30%.

4.2 PLYNOVÝ CO₂ LASER

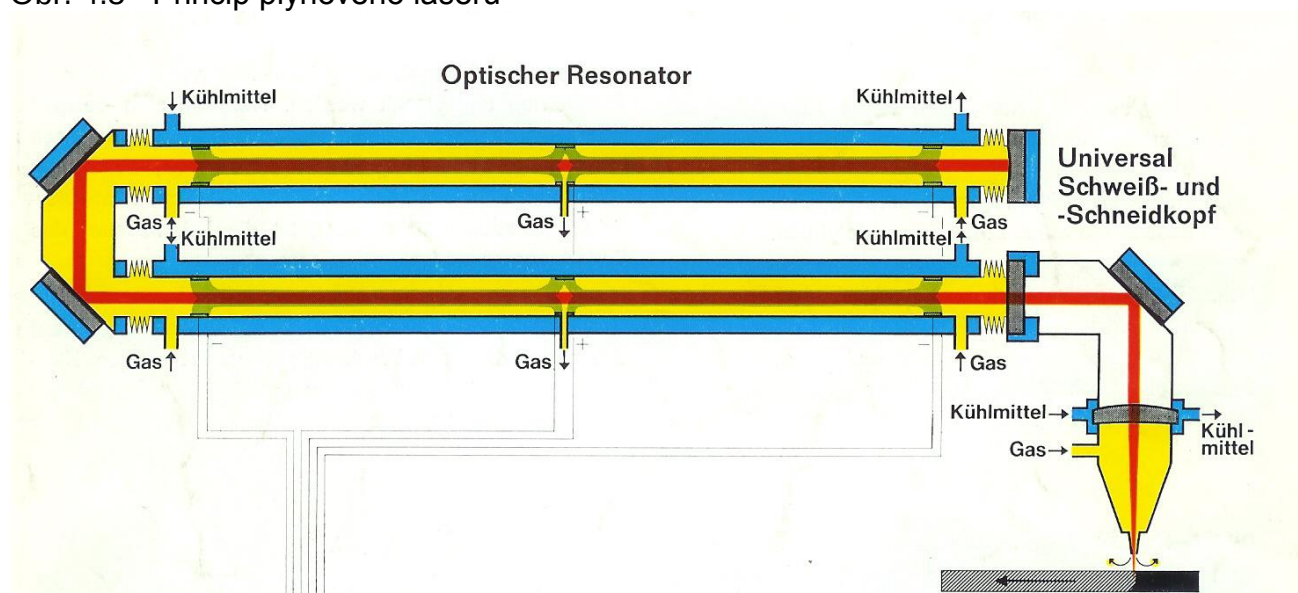
Výkonový plynový CO₂ laser byl vynalezen v r. 1964 M.Patelem a má aktivní prostředí tvořeno směsí plynů : He + N₂ + CO₂ uzavřených ve skleněné trubici. Poměr plynů může být různý, ale nejběžnější je 82 : 13,5 : 4,5. Celý proces zesílení začíná excitací molekuly dusíku na vibrační hladinu E₄. Při srážkách molekul dusíku s molekulami oxidu uhličitého dochází k rezonančnímu přenosu energie a excitaci CO₂ na hladinu E₃. Vyzáření fotonu je realizováno při přechodu molekuly CO₂ z hladiny E₃ na hladinu E₂. Aby nedošlo při kontinuálním vyzařování ke snížení inverze je nutné zajistit návrat molekul CO₂ z hladiny E₂ na základní hladinu E₀. U výkonových plynových laserů se pro návrat molekuly CO₂ do základního stavu používá helium které odnímá oxidu uhličitému excitační energii a díky vysoké tepelné vodivosti ochlazuje aktivní prostředí laseru.

Podle směru proudění plynu v aktivní zóně se lasery rozdělují na typy s podélným prouděním, nejčastěji čerpané doutnavým výbojem a s příčným prouděním plynu s vyšším výkonem čerpané vysokofrekvenčním výbojem.

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



Obr. 4.5 Princip plynového laseru



Obr. 4.6 Schéma plynového a laseru s podélným prouděním

Difúzí chlazený CO₂ planární (slab) laser

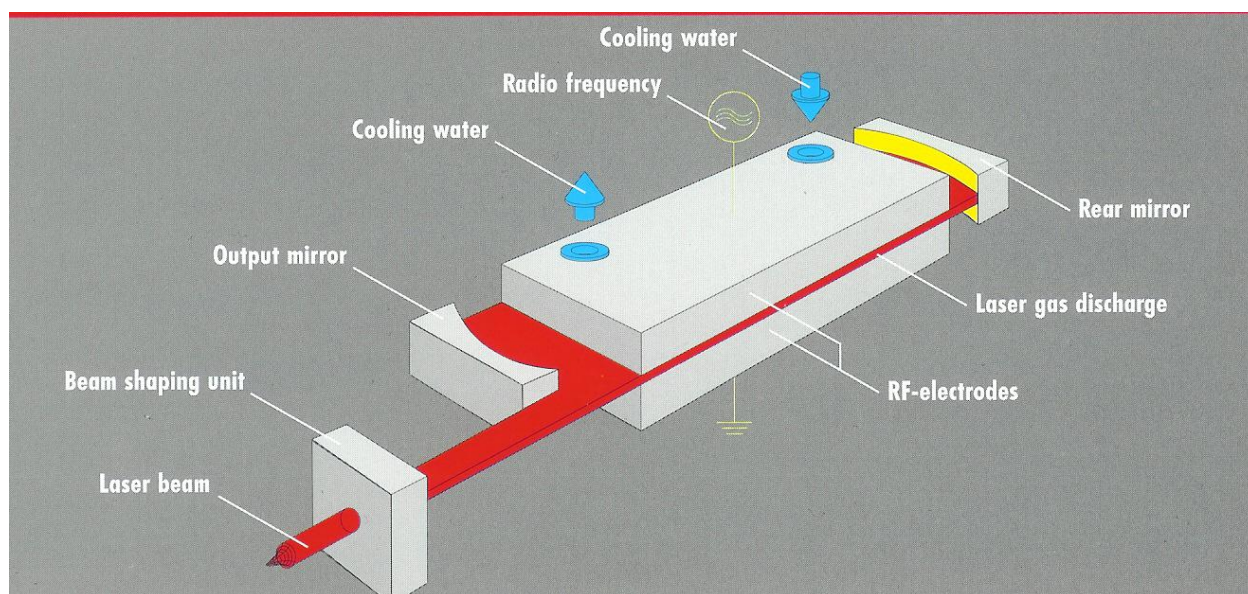
Vývoj plynových laserů je zaměřen na úsporu provozních laserových plynů s vysokou čistotou. Zatímco u klasických laserů je provozní plyn chlazený průchodem přes chladič v nuceném oběhu u nových typů zdrojů je chlazení zajištěno difúzí tepla do deskových měděných elektrod obr. 13.17.

Elektrody mají velkou difúzní plochu a teplo je odváděno procházející vodou, napájenou uzavřeným chladicím okruhem. Protože mezi elektrodami je velmi malá mezera je intenzita chlazení plynu velmi dobrá a není nutné nucené proudění plynu jehož spotřeba je tedy velmi nízká.

Tlaková láhev plyné směsi je dostačující pro roční provoz laseru. Označení nových laserů je odvozeno od plošných zrcadel se sférickou odraznou plochou mezi kterými je dráha fotonů mnohonásobně delší než u klasických zdrojů. Výstupní výkony plošných laserů se pohybují mezi 0,5 až 2,5 kW.

Výhody difúzí chlazených laserů:

- vysoká kompaktnost zdroje
- zdroj s minimem pohyblivých částí
- bez tepelného chladiče na plyn
- vysoká tepelná stabilita
- nízká spotřeba plynu bez nutnosti plynového hospodářství
- bez proudění plynu a tedy kontaminace rezonanční optiky
- nízké provozní náklady
- malé rozměry



Obr. 4.7 Plošný difúzí chlazený CO₂ laser

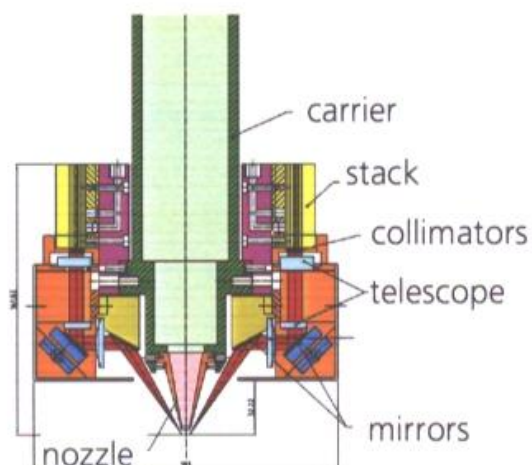
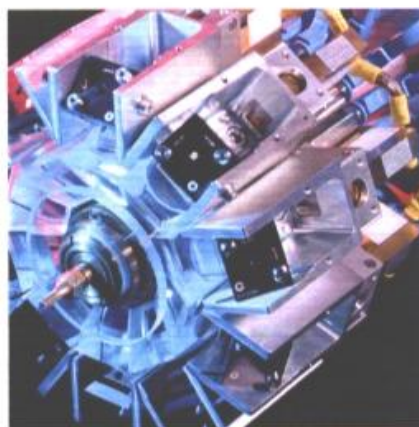
4.3 POLOVODIČOVÉ LASERY

Polovodičové lasery využívají zesílení záření na polovodičových strukturách. Jejich hodnota zesílení vztažená na jednotku objemu aktivního prostředí je až o tři řády větší než u jiných typů laserů. Excitace a generace záření souvisí u polovodičových laserů s tzv. pásovou strukturou jejich energetických hladin. Vzhledem ke konstrukci laseru je tvar výstupního záření obdelníkový, což je tvar nevhodný pro strojírenské aplikace.

Jednou z možných konstrukcí je uspořádání jednotlivých aktivních prostředí do kruhu a fokusace záření vytvoří prstencovou energetickou stopu. Využití tohoto uspořádání je velmi široké



Obr.4.8 Princip a využití polovodičového laseru – vlevo, uspořádání polovodičových laserů do prstencového paprsku- vpravo

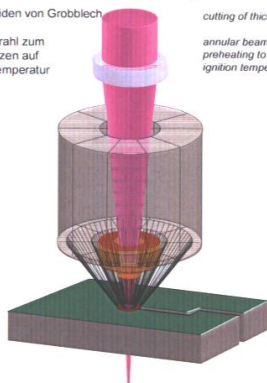


Multifunktionaler Ringstrahl-Diodenlaser Multifunctional Annular Diode Laser Beam Device

Abbrandstabilisiertes Laserstrahlbrennschneiden
burnoff-stabilized laser beam oxygen cutting

Schneiden von Grobblech
cutting of thick plates

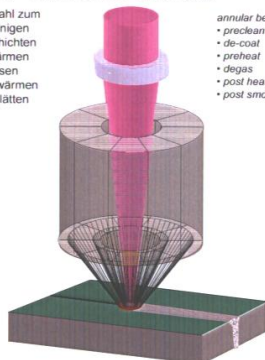
Ringstrahl zum Vorheizen auf Zündtemperatur
annular beam for preheating to ignition temperature



Koaxiales Ring + Zentralstrahl-Hybridschweißen
coaxial ring + central laser beam - hybrid welding

Ringstrahl zum
• Vorreinigen
• Entschichten
• Vorwärmen
• Entgasen
• Nachwärmen
• Nachglätten

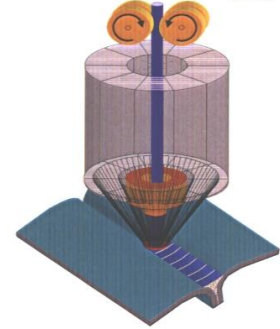
annular beam to
• pre-clean
• de-coat
• pre-heat
• degas
• post heat
• post smooth



Koaxiale Zufuhr von Lot, Schweißdraht oder Pulver
coaxial supply of soldering metal, filler wire or powder

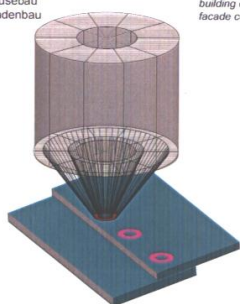
Löten
Schweißen
Beschichten

brazing
welding
cladding



Überlapp-Punktschweißen
overlap spot welding

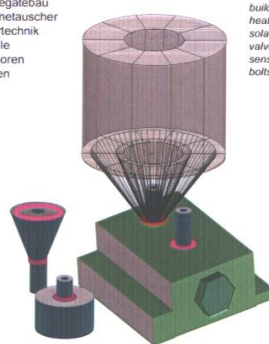
Karosseriebau
Gehäusebau
Fassadenbau



building of bodies
building of housings
facade construction

Verzugfreies axiales und radiales Rundnahtschweißen
axial and radial distortion-free welding of annular seams

Aggregatebau
Wärmetauscher
Sollartechnik
Ventile
Sensoren
Bolzen

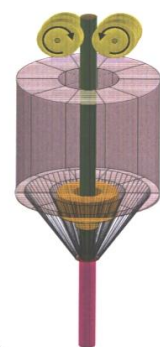


building of aggregates
heat exchanger
solar technology
valves
sensors
bolts

Umfangsbearbeitung von zylindrischen
Lang- und Endlosprodukten

circumferential processing of cylindrical long and endless products

Drähte
Rohre
Kabel



wires
pipes
cables

gefördert durch:
funded by:
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Fraunhofer
Institut
Lasertechnik

Das Laserkonzept mit Durchblick.

MDS
MODULARE DIODENLASER
STRÄHLWERKZEUGE

www.ilt.fraunhofer.de

Obr. 4.9 Příklady použití polovodičového laseru s prstencovým uspořádáním

4.4 INTERAKCE ZÁŘENÍ S MATERIÁLEM

Interakce záření s materiálem je podobná jako u svařování svazkem elektronů, nedochází ale k přeměně kinetické energie na tepelnou. Foton jako kvantum energie přímo zvyšuje frekvenci vibrací mřížky a tím se zvyšuje teplota materiálu. U kovových materiálů vznikají v místě dopadu záření vířivé proudy, které výrazně urychlují tavení materiálu. Energie svazku záření dopadající na povrch se částečně odrazí, pouze část je pohlcena a využita pro ohřev materiálu a velmi malá část materiálem prochází. Absorpce výrazně závisí na teplotě a vlnové délce. Pohlcená část záření proniká do povrchové vrstvy materiálu, přičemž hloubka průniku závisí na výkonu zdroje, vodivosti materiálu a frekvenci záření.

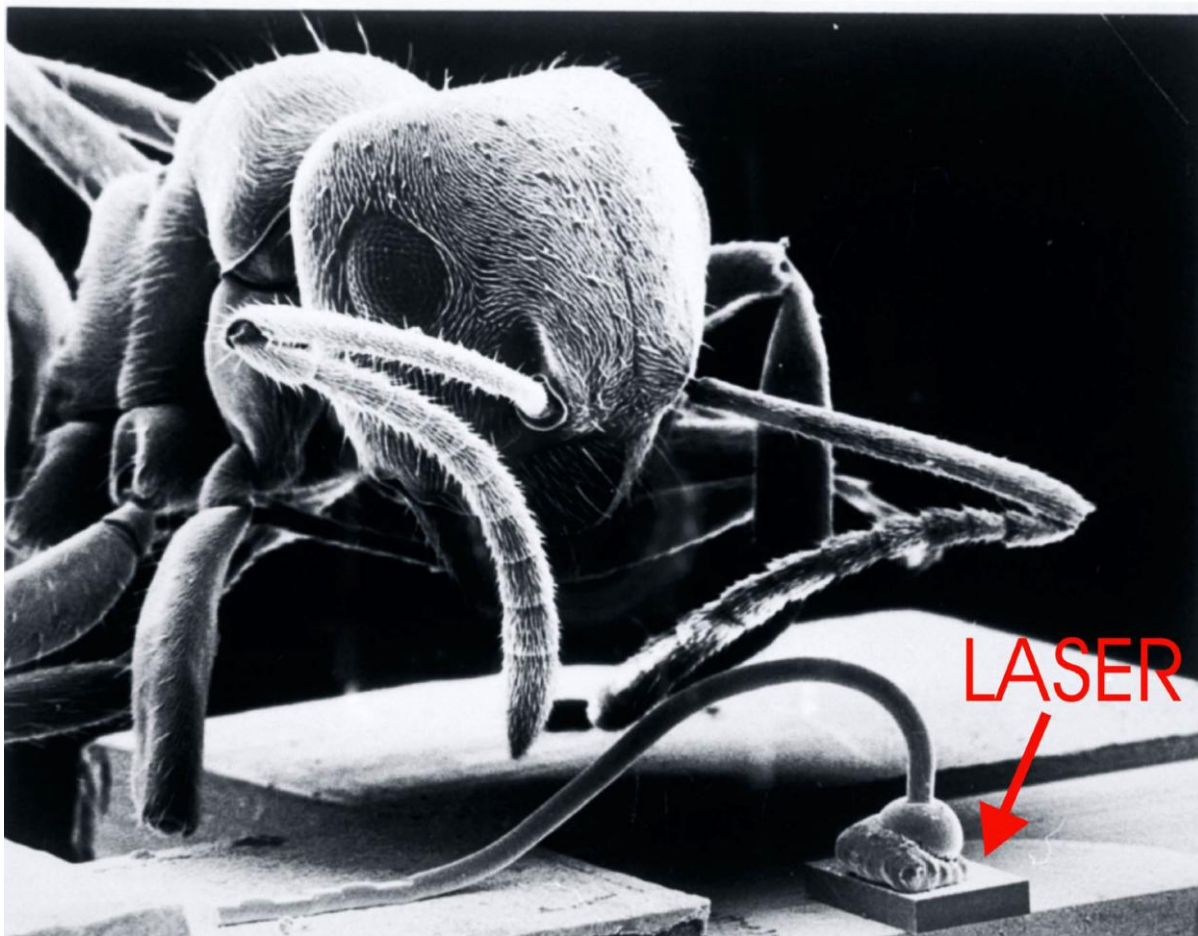
Při pulsním provozu lze svařovat i velmi tenké materiály např. v mikroelektronice svařovacím cyklem kolem 1 ms můžeme spojovat i průměry drátků, případně plíšků řádově v desítkách μm .

Tab. 4.2 Součinitel odrazivosti některých kovů.

Materiál	Vlnová délka λ (μm)		
	0,7	1,06	10,6
Hliník	0,87	0,93	0,97
Chrom	0,56	0,58	0,93
Měď	0,82	0,91	0,98
Nikl	0,68	0,75	0,95
Stříbro	0,95	0,97	0,99
Ocel	0,58	0,63	0,93

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 $10 \mu\text{m}$
- svazek prochází i průhledným prostředím
- laserem se dají svařovat i magnetické materiály.



Obr. 4.10 Ukázka velikosti svaru laserem v oboru elektroniky

4.5 SVAŘOVÁNÍ LASEREM

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.

Vliv indukované plazmy se dá také ovlivnit pomocí nastavených parametrů svařování. Parametry musí být nastavené tak, aby se materiál neodpařoval dokud se neprohřeje do oblasti tavení v podpovrchové vrstvě. Tímto způsobem se vytvoří svarový kráter s příhodným rozložením taveniny. Naopak u řezání při vyšší hustotě energie se podpovrchové vrstvy ohřejí jen minimálně. Většinou se svařuje bez přídavných materiálů, ale vývoj směřuje i k využití drátových přídavných materiálů.

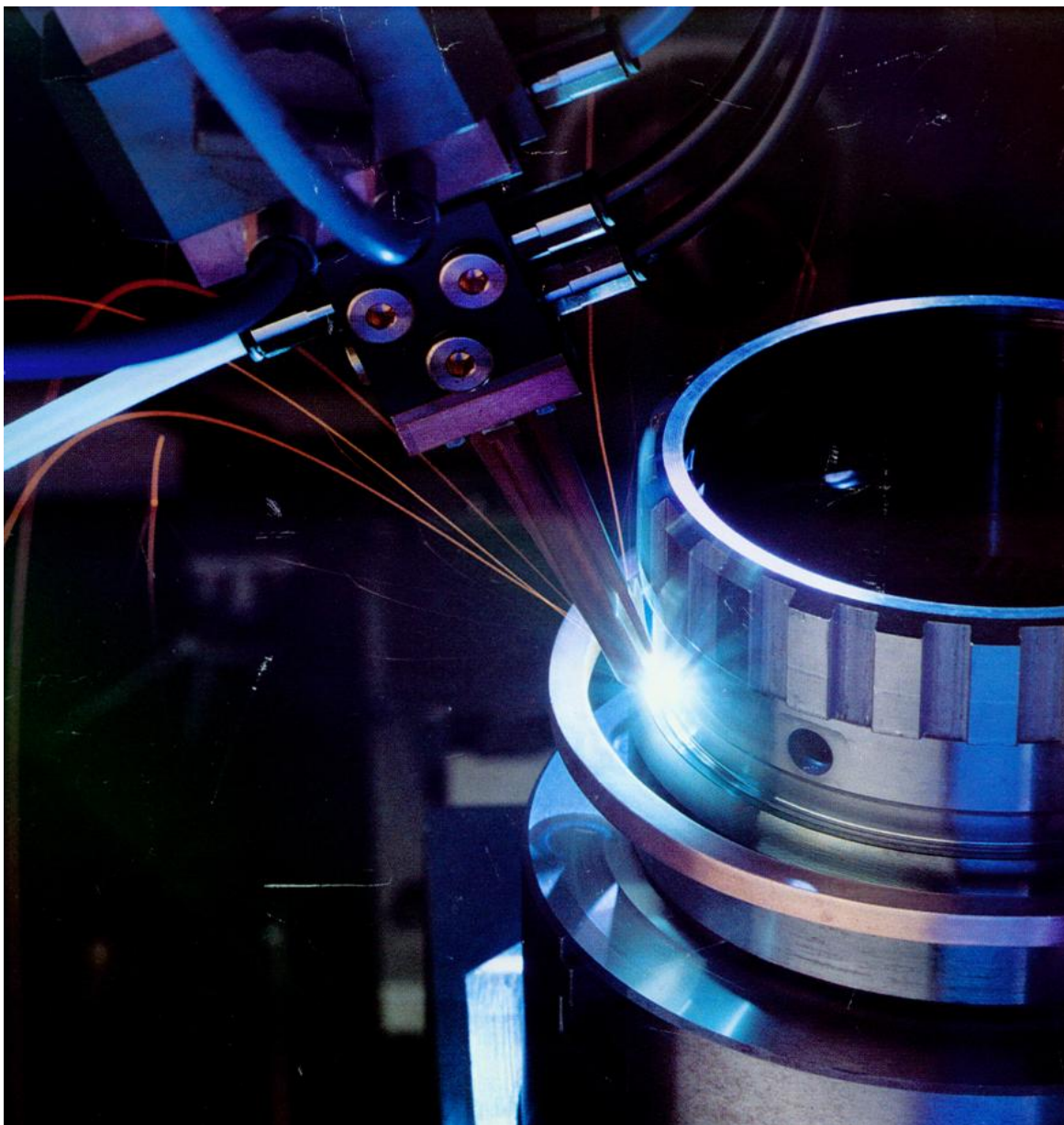
Obecně je svařitelnost materiálů podobná jako u metody WIG. Rychlost ochlazování je díky malému vnesenému teplu vysoká a proto u ocelí nesmí překročit obsah uhlíku hodnotu 0,2%.

Výborné výsledky svařování se dosahují u vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu. 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 10^6 W.cm^2 dochází k přenosu tepla a formování svarové lázně hlavně vedením a je vhodné pro spojování tenkých plechů.



Obr.4.11 Svary laserem hliníkových plechů

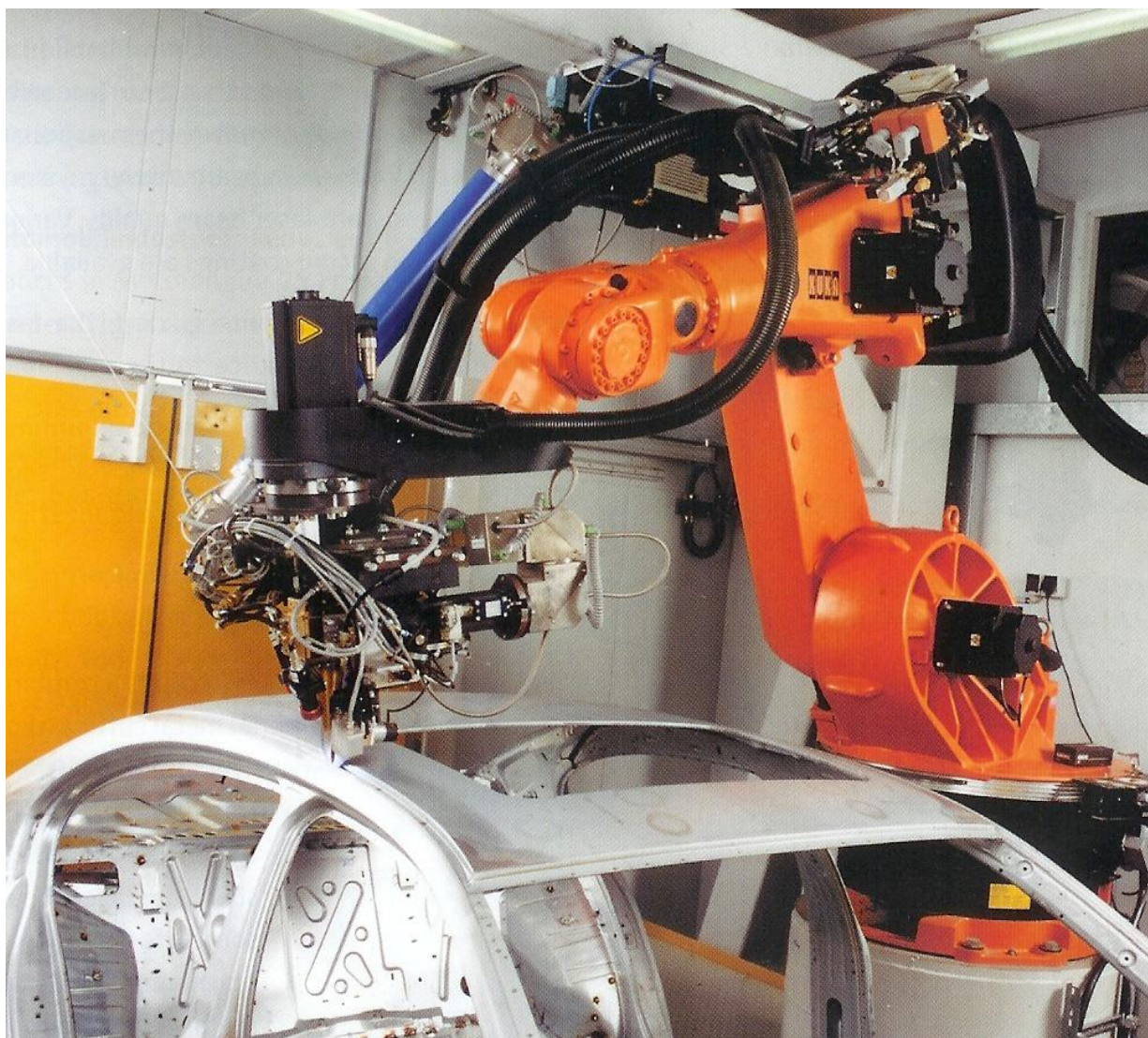


Obr. 4.12 Laserové svařování dílce převodovky s předehřevem materiálu induktorem.

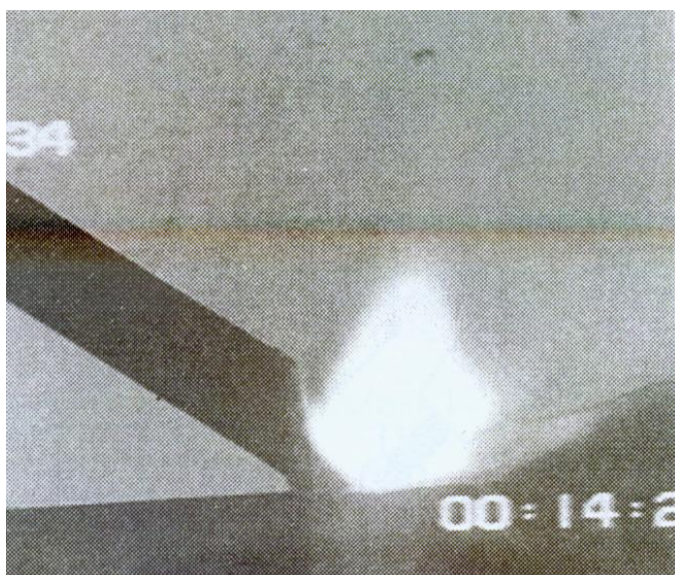
Příprava svarových ploch

Vzhledem k vysoké hustotě energie nejsou na čistotu povrchu svařovaných materiálů kladeny zvláštní požadavky, poněvadž veškeré tuky a nečistoty jsou před natavením svarové lázně odpařeny. Optimální mezera mezi svařovanými materiály je přibližně stejná jako u svazku elektronů a pohybuje se mezi 0,05 až 0,2mm. U tenkých plechů v tisícinách mm.

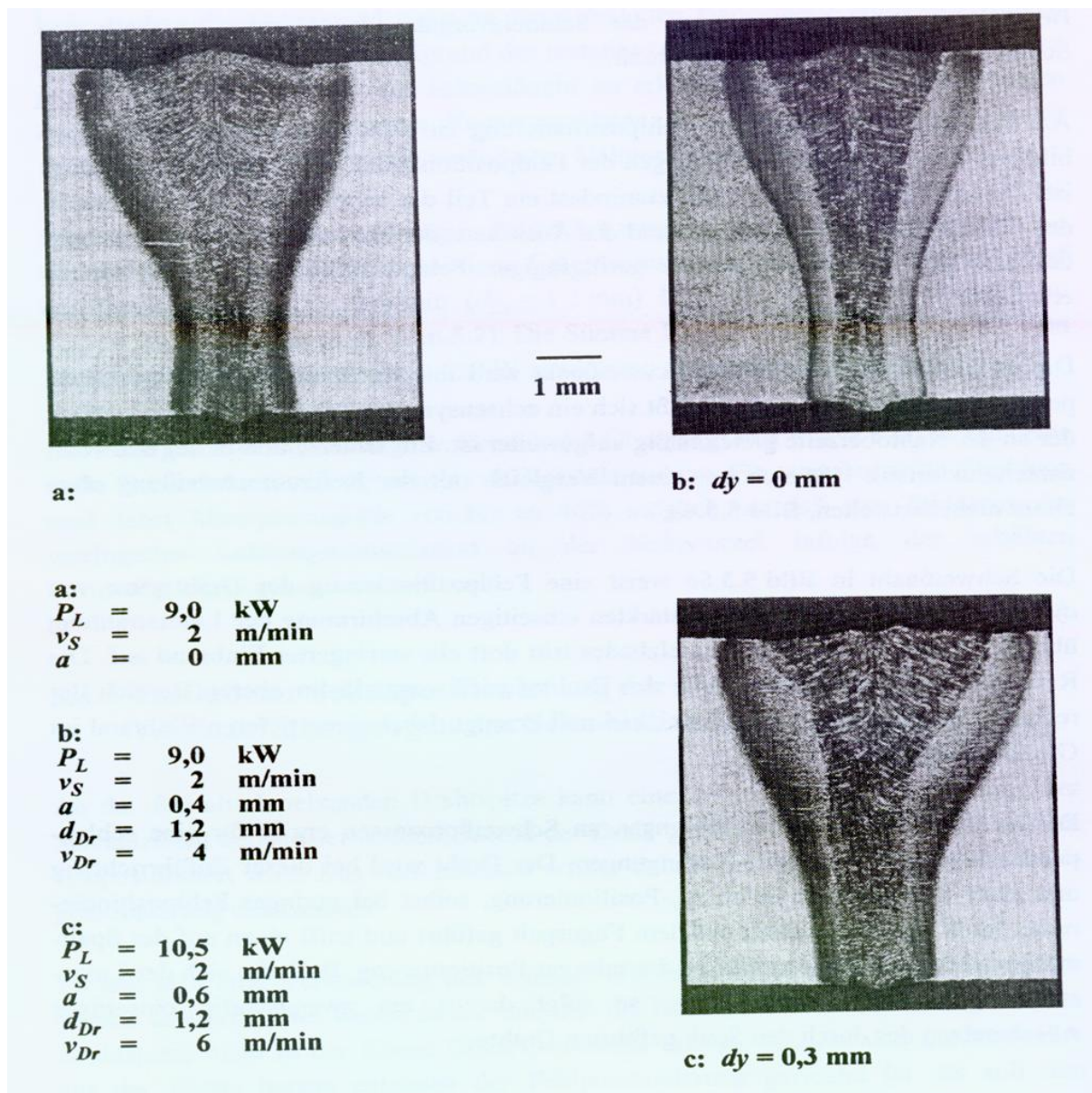
V případě větších mezer a při pájení laserem lze použít přídavný materiál ve formě drátu a překlenout širší mezery.



Obr.4.13 Robotizované svařování karoserie automobilu plynovým laserem



Obr. 4.14 Tavení drátu laserovým zářením



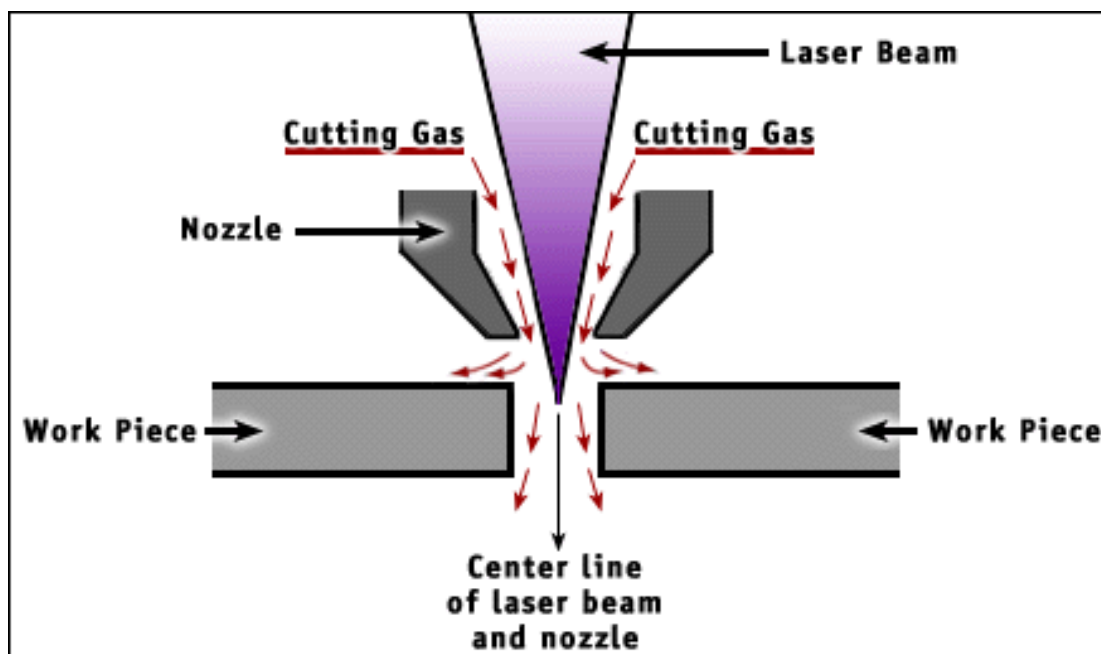
Obr. 4.15 Řezy svarů laserem při různých podmínkách svařování
a) bez drátu mezera 0 mm, b) drát průměr 1,2 mm mezera 0,4 mm,
c) drát 1,2mm mezera 0,6 mm.

Výhody svařování laserem:

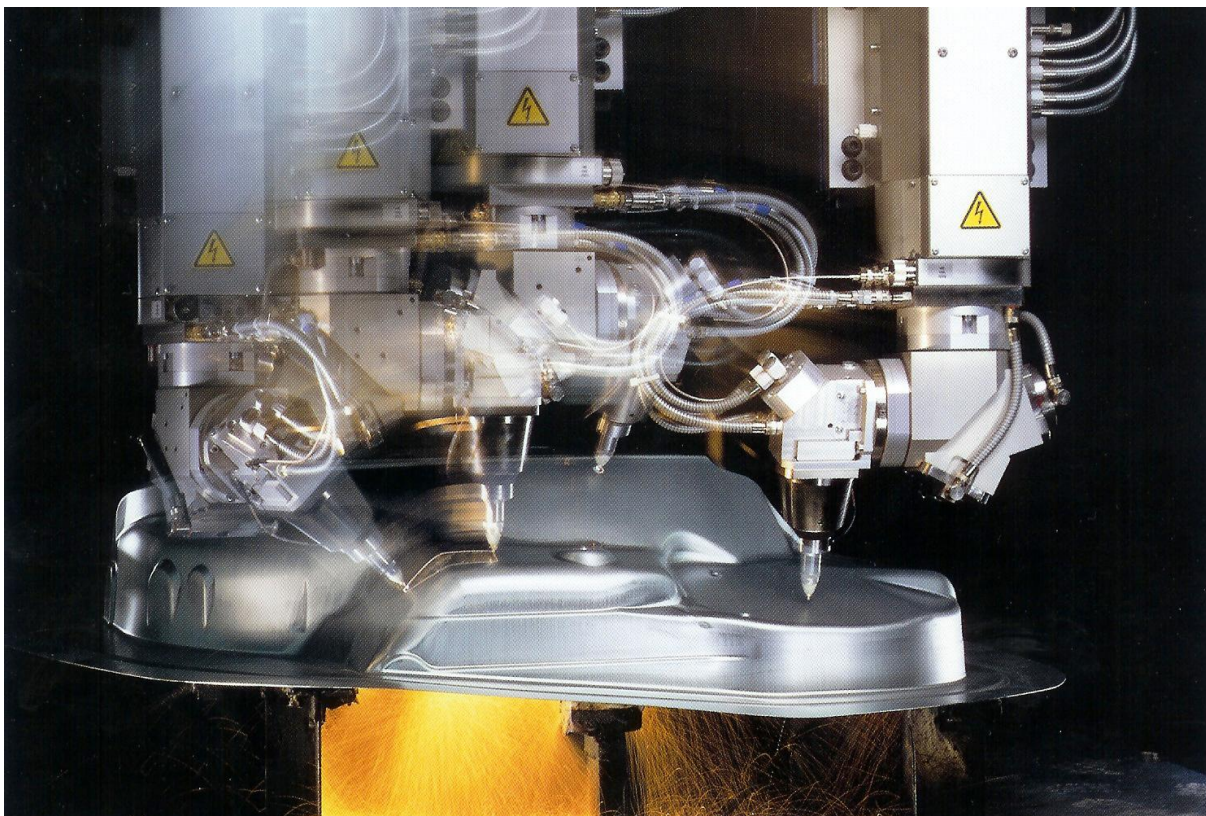
- Lasery jsou adaptabilní s rychlou změnou technologie.
- Provoz laseru je čistý, bez potřeby přídavných materiálů a odpadů. Zplodiny lze snadno a účinně odsávat.
- Vysoká přesnost oblasti ovlivněné laserem.
- Provoz laseru je tichý, hluboko pod hranici hluku konvenčních technologií.
- Laserový svazek lze dělit na různá pracovní místa soustavou zrcadel a hranolů
- Snadná automatizace procesu.
- Možnost svařovat tloušťky od několika mikrometrů do 15 mm.
- Možnost úpravy ohniskové vzdálenosti až na 1,6 m.
- Svařování tenkých plechů v automobilovém průmyslu bez ochranné atmosféry.

4.6 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.



Obr. 4.16 Princip řezání laserem



Obr. 4.17 Rozfázované 3D řezání plynovým laserem

Metody řezání laserem:

a) Sublimační řezání. Při sublimačním řezání pulsní laserový svazek ohřívá materiál na teplotu varu, kdy dochází k intenzivnímu odpařování. V intervalu mezi pulsy je umožněno parám materiálu uniknout mimo kapiláru, nebo jsou odstraněny slabým proudem inertního plynu. Sublimační řezání lze použít pro tenké plechy a používá se především pro řezání a vrtání minerálů.

b) Tavné řezání. Kontinuálním laserovým svazkem se materiál ohřívá na teplotu tavení a proudem neaktivního plynu (N_2) je tavenina vyfouknuta z řezné spáry. Vzhledem k vysokému povrchovému napětí taveniny (vliv šířky spáry, druhu materiálu a použitého plynu) musí být tlak pracovního plynu velmi vysoký – 10 až 15 barů. Vysoký tlak je nutný i pro zabránění ulpívání taveniny na spodní hraně řezu. Povrch řezných ploch je kovově lesklý, bez oxidů i charakteristického oxidického zbarvení. Protože absorpce laserového záření je u tohoto způsobu řezání velmi nízká a dodatečné teplo v řezu nevzniká je celý proces řezání poměrně pomalý. Řezná rychlost roste lineárně s výkonem laseru a klesá s tloušťkou materiálu.

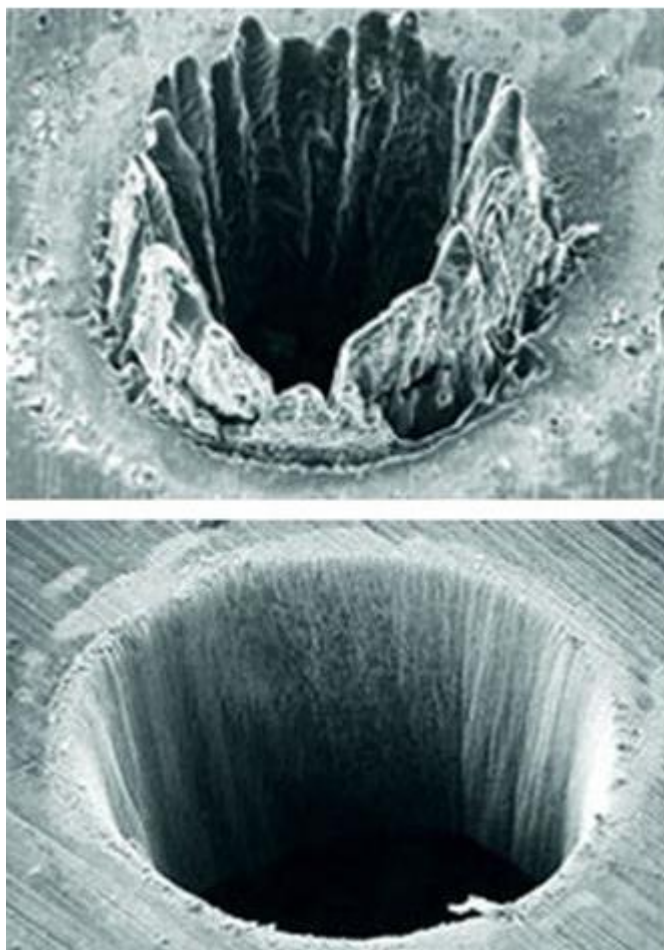
Tavné řezání se používá pro vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl a jejich slitiny i nekovové materiály jako je keramika, plexisklo, dřevo, atd.

c) 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. Teoreticky je tedy ohřev laserem nutný jen do této reakční teploty. V praxi se teplo uvolněné exotermickou reakcí využívá k intenzivnímu předehřevu okolí řezu a ohřevu vzniklé taveniny a oxidů. Při oxidačním řezání je řezná rychlost i tloušťka řezu výrazně vyšší než u tavného.

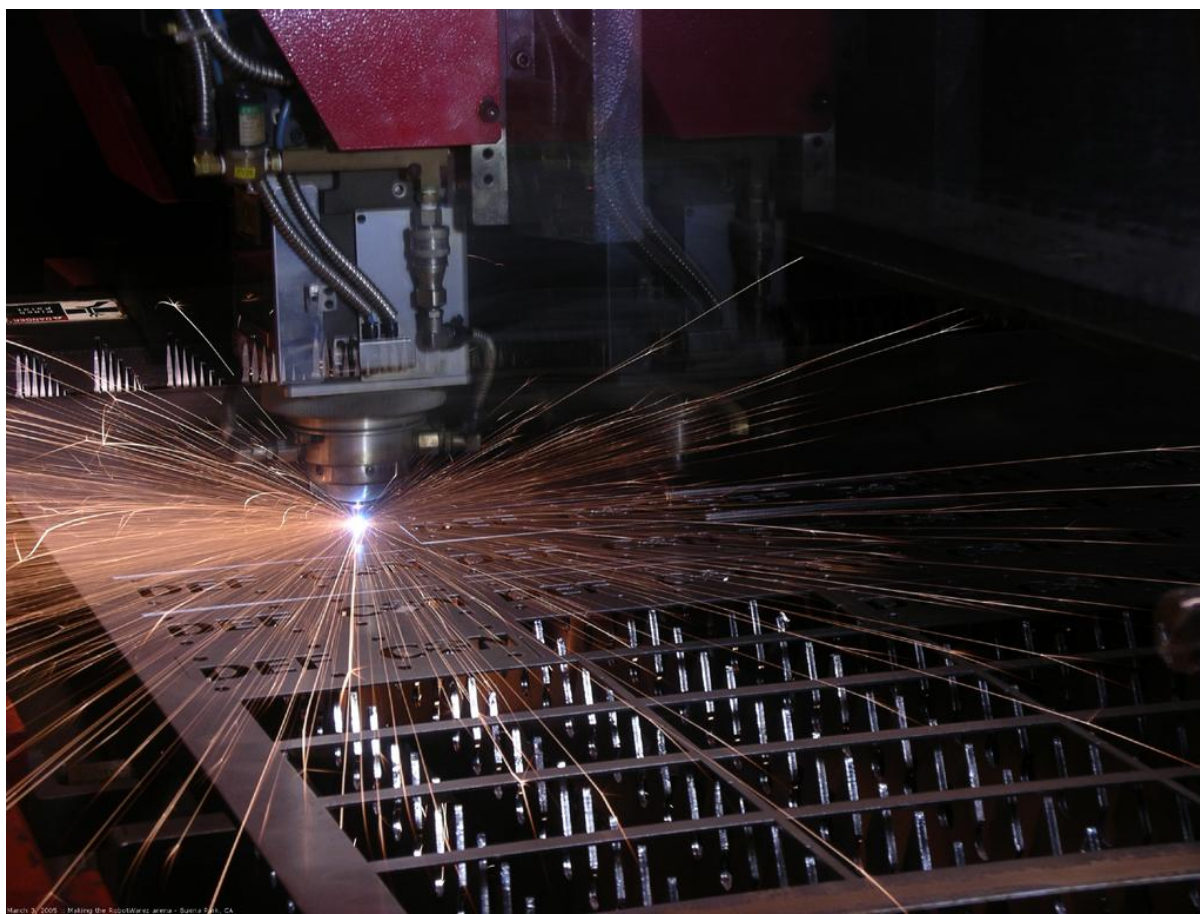
Oxidační řezání se využívá pro nelegovanou až středně legovanou ocel, poněvadž u ostatních kovů kyslík způsobuje výraznou oxidaci řezných hran. U nelegovaných ocelí je řezná plocha hladká s tenkou vrstvou oxidů.

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.



Obr. 4.18 Ukázka mikrovrtání laserem – konstantní(nahoře) pulsní (dole) výkon

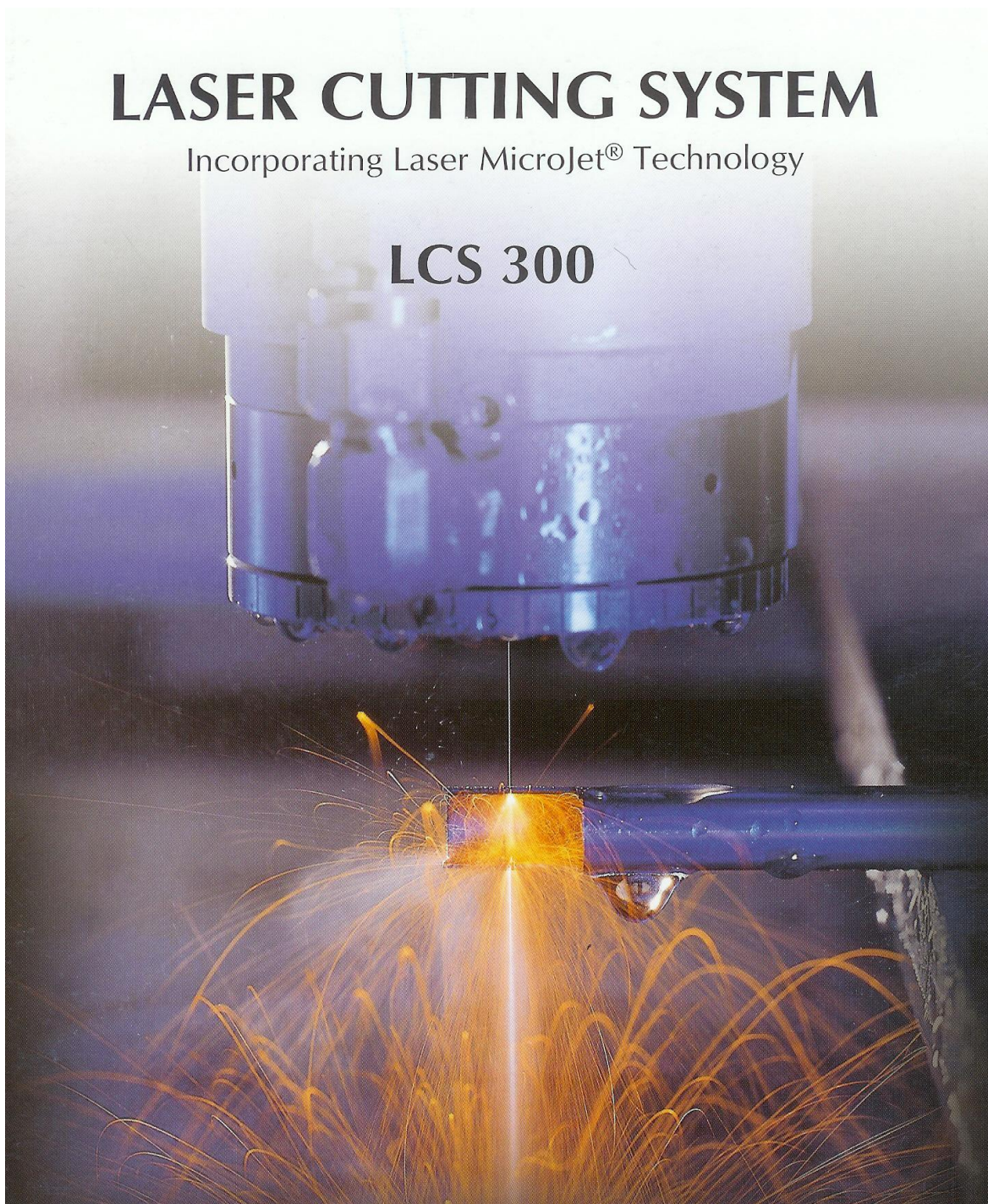


Obr. 4.19 Řezání 2D laserem

LASER CUTTING SYSTEM

Incorporating Laser MicroJet® Technology

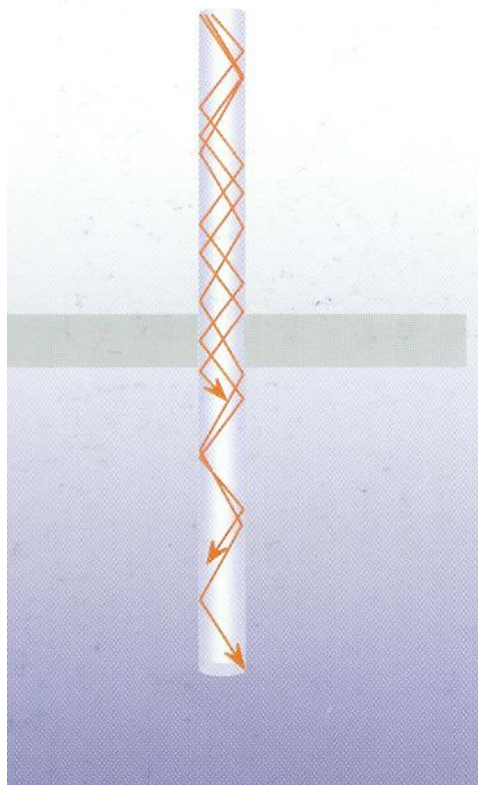
LCS 300



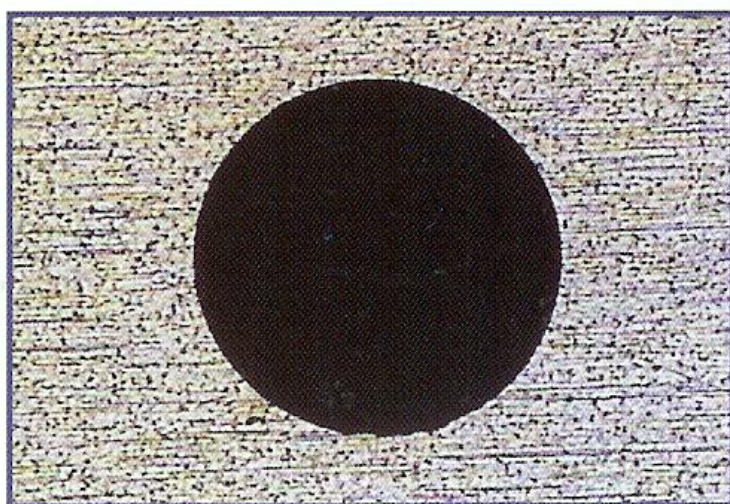
Obr. 4.20 Kombinace řezání laserem a vodním paprskem

Kombinace řezání vodním paprskem a laserem

Nejmodernější způsob řezání laserem v kombinaci s vodním paprskem. Paprsek vody o tlaku až 500 barů je kombinován s pevnolátkovým Nd YAG laserem o optickém výkonu 200W. S přesností polohování 0,0001mm je tento kombinovaný systém využíván na zpracování materiálů v oblasti elektroniky, medicíny, automobilového průmyslu, polovodičů, nástrojů a energetiky.

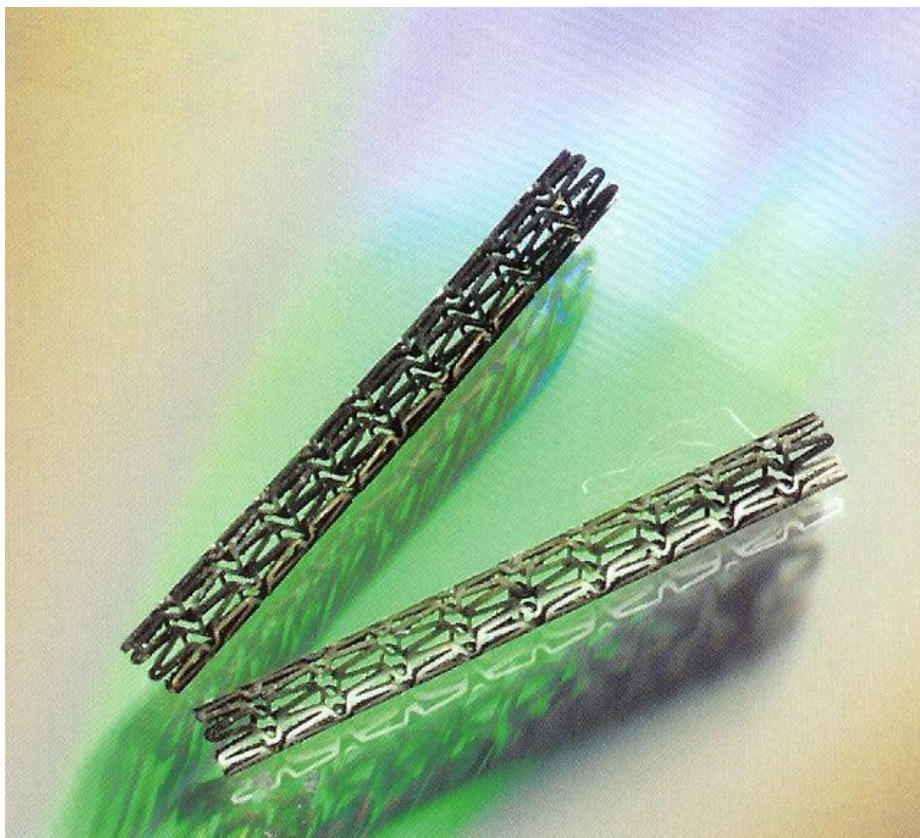


Obr. 4.21 Vedení záření laseru pomocí vodního paprsku



500 micron wide hole drilled in
150 micron thick stainless steel

Obr.4.22 Ukázka možností řezání kombinace laseru a vodního paprsku - otvor průměru 0,5 mm ve folii nerezavějící oceli tloušťky 0,15 mm



Obr. 4.23 Stenty pro koronární angioplastiku (kovová výztuž koronárních srdečních tepen) řezané laserem

Bezpečnost a ochrana zdraví

Při práci s laserem je nutno vyvarovat se přímému zásahu záření i malé energie. Oko jako nejvíce exponované místo na těle je citlivé i na velmi malou energii například odraženého paprsku. Poškození oka je podobné jako záření gama a projevuje se poškozením rohovky, čočky a cévní soustavy oka, kde hrozí nebezpečí trombózy. Velmi citlivá je také pokožka kde stupeň poškození závisí na délce expozice záření, vlnové délce, výkonu, fokusaci v místě dopadu, pigmentaci atd. Ochranu oka je nutno zajistit ochrannými brýlemi z organického skla na které je nanесena zrcadlová vrstva max. nepropustná pro vlnovou délku použitého záření. Ochranu pokožky vhodným oděvem a rukavicemi.

Velmi vhodná ochrana je zajištěna při použití krytování místa svařování nebo řezání kryty z organického skla.

Lasery se dle výkonu a vlnové délky záření dělí na čtyři stupně, přičemž nejnebezpečnější je třída 4. ve které jsou průmyslové lasery zařazeny.

5. TLAKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

Mezi speciální 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). U svařování elektrickým odporem a třením teplo vzniká na kontaktních plochách přeměnou z elektrické, případně mechanické energie.

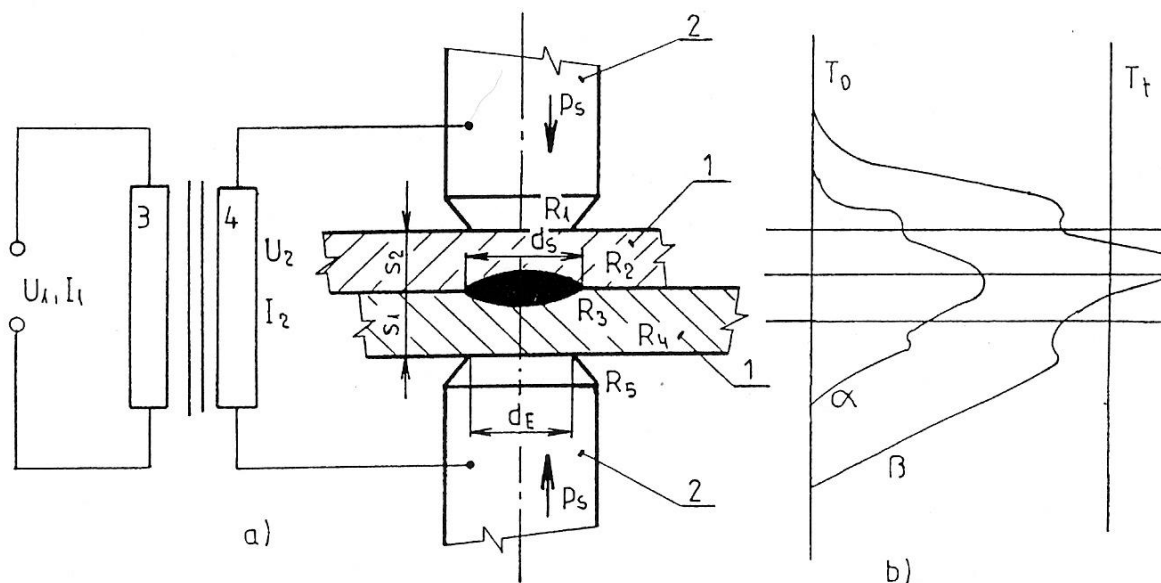
Ve svarech nevzniká lící struktura jako u tavného svařování se všemi nevýhodami a důsledky:

- a) hrubozrná struktura s možností dendritického i objemového odmíšení,
- b) vznik trhlin za tepla,
- c) možnost vzniku intermetalických sloučenin při svařování různorodých materiálů,
- d) u metod s vysokou hodnotou vneseného tepla vzniká široká TOO,
- e) propal prvků, pórovitost a bublinatost.

Tvorba svaru tlakovým svařováním vyžaduje určitou minimální plasticitu spojovaných materiálů a současný průběh difúzních pochodů. Z těchto důvodů se nejlépe svařují materiály s kubickou plošně centrovanou mřížkou jako např. Cu, Al, Ni, γ Fe atd. U některých metod se spoj deformuje minimálně – pouze mikrodeformace na svarových plochách (difúzní a ultrazvukové svařování) a můžeme svařovat součást s konečným opracováním tvaru, některé metody vykazují vysoký stupeň deformace (svař. třením, tlakem za studena a výbuchem) a s výrazným přídavkem na svařování je nutno při návrhu svaru počítat.

6. SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM ODPOREM

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



a) schéma uspořádání

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

Schéma odporového bodového svařování

1 - svařované materiály,

2 - svařovací elektrody,

3 - primární vinutí transformátoru, 4 - sekundární vinutí transformátoru

Obr. 6.1 Princip svařování elektrickým odporem

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

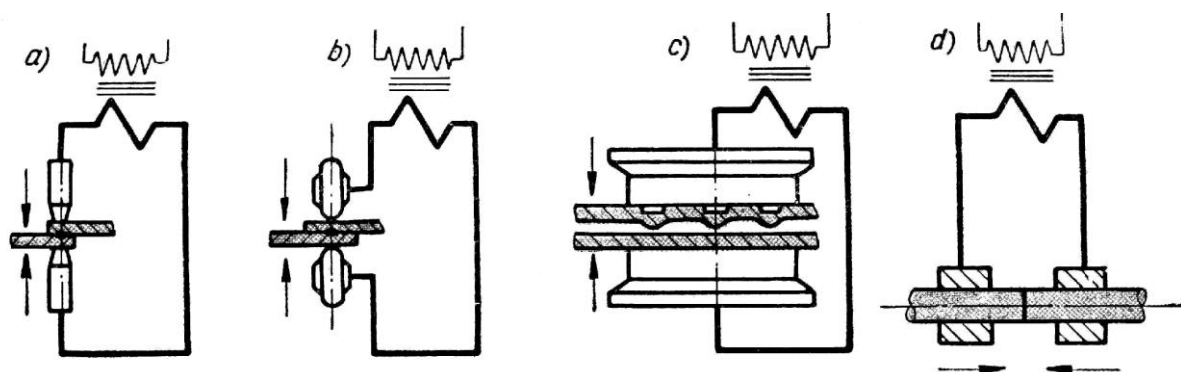
$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

kde - Q je množství tepla v J

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

I - proud v A

t - doba průchodu proudem v s



a) bodové odporové svařování

b) švové odporové svařování

c) výstupkové odporové svařování

d) stykové odporové svařování

Obr. 6.2 Čtyři hlavní druhy odporového svařování

6.1. PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ

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

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

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

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

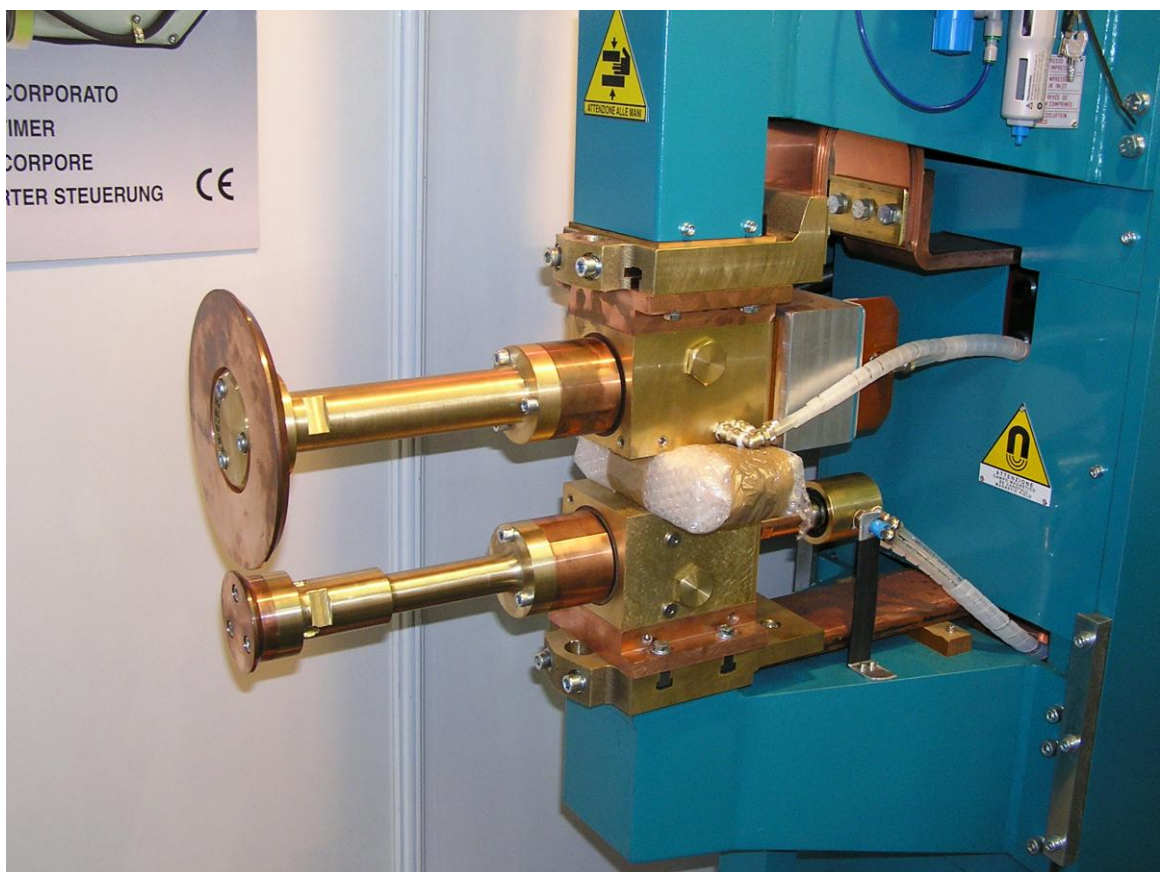
- a) vyžaduje stroje velkých příkonů a silnějších konstrukcí (např. závěsné odporové stroje musí mít vyvažovače),
- b) vyžaduje dobrou energetickou situaci v podniku.



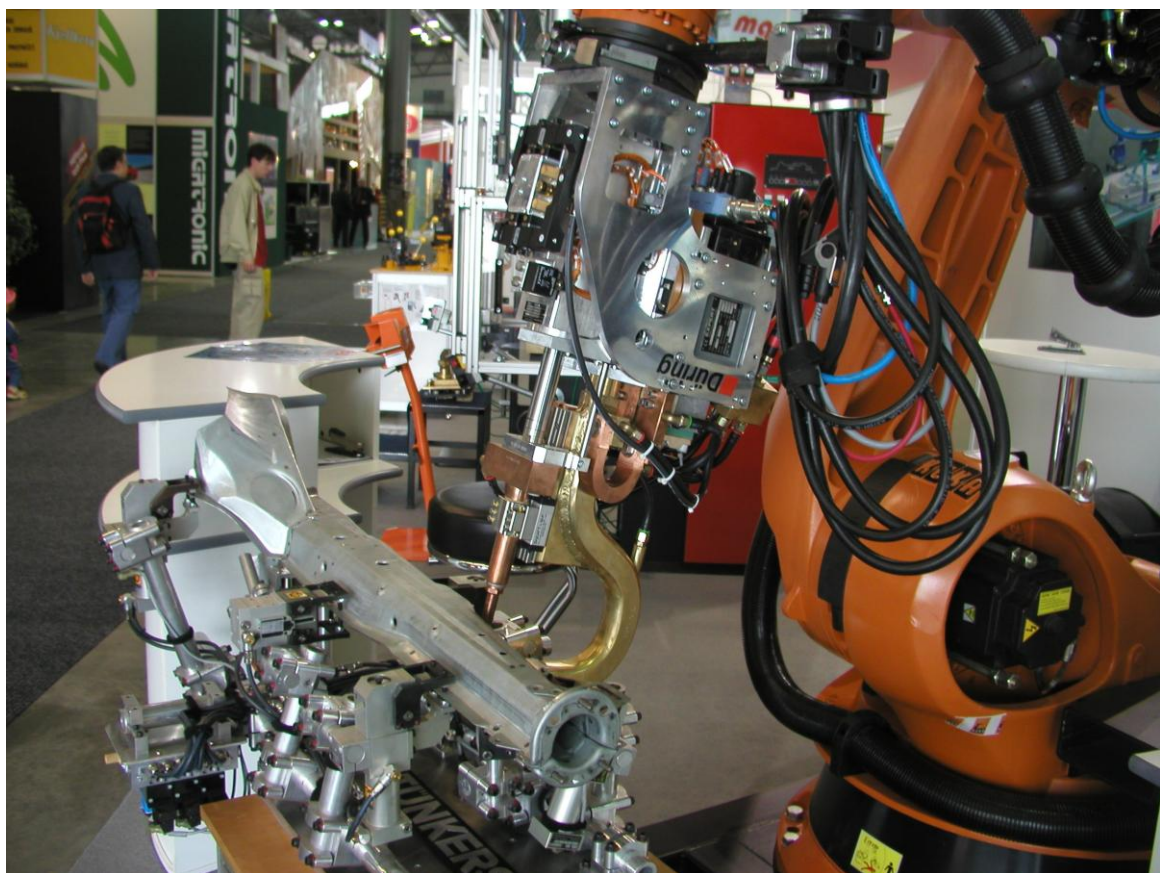
Obr. 6.3 Zařízení pro bodové svařování

Využití odporového svařování.

Nejvýznamější 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, výroby kovového nábytku atd. Švové svařování těsnící se využívá pro svařování plechových radiátorů a nádrží. Svařování na lisech se používá pro svařování strojních součástí, sít, pletiva, mříží a z domácností je významná aplikace svařování drátěného programu pro kuchyňské a koupelnové vybavení.

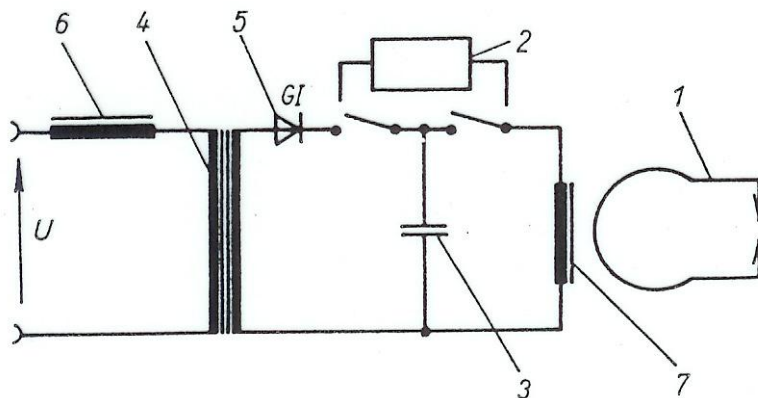


Obr. 6.4 Zařízení pro švové svařování



Obr. 6.5 Ukázka robotizovaného odporového svařování

Ultrapulsní odporové svařování je založeno na transformaci vysokonapěťového impulsu získaného z baterie kondenzátorů. Výsledná intenzita proudového impulsu se pohybuje mezi 100 až 250kA v časovém intervalu 1 až 12 ms. Tvorba svaru je charakteristická přesně řízenou přitlačnou silou v rozmezí 8 až 18 kN. Schéma zařízení je na obrázku.



Obr. 6.6 Schéma zapojení svařovacích ultrapulsních zdrojů

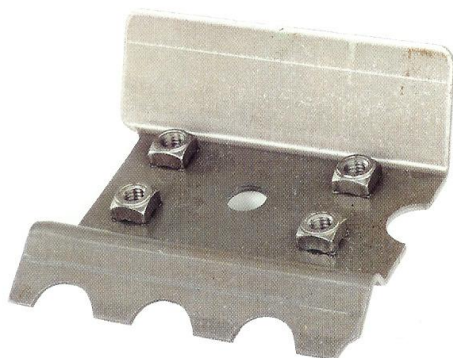
1- svařovací okruh, 2- řízení cyklu, 3- kondenzátorová baterie, 4- vysokonapěťový transformátor, 5- usměrňovač, 6- tlumivka, 7- impulsní transformátor.

Ultrapulsní odporové svařování se vyznačuje velmi malými deformacemi svařovaných spojů, minimálním tepelným ovlivněním základního materiálu. Lze svařovat velmi široký sortiment stejnorodých i různorodých materiálů s vysokou pevností spojů.

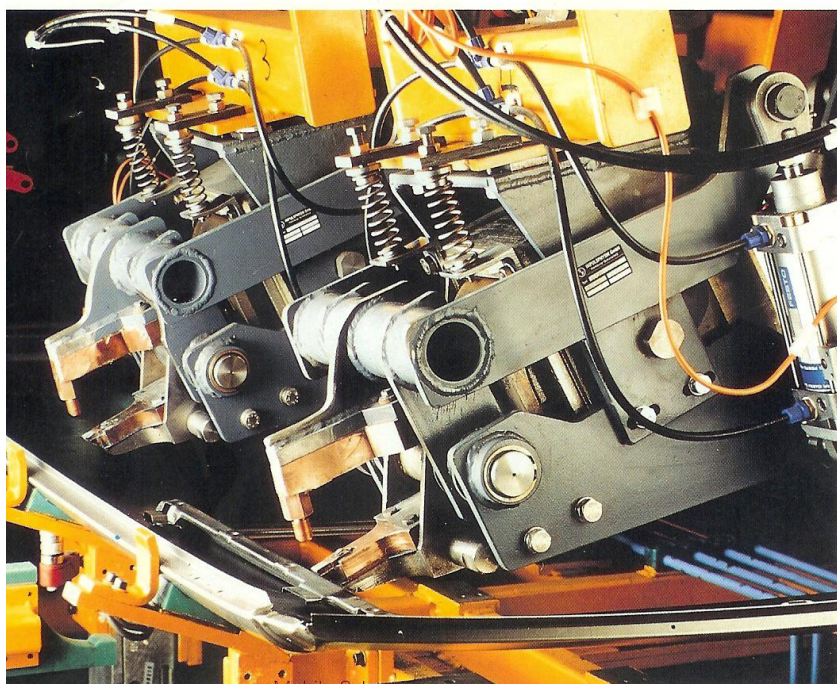


Aufnahmetopf mit Gegenlager zur Motorblockdämpfung

Hutmutter auf
Halteblech



Doppelhebel



Mitnehmer aus Getriebeteil

Obr. 6.7 Ukázka zařízení a aplikací při ultrapulsním svařování

7. TŘECÍ SVAŘOVÁNÍ

Začátek třecího svařování je datován do 50. let minulého století a výrazné nasazení do hromadné výroby začalo po roce 1970.

Základní princip svařování třením je založen na vzájemném pohybu dvou součástí při působení přítláčivé 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 přítláčivá síla, která dává vzniknout třecím silám. Přiváděná mechanická energie se mění na tepelnou při značně vysoké účinnosti. Vysokým měrným tlakem se oba povrchy nejprve zarovnávají, deformují a posléze nastane hluboké vytrhávání povrchu při vzniku a zániku mikrosvarů, silný ohřev (až 90% všeho uvolněného tepla) a výrazná délková deformace. Současně dochází k tvorbě charakteristického výronku.

Při svařování jde o tzv. mechanicko - molekulární jevy tření, kdy se současně rozrušuje vrstva oxidů a zabraňuje jejich opětovné tvorbě. V době fáze intenzivního tření se na dotkových plochách a v úzké zóně kolem dosahuje vysoká teplota cca 80 – 85% teploty tavení (pro ocel 1200 – 1300° C). Vlastní spoj vzniká ve velmi krátké době při závěrečném přechování, které je spojeno s větší deformací. Podmínkou vzniku kvalitního spoje je udržení maximální teploty na stykových plochách pod teplotou tavení kovu.

Součinitel tření závisí při svařování na materiálu, velikosti tlaku a otáčkách. Teplota ve středu svařovaného průřezu je vzhledem k minimální vzájemné rychlosti nízká a při určitých parametrech svařování zde může vzniknout studený spoj. Základní veličiny procesu – otáčky, třecí tlak a čas zabezpečují vhodné teplotní pole a ohřev spoje.

Kvalitu spoje výrazně ovlivňují metalurgické podmínky na stykové ploše, přechovací tlak a velikost spěchování. Pro ocel se doporučuje 20% zkrácení při plném průřezu a 50% tloušťky stěny při svařování trubkových konstrukcí.

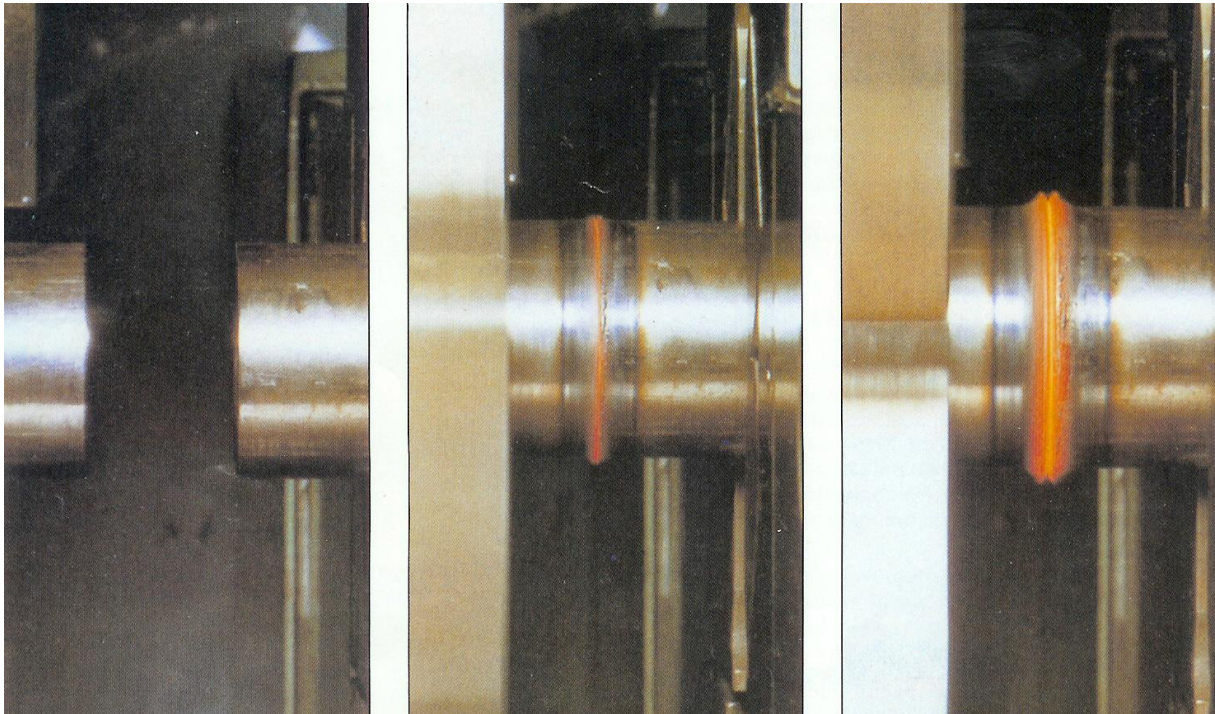
Vznik svarového spoje je vysvětlován těmito pochody :

- spojení nastává působením plastické deformace v důsledku tečení povrchových vrstev kovu,
- tvorba svaru je dána vznikem nových vazeb mezi atomy v krystalových mřížkách a v důsledku toho vznikem společných zrn spojovaných materiálů,
- tvorba spoje je dána průběhem vzájemného difuzního pohybu atomů do hloubky materiálu
- tepelná a mechanická aktivace atomů vede k dosažení určité kritické hodnoty a vzniku vzájemných chemických vazeb.

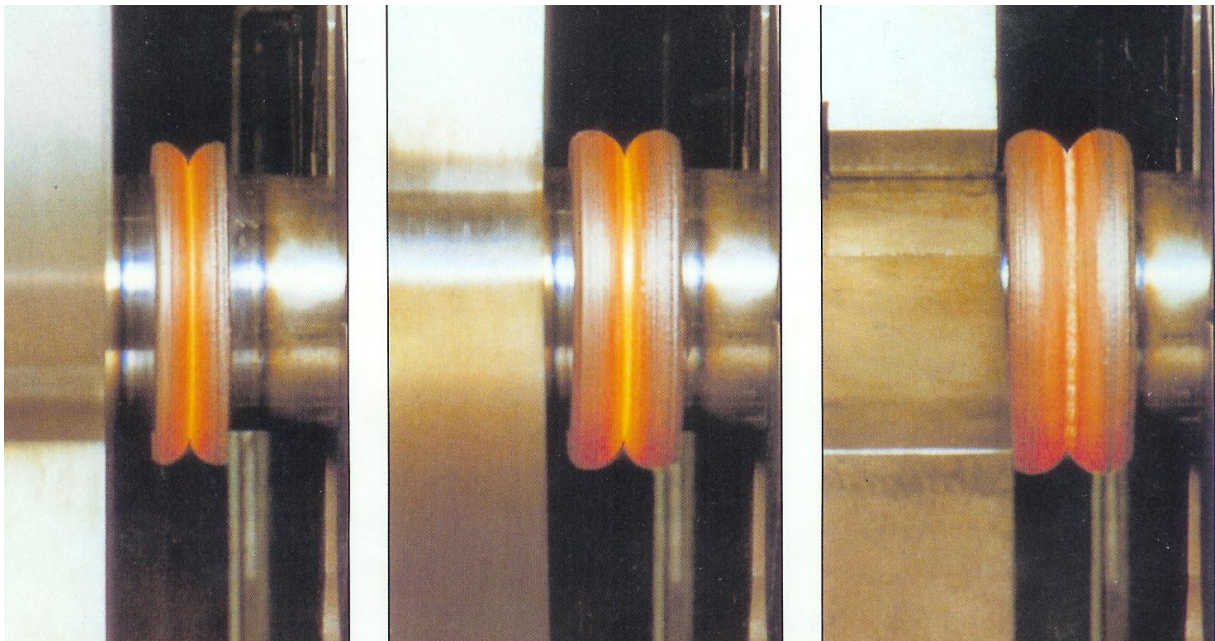
V současnosti jsou známy dva základní způsoby svařování třením:

- a) svařování s přímým pohonem – konvenční
- b) svařování s akumulovanou energií – setrvačnickové

Charakteristické průběhy hlavních parametrů třecího svařování je na obrázku. Vysoká kvalita spoje je dosažena velmi krátkou dobou svařování a úzkou tepelně ovlivněnou oblastí.



a)	b)	c)
a) Začátek svařování – jedna součást je pevně upnuta a druhá rotuje.	b) Počáteční kontakt svarových ploch při zatížení axiální silou.	c) Dosažení svařovacího tlaku

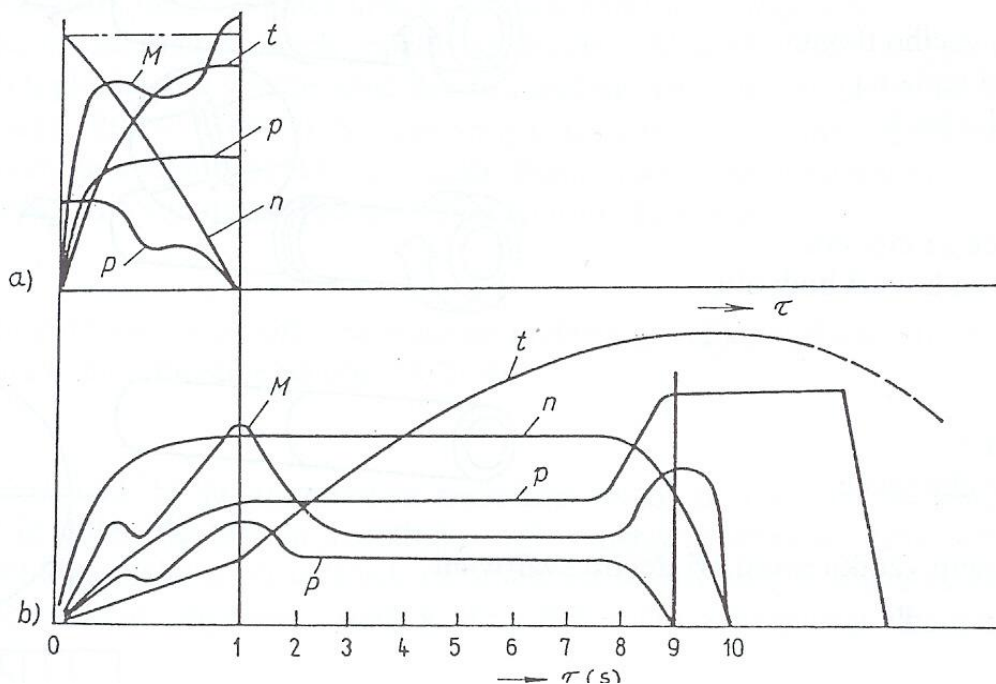


d) Výrazný vývoj tepla na kontaktních plochách

e) Teplota na kontaktní ploše dosahuje až 75% teploty tavení

f) Zastavení rotace se zvýšení měrného tlaku na kovací hodnotu.

Obr. 7.1 Princip vzniku svaru při třecím svařování



Obr. 7.2 Charakteristický průběh hlavních parametrů při svařování třením

a) setrvačnickové svařování b) konvenční svařování

t – teplota, M – třecí moment, p – svařovací tlak, n- otáčky, τ - svařovací čas, P – tepelný výkon

7.1 KONVENČNÍ ZPŮSOB TŘECÍHO SVAŘOVÁNÍ

Při konvenčním způsobu svařování je rotace svařované součásti zajištěna přímým pohonem od motoru přes převodovku a spojku. Hlavním znakem uvedeného způsobu jsou konstantní otáčky po celou dobu ohřívacího cyklu a dvě úrovně měrného tlaku. Počet otáček závisí na průměru, druhu a plasticitě svařovaného materiálu, přičemž jejich rozsah je v rozmezí 500 až 5000 min^{-1} . Zvyšování relativní rychlosti vede k rychlejšímu ohřevu a tím snížení úbytku materiálu do výronku i zmenšení tepelně ovlivněné oblasti.

Relativní rychlost pohybu při třecím svařování se pohybuje obvykle v rozmezí 0,6 až 6 m.s^{-1} .

Podle některých autorů se pro nízkouhlíkovou ocel doporučují rychlosti 0,6 – 4 m.s^{-1} , pro materiály s nízkou tepelnou vodivostí 0,5 – 1,5 m.s^{-1} a pro materiály s vysokou tep. vodivostí kolem 7,5 m.s^{-1} .

Vhodné otáčky lze určit ze vztahů:

ocel	$n.d = (1,2 - 6,0) \text{ m.s}^{-1}$
měď	$n.d = (4,0 - 4,5) \text{ m.s}^{-1}$
titan	$n.d = (8,0 - 10,0) \text{ m.s}^{-1}$

Měrný tlak má u konvenčního svařování dvě hodnoty: **Třecí tlak** je konstantní v průběhu rotace součásti a zajišťuje ohřev svařované plochy, tvorbu výronku, čistící procesy. Jeho nízká hodnota prodlužuje dobu svařování a vysoká hodnota třecího tlaku vytlačuje plastický kov z místa svaru a hrozí nebezpečí vzniku studeného spoje.

Kovací tlak působí po zastavení rotace a zajišťuje vznik vlastního svaru.

Optimální poměr kovacího a třecího tlaku je kolem hodnoty 2, ale může být až 3,5.

Hodnoty třecího tlaku 10 – 80 MPa
kovacího tlaku 20 – 150 MPa

Dalším parametrem je čas třecí mezi 10 – 20 s a čas kovací v intervalu 1 – 3 s.

7.2 SETRVAČNÍKOVÉ TŘECÍ SVAŘOVÁNÍ

Na rozdíl od konvenčního svařování se otáčky snižují z maxima na nulu.

Setrvačnickový způsob je charakterizován velmi krátkým svařovacím časem, při kterém je kinetická energie akumulovaná v setrvačnicku přeměněna na teplo při téměř konstantním měrném tlaku 40 až 280 MPa. Celkový čas svařovacího cyklu v délce $t = 0,5$ až 2 s je krátký na výraznou difúzi tepla a proto ohřeje jen velmi úzké pásmo s vysokým teplotním gradientem. Regulace kinetické energie se řídí změnou hmotnosti, rozměru a otáček setrvačnicku. Otáčky závisí na velikosti třecí plochy i hmotnosti svařence a běžně se pohybují od 500 do 40 000 min⁻¹.

7.3 Třecí svařování promísením rotujícím nástrojem

FSW –Friction Stir Welding

Princip metody je založen 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.

Svařitelnost materiálů při svařování třením

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

Pro oceli je svařitelnost limitována uhlíkovým ekvivalentem C_e (3):

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

Při uhlíkovém ekvivalentu:

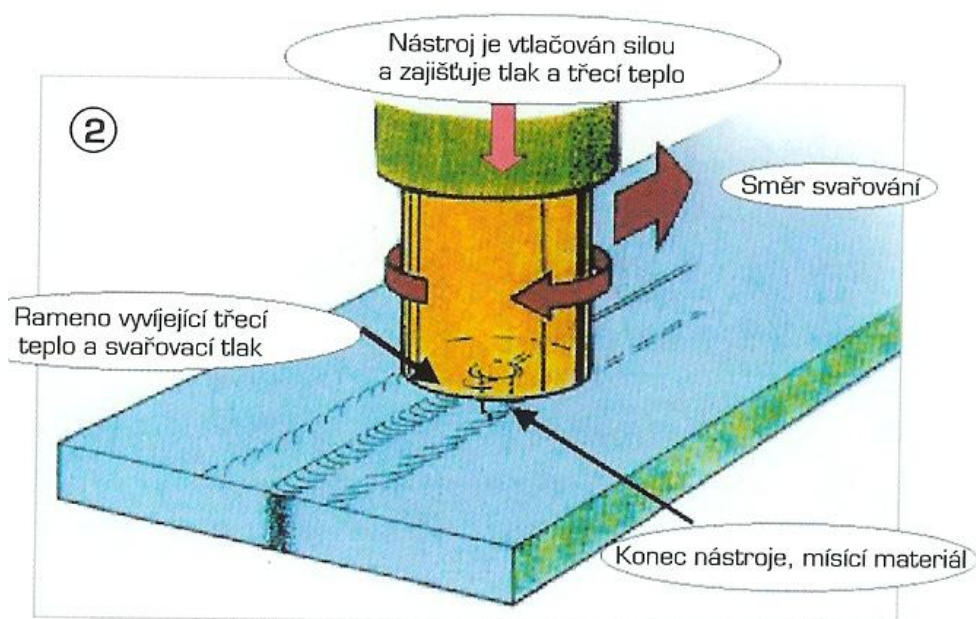
0,2 – 0,4 % není třeba tepelné zpracování (TZ),

0,4 – 0,5 % TZ se provádí pro zvýšení tažnosti a vrubové houževnatosti,

0,5 – 0,8 % TZ je nutné vždy provést,

nad 0,8 % TZ je nutné provést ihned bez ochlazení na teplotu okolí.

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



Obr. 7.3 Třecí svařování promísením rotujícím nástrojem
FSW – Fiction Stir Welding

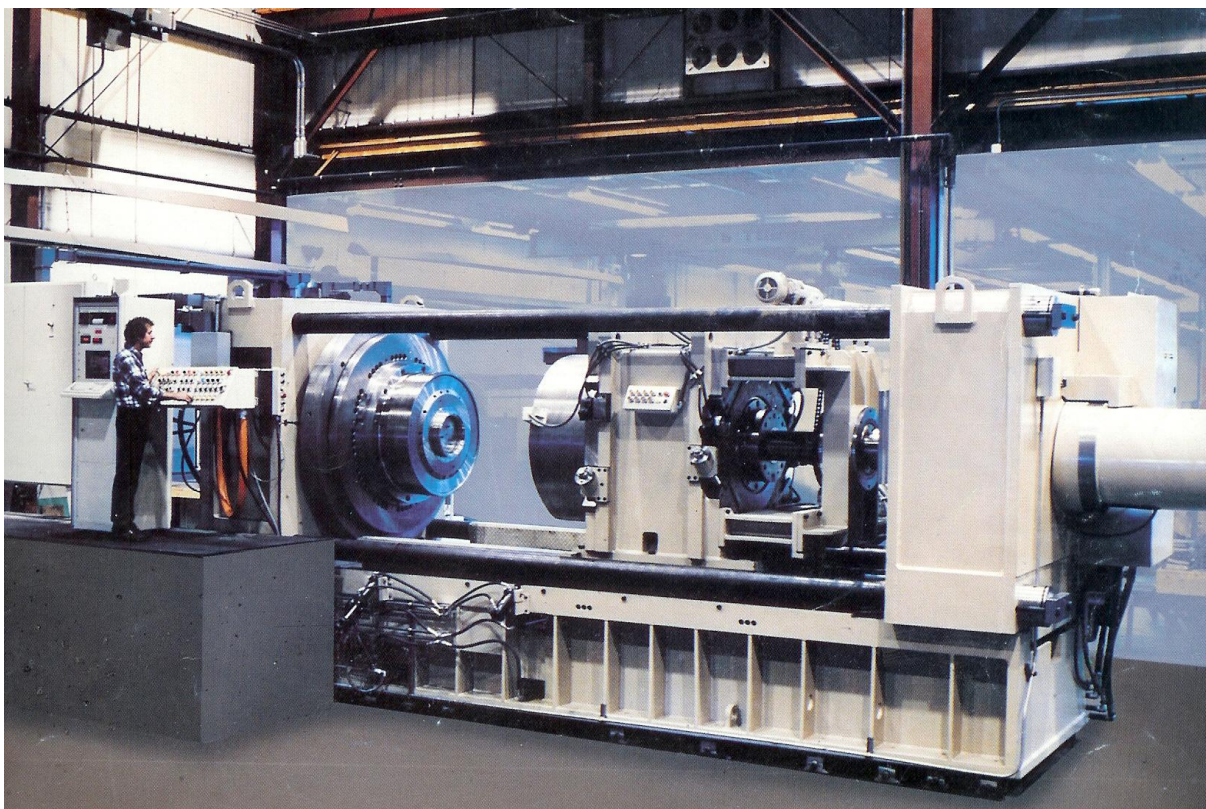
- 1) vlastní proces svařování
- 2) princip FSW

Aplikace a využití třecího svařování

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

V oblasti strojírenské výroby tvoří největší podíl rotační součásti typu hřídelí, čepů, trubek, válců atd. Lze spojovat i profily např. čtvercového nebo šestihranného tvaru, a součásti s přesně definovaným tvarem, protože mikroprocesorem řízené svařovací zařízení kontroluje a nastavuje požadovaný úhel natočení. Vzhledem ke krátkému času na vlastní svařování a vysokým pořizovacím nákladům na zařízení musí být zajištěna hromadná nebo velkoseriová výroba součástí.

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.



Obr. 7.4 Ukázka zařízení pro setrvačnickové třecí svařování rozměrných těles

Bezpečnost.

Svařování třením je technologie která se vyznačuje vysokou čistotou procesu bez hluku, dýmů, záření, jisker a roztaveného kovu. Mechanické rázy do okolí je nutné omezit tlumícími podložkami. Zařízení pracují automaticky bez přímého kontaktu tedy i nebezpečí pro obsluhu.

8. DIFÚZNÍ SVAŘOVÁNÍ

Způsob difúzního svařování byl navržený a patentovaný v bývalém Sovětském svazu N. F. Kazakovem v roce 1956. Difúzní svařování v tuhém stavu se definuje jako

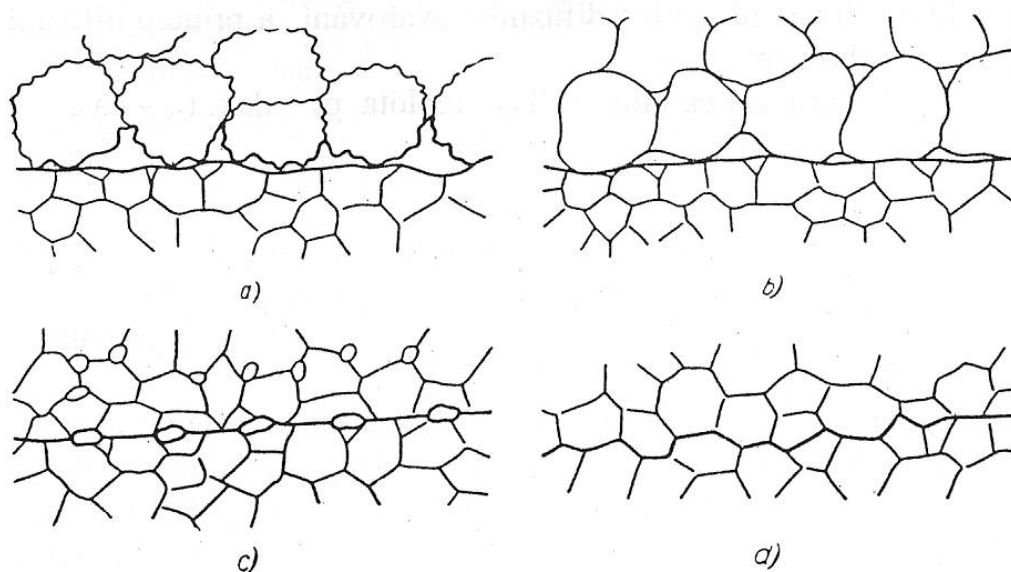
způsob dosažení monolitního spojení vznikem vazeb na atomové úrovni a řídí se Fickovými zákony .

První Fickův zákon definuje difúzní tok atomů prvků, který je úměrný koeficientu difúze jednotlivých prvků a jejich koncentrace v závislosti na vzdálenosti. Druhý Fickův zákon definuje rychlost změny koncentrace a lze jej využít pro určení času potřebného na vytvoření difúzního spoje.

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.

Proces difúzního svařování je možno rozdělit na tři stadia:

- 1) Počáteční kontakt povrchu při kterém nastává deformace povrchových nerovností..
- 2) Druhé stadium je charakterizováno přemísťováním vakancí a dislokací při počátku vzájemné difúze atomu.
- 3) Ve třetím stadiu dochází k intenzivním difúzním pochodům , kdy v příhodných kombinacích dochází k vymizení původního rozhraní mezi spojovanými povrchy ve snaze o vyrovnání energií rovnovážné struktury. Při difúzních jevech se jedná především o objemovou difúzi, difúzi po hranicích zrn a v menší míře o povrchovou difúzi.

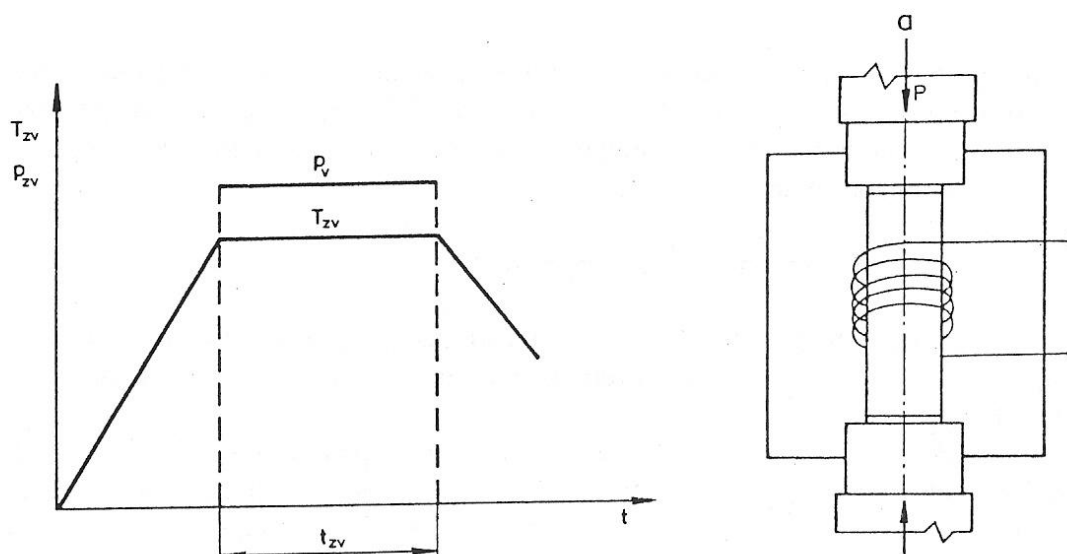


a) počáteční kontakt migrace atomů, vytváření můstků b) plastické zarovnání mikronevlností c) intenzivní difúze a mikrodeformace d) dokonalý difúzní spoj

Obr. 8.1 Stadia vytváření difúzního spoje

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 ovlivňuje rychlost difúze jednotlivých prvků ve svařovaných materiálech a zvyšuje plasticitu kovů. Výše teploty je závislá na teplotě tavení a pohybuje se mezi 55 až 90 % tavicí teploty. Za optimální teplotu se považuje cca $0,7 T_{\text{tav.}}$ a je snaha o její snížení.

Svařovací tlak musí zaručit přiblížení spojovaných ploch na takovou vzdálenost, aby mohla nastat difúze v celé ploše, ale současně nedošlo k tvorbě makroskopické deformace. Tlak se volí v závislosti na mechanických vlastnostech, chemickém složení materiálu, výšce svařovací teploty a druhu mezivrstvy. Pro svařování oceli je vhodný tlak v rozmezí 10 až 20 MPa. Svařovací čas se volí vzhledem k hodnotám předešlých parametrů tlaku a teploty tak, aby byla zajištěna dostatečná difúze vzhledem k velikosti svařovaných ploch. Řádově se pohybuje v minutách v rozmezí od 3 do 60 minut.



Pracovní cyklus difúzního svařování a princip difúzního svařování s indukčním ohřevem Svařovací parametry: T_{zv} – teplota, p_v – tlak, t_{zv} – čas.

Obr. 8.2 Příklady parametrů difúzního svařování

Tab. 8.1 Ukázka parametrů vybraných kombinací materiálů

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

Velice důležité je prostředí, ve kterém svařování probíhá. Převážně se difúzní svařování provádí ve vakuu ($p = 10^{-1}$ až 10^{-2} Pa), méně často při sníženém tlaku v ochranných plynech nebo taveninách solí různých kovů. Výška vakua má vliv na kvalitu spoje i rychlost svařování. Druhy solí odpovídají tavicí teplotou typům svařovaných materiálů viz tabulka. Při difúzním svařování se vyžadují kovově čisté svarové plochy opracované na minimální drsnost.

Tab 8.2 Příklady roztoků solí a jejich pracovní teploty

Složení solných lázní a spojovaný kov	interval pracovních teplot (°C)
BaCl ₂ Ocel	1020 – 1320
90% BaCl ₂ + 10%NaCl Ocel + kovy	650 –1300
NaCl ocel austenitická	850 – 920
56% KCl + 44% NaCl Ni, Cu - slitiny	700 – 815
KNO ₃ Al	350 – 600

Difúzní děje i tvorbu svaru podporují u různorodých materiálů vhodné mezivrstvy, které jsou vkládány mezi svařované povrchy ve formě folií, prášků, nebo jsou galvanicky vyloučené případně žárově nastříkány .

Materiály mezivrstev jsou nejčastěji plastické kovy - Ni, Ti, Co, Cu, Mo, Fe atd. Uvedené přechodové materiály mohou současně zajistit čištění povrchů, průběh difúze při nižších teplotách, plastické tečení, přizpůsobení povrchů při nízkých hodnotách tlaků a zamezení vzniku intermetalických sloučenin.

Difúzní svařování se používá především pro spojování obtížně svařitelných materiálů, např. pro vysokotavitelné kovy, materiály s vysokou tvrdostí a kovy s vysokou afinitou ke kyslíku. Lze svařovat i takové kombinace které tvoří při tavném svařování tvrdé intermetalické sloučeniny, které jsou křehké a pevnost svaru je velmi malá. Difúzní svařování je také jediná metoda která umožňuje svařovat i kovy s keramikou, grafitem nebo sklem.

U svařování dvou stejných nebo příbuzných kovů zaniká zcela rozhraní povrchů, svařování různorodých kombinací se však vyznačuje ostrým rozhraním.

Jako příklady lze uvést : Cu +W, Ti + Ni, Cu + Ta, Al + Ocel, Zr + ocel, Pt + Ti, rychlořezná ocel + konstrukční uhlíková ocel a možnost svařování tenkých a silnostěnných materiálů.

Výhody difúzního svařování

- možnost vzájemného spojování tenkostěnných a silnostěnných materiálů
- svařitelnost i velmi různorodých materiálů
- nevzniká lící struktura
- součástky se nedeformují, odpadá mechanické opracování po svaření
- hygienické prostředí bez záření, prachu a dýmů
- proces bez přímého ovlivnění obsluhou

Nevýhody difúzního svařování

- omezení rozměrů svařence velikostí komory
- vysoká cena zařízení
- dlouhé svařovací časy
- náročná příprava svarových ploch

Bezpečnost difúzního svařování

Difúzní svařování je vysoce hygienické protože pracovník není vystavený škodlivým účinkům jako při klasickém svařování a obsah vakuové komory by se měl v případě vzniku škodlivin odvádět do volné atmosféry. Z hlediska znečištění komory a okolního prostředí se nedoporučuje svařovat zinek, kadmium, olovo aj.

9. 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. Velký vliv na schopnost tvorby svaru má poměr tvrdosti oxidů k tvrdosti kovu. Oxidy kovů s vysokou tvrdostí se snadněji poruší a jsou vytlačeny do výronku. Oxidy kovu jejichž tvrdost se blíží tvrdosti kovu mají vysokou plasticitu a jejich vytěsnění ze svarové plochy je obtížné.

Tab. 9.1 Velikost potřebné deformace svařovaného materiálu

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

Nejdůležitější podmínky svařování jsou:

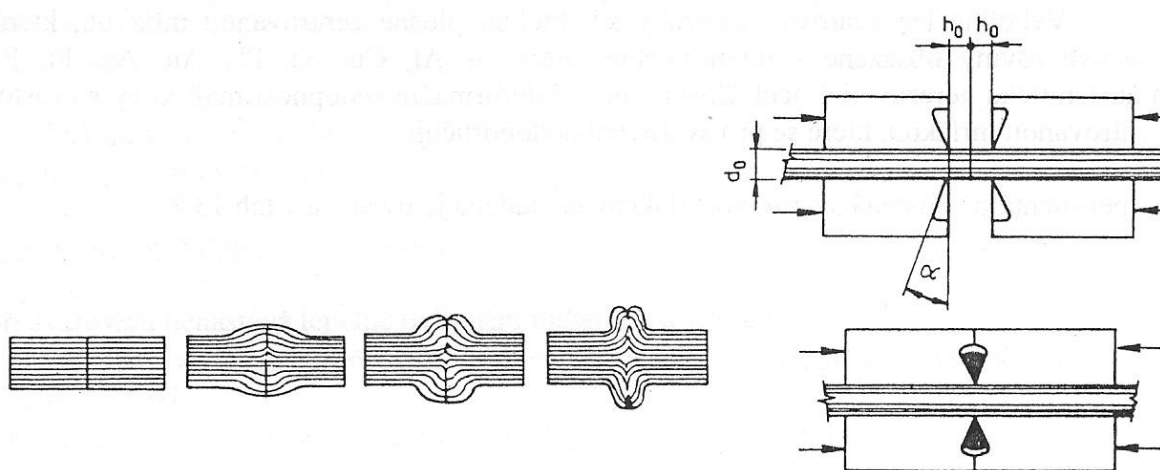
- kontinuální plastická deformace
- intenzivní tečení kovu v oblasti rozhraní
- rozrušení oxidů a jejich vytlačení ze spoje
- intenzivní pohyb dislokací s tvorbou aktivních center
- všestranný tlak v závěrečném stadiu tvorby svaru
- čistota svarových ploch

Příprava svarových ploch

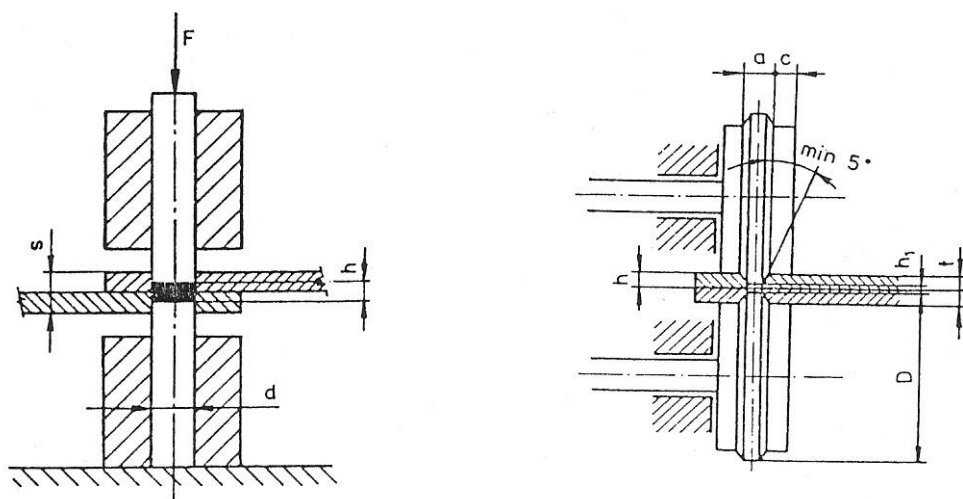
svarové plochy musí být zarovnané stříháním nebo jiným opracováním, odmaštěné a případně kartáčované na rotujících kartáčích.

Konstrukční provedení spojů může být různé:

- tupé svařování pro spojování nejčastěji kruhových, profilů.
- svařování přeplátovaných spojů, které může být bodové nebo švové a může být realizováno do tl. až 6mm. Potřebná deformace se dosahuje oboustranným stlačením, nebo se může deformovat jen tenčí z dvojice kovů, případně materiál s vyšší tvrdostí.



Obr. 9.1 Princip stykového svařování tlakem za studena



Obr. 9.2 Princip bodového a švového svařování tlakem za studena

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

Pro uvedené kombinace materiálů jsou tyto doporučované hodnoty měrného tlaku:

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

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

Experimentálně je zjištěná svařitelnost tlakem za studena pro kombinace:

Zn – Fe, Ni, Au, Ag, Cu, Al, Hliník je svařitelný téměř se všemi kovy, Ni, Ag a Au se všemi plastickými kovy.

Vlastní svařování probíhá za pomoci hydraulických lisů v přípravcích nebo speciálních svařovacích strojích pomocí upínacích čelistí na jeden nebo více přechovacích zdvihů.

Aplikace a využití svařování tlakem za studena:

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

Výhody svařování tlakem za studena:

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

Někdy se tento způsob kombinuje s ohřevem tzv. **Svařování tlakem za polotepla**. Teplota se volí podle druhu spojovaného materiálu (do cca 500° C pro měď) a závisí na použitém měrném tlaku.

Bezpečnost při svařování tlakem za studena

Z hlediska bezpečnosti při svařování tlakem za studena je obsluha ohrožena výpary odmašťovacích prostředků při čištění svarových ploch a prachem který vzniká při kartáčování. Nebezpečný je také prostor pohybujících se částí svařovacích, řezacích a kartáčovacích zařízení.

10. ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

První pokusy s ultrazvukovým svařováním byly prováděny v Německu a USA v době druhé světové války. Systematický výzkum byl prováděn v USA v letech 1949 – 53, kdy se prověřovala možnost spojování hliníku, mědi, zirkonu, titanu a jejich slitin.

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. V současnosti se používá zařízení využívající podélných, ohybových nebo torzních kmitů.

Počátek svařování je charakteristický vzájemným působením tlaku a kmitání přičemž dochází nejprve k narušení oxidické vrstvy, zarovnání povrchových nerovností a odstranění nečistot v místě budoucího spoje. V další fázi se spoj tvoří plastickou mikrodeformací a difuzí při relativně nízké teplotě na kontaktní ploše. Vlastní spoj vzniká chemickou vazbou při přiblížení povrchu na vzdálenost působení meziatomových sil, kdy vznikají lokální vazební místa mezi spojovanými materiály. 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. Při velkých amplitudách se vytváří makroskluz, výrazná plastická deformace, intenzivním třením vzrůstá teplota a může dojít k natavení stykových ploch a příp. precipitaci nežádoucích intermetalických fází.

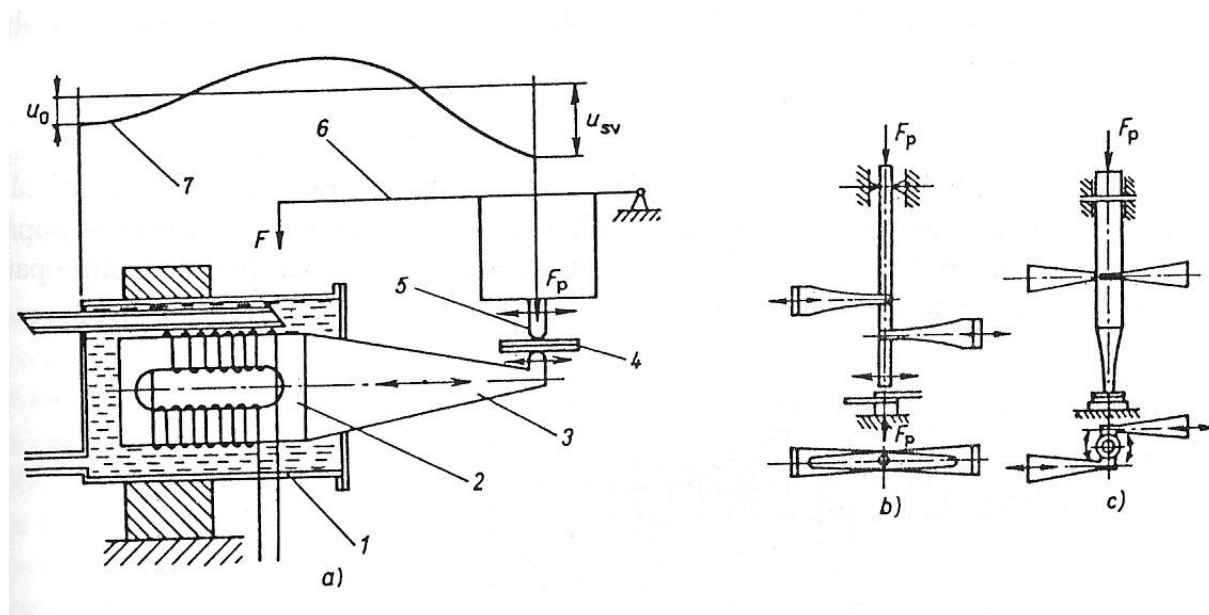
Při vhodných parametrech svařování není materiál tepelně ovlivněn, deformace se pohybuje na hodnotě maximálně 5% z celkové tloušťky materiálu.

Hlavní parametry svařování jsou především :

- Amplituda výchylky sonotrody [mm]
- Přítlačná síla [N]
- Frekvence UZ vlnění [Hz]
- Svařovací čas [sec]

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. Při vysokých hodnotách tlaku nastává velké tlumení kmitací soustavy a při nízkých tlacích nedostatečný přenos kmitání.

Při ultrazvukovém svařování se vlivem přenášené energie zvyšuje na kontaktních plochách teplota. Maximální teplota se odhaduje na 50 až 60% teploty tavení svařovaného kovu.



Obr. 10.1 Princip zařízení pro svařování ultrazvukem

kmitové soustavy s podélnými kmity a), s ohybovými kmity b), s torzními kmity c)
 1- plášť kmitače, 2 – magnetostrikční měnič, 3 - vlnovod, 4 – svařované součásti, 5 – svařovací špičky (sonotrody), 6 – zatěžovací mechanismus, 7 – průběh amplitudy a její zvětšení, F_p – přítlačná síla

Svařitelnost materiálů

Svařitelnost kovů ultrazvukem je podobná svařitelnosti tlakem za studena. Při volbě kombinací jsme však omezení velikostí průměrů atomů, které se mohou lišit do 18 %, což

odpovídá možnosti vzniku substitučního tuhého roztoku. Při rozdílech průměrů atomů 19 až 44% se ultrazvukový spoj nevytvoří. Obecně jsou čisté kovy lépe svařitelné než jejich slitiny.

S růstem tloušťky materiálu vzrůstá útlum mechanického vlnění a maximální tloušťky materiálu jsou:

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

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

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

Aplikace ultrazvukového svařování

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

Bezpečnost

Při svařování ultrazvukem je nutno zabránit dotyku lidského těla s kmitajícími částmi zařízení i svařovaným materiálem. Při vyšších výkonech by mohlo dojít k lokálnímu popálení vlivem absorpce ultrazvuku v kožním tkanivu. Dále je nutno dodržovat bezpečnostní opatření jako při práci na lisech vzhledem k vysoké přítlačné síle.

11. VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ

V padesátých letech bylo poprvé aplikováno a teoreticky objasněno 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. 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. Svarové plochy musí být čisté bez tuků, oxidů a organických povlaků. Nejlepších hodnot pevnosti spoje se dosahuje mořením povrchů bez deformačního zpevnění povrchových vrstev - tryskáním, broušením, hoblováním. Důležitým faktorem je i rovinnost svařovaných materiálů

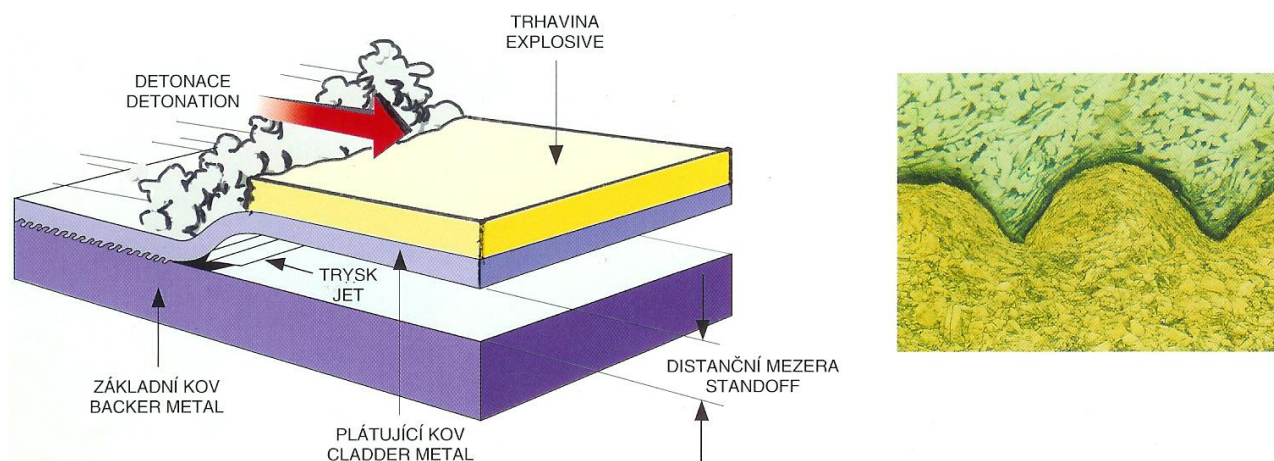
Vznik vln na svarovém rozhraní vyvolává tečná složka síly srázu desek a pro každé kombinace materiálů mají vlny na rozhraní jiný tvar a velikost.

Mechanismus vzniku spoje má tři stadia:

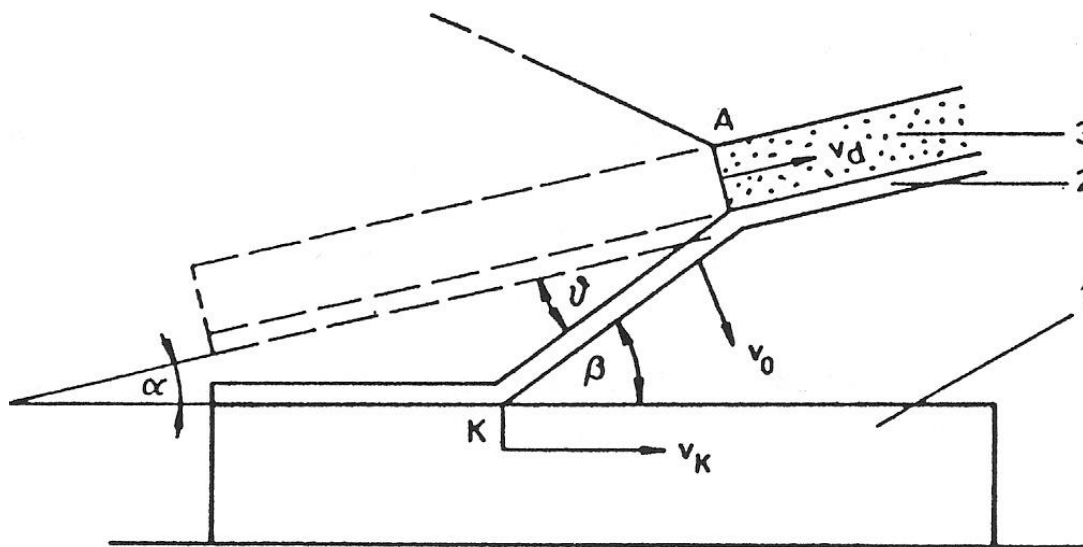
- 1) Samočisticí pochody vyvolané pohybem trysku a tvorba fyzikálního kontaktu přiblížením povrchů na malou vzdálenost.
- 2) Aktivace povrchových vrstev za současného vytvoření vysoké hustoty aktivačních center a vzniku spoje.

- 3) Relaxační jevy spoje po výrazné plastické deformaci. Absorbovaná kinetická energie je hlavní příčinou snížení úrovně tahových napětí avšak nadměrná plastická deformace může vést až k teplotě tavení a vzniku křehkých fází, dutin a trhlin.

Podmínkou vzniku spoje je podzvukový sráz desek tzn. že trhavina použita pro svařování musí mít nízkou detonační rychlost, většinou pod 3500 m.s^{-1} .

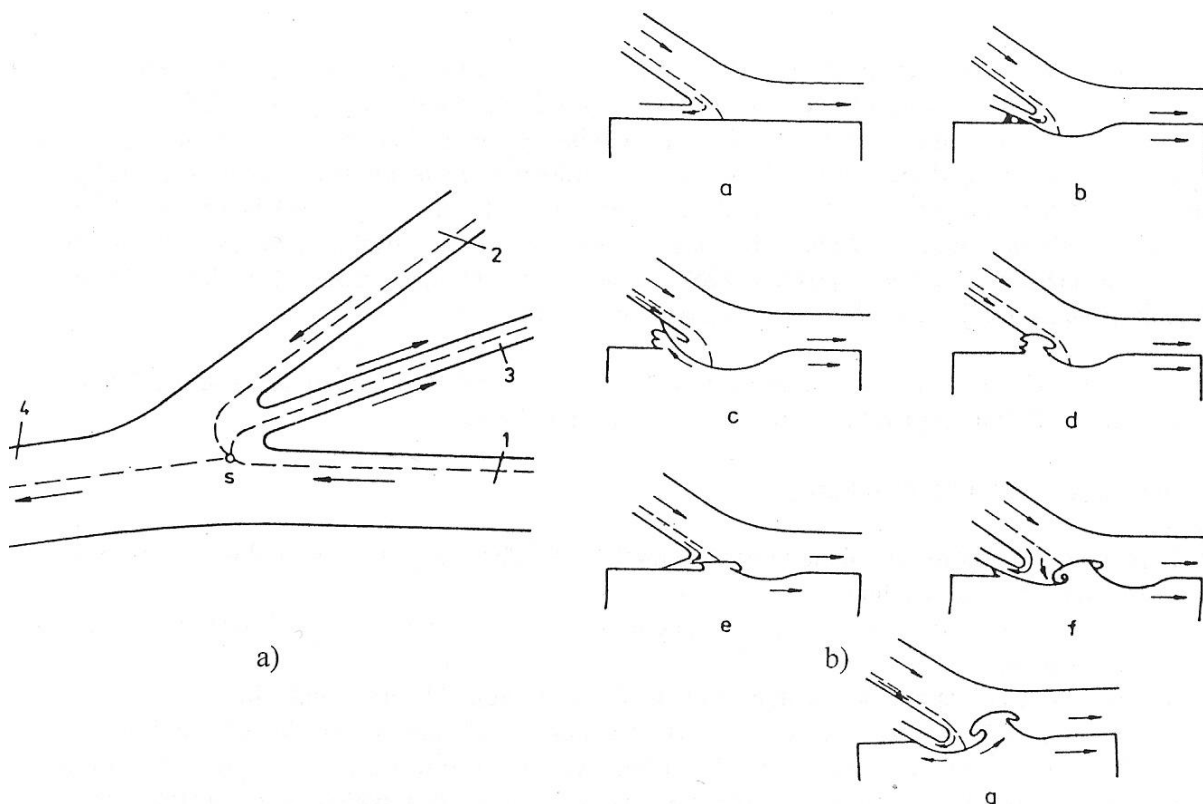


Obr. 11.1 Princip výbuchového svařování a ukázka zvlněného rozhraní dvou kovů



Obr. 11.2 Kinetika svařovacího procesu

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



a)

b)

Obr. 11.3 Vznik souvislého proudu (a), mechanismus tvorby vln v místě rozhraní kovů (b)

1- základní materiál, 2 – plátovaný materiál, 3 – trysk, 4 - tlouk

a - začátek srážu materiálů, b až f - tvorba vlny, g – posuv vlny doprava

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.

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 $3,5 \text{ GPa}$. a zrnitost optimální pro svařování. Trhavina je pomocí dřevěného rámu rovnoměrně nasypána na plátovaný plech a je jednostranně bodově nebo liniově odpálena. Svařování explozí se provádí ve volném terénu nebo vhodných skalních a ocelových komorách.

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

- navařování (plátování) bimetalů 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

Bezpečnost výbuchového svařování

- nutnost dodržovat předpisy pro práci s trhavinami,
- vzdušná tlaková vlna při výbuchu – dodržení bezpečné vzdálenosti osob a budov,
- vznik seismické rázové vlny.

Použitá literatura:

- [1] Engst, P., Horák, M.: Aplikace laserů. SNTL Praha 1989.
- [2] Minařík, V.: Tepelné dělení materiálů. ČVUT Praha 1993.
- [3] Kuncipál, J. a kol.: Teorie svařování. SNTL Praha 1986.
- [4] Kuncipál, J., Pilous, V., Dunovský, J.: Nové technologie svařování. SNTL Praha 1984.
- [5] Turňa, M.: Špeciálne metódy zvarania. ALFA Bratislava 1989.
- [6] Gibson S.W. : Advanced welding. Macmillan Press LTD , London 1997
- [7] Prospektový materiál firem Hypertherm, Thompson, AGA, Synthesia, Leybold, Lumonics, Bystronic, Thermacut, Rofin-Sinar, Fronius, ESAB, SIAD, Migatronic, Lincoln –Electric atd.
- [8] Kučera J.: Teorie svařování VŠB Ostrava, 1991.
- [9] ČSN ISO 857 Metody svařování, tvrdého a měkkého pájení, 1997
- [10] Prospektový materiál firmy KOSTER CS spol. s r.o. Žacléř, Nádražní 235 Svorníkové svařování.

- [11] Trillmich, R., Keuchel, W.: Erfahrungen beim Bolzenschweißen in Müllverbrennungsanlagen. Der Praktiker. 1995, No. 7, s. 345
- [12] Technické normy pro svařování ČSN EN, ČSN EN ISO
- [13] Blaščík, F. a kol. : Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarania. ALFA Bratislava a SNTL Praha, 1988
- [14] Odborné časopisy : Zváranie, Ocelové konstrukce, Průmyslové spektrum, Welding Journal,
- [15] Országh, V. – Országh, P. : Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov. Polygrafia SAV Bratislava, 1998
- [16] Minařík, V. : Obloukové svařování. Scientia Praha, 1998
- [17] Žák, J. – Novák, M. : Teorie svařování. Ediční středisko VUT Brno, 1988
- [18] www.esab.cz
- [19] www.fronius.com
- [20] www.konstrukce.cz
- [21] www.tlakinfo.cz
- [22] www.tdssmsbrno.cz
- [23] www.cws-anb.cz
- [24] www.twi.com.uk
- [25] www.wirpo.cz
- [26] www.svarak.cz
- [27] www.svareni.cz
- [28] www.czweld.cz
- [29] www.siad.cz
- [30] www.linde-gas.cz
- [31] www.welco.cz
- [32] www.svv.cz
- [33] www.migatronik.cz
- [34] www.hypertherm.com

ZKUŠEBNÍ OTÁZKY TECHNOLOGIE II, část SVAŘOVÁNÍ

1. Vznik svarového spoje, klasifikace metod svařování, aplikace nejběžnějších svařovacích postupů
2. Charakteristika jednotlivých metod svařování, polohy svařování
3. Svařování plamenem, zařízení parametry, pracovní technika, použití svařování plamenem
4. Kyslíko-acetylenový plamen, popis, základní plyny-vlastnosti, výroba
5. Aluminotermické svařování, postup, využití
6. Principy - tavné způsoby svařování, tlakové způsoby svařování, číselné rozdělení metod svařování podle ČSN EN
7. Elektrický oblouk, definice, vznik, tepelná bilance, vlastnosti, síly v oblouku, teploty
8. Svařovací zdroje pro obloukové svařování, použití pro jednotlivé způsoby

9. Svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou, princip, svařovací zdroje, parametry, pracovní technika, obal elektrod a jeho funkce, druhy obalů
10. Svařování WIG, princip, svařovací zařízení, svařovací hořáky, ochranné plyny
11. Svařování WIG, svařovací parametry, druh proudu a polarita, pulsace
12. Svařování MIG/MAG, přenos kovu v oblouku
13. Svařování MIG/MAG, vysokovýkonné metody. Zvláštní techniky - STT, SMT...
14. Svařování MIG, použití, zdroje a jejich charakteristika, svařovací zařízení, přídavné materiály a ochranné plyny,
15. Svařování el. obloukem pod tavidlem, princip, zdroje svařovacího proudu
16. Svařování el. obloukem pod tavidlem, přídavné materiály, funkce tavidla, jeho sušení a skladování, tvary
17. Svařování el. odporem, charakteristika, principy jednotlivých metod, svařovací parametry
18. Svařování a řezání plazmou, využití, typy spojů
19. Svařování a řezání laserem, použitelnost, typy spojů, parametry
20. Svařování elektronovým paprskem použitelnost, typy spojů,
21. zařízení, pracovní technika
22. Svařování třením, použitelnost, typy spojů, parametry
23. Svařování difúzní, použitelnost, typy spojů, parametry
24. Svařování tlakem za studena, použitelnost, typy spojů, parametry
25. Svařování výbuchem, použitelnost, typy spojů, parametry
26. Svařování ultrazvukem, použitelnost, typy spojů, parametry