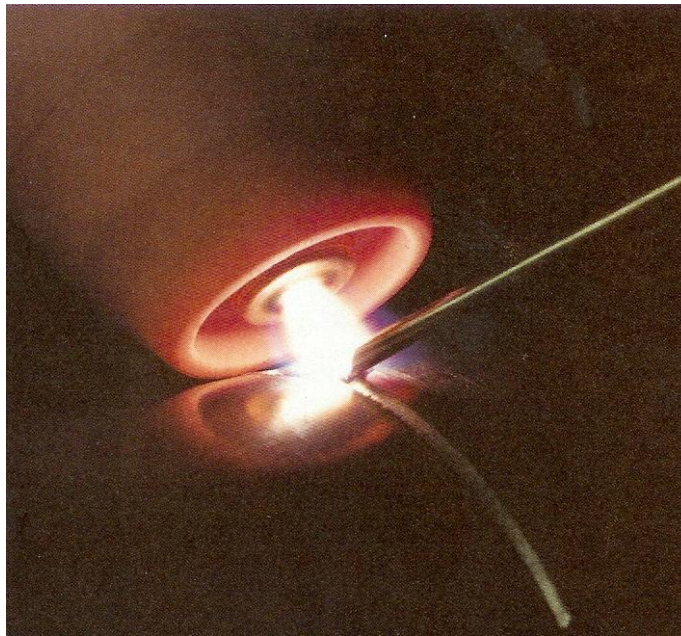


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
Odbor svařování a povrchových úprav  
Sylabus přednášek

# TECHNOLOGIE II

## ČÁST SVAŘOVÁNÍ - 2



Autor: Jaroslav KUBÍČEK

# SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ

V oblasti tavného svařování 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  $10^5 \text{ W.cm}^{-2}$ , 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:

- Vysoká rychlost ohřevu i vysoká rychlost svařování omezuje difúzi tepla do okolí svaru a tím i rozsah transformačních změn v materiálu.
- 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.
- Minimální deformace umožňují svařování polotovarů s konečným opracováním především svazkem elektronů, mikroplazmou a laserem.
- Nové typy svarů umožňují navrhovat nová konstrukční řešení svařenců.



# Svařování svazkem paprsků

---

- **Označení ČSN EN ISO 4063 – 5XX – Svařování svazkem paprsků**
- **Elektronové svařování**
  - 51 - Elektronové svařování
  - 511 – Elektronové svařování ve vakuu
  - 512 – Elektronové svařování v atmosféře
  - 513 – Elektronové svařování s přidavkem ochranných plynů
- **Plazmové svařování – 15X – Řadí se do konvenčních tavných metod**
  - 151 – Plazmové MIG svařování
  - 152 – Plazmové svařování s přidavkem prášku
  - 153 – Plazmové svařování s přeneseným obloukem
  - 154 – Plazmové svařování s nepřeneseným obloukem
  - 155 – Plazmové svařování s polo-přeneseným obloukem
- **Laserové svařování – 52 – Svařování svazkem paprsků**
  - 521 – Svařování pevnolátkovým laserem
  - 522 – svařování plynovým laserem
  - 523 – Svařování diodovým laserem

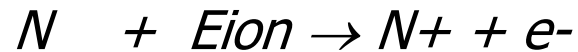




# PLAZMOVÉ SVAŘOVÁNÍ

---

- Disociace a ionizace dusíku:

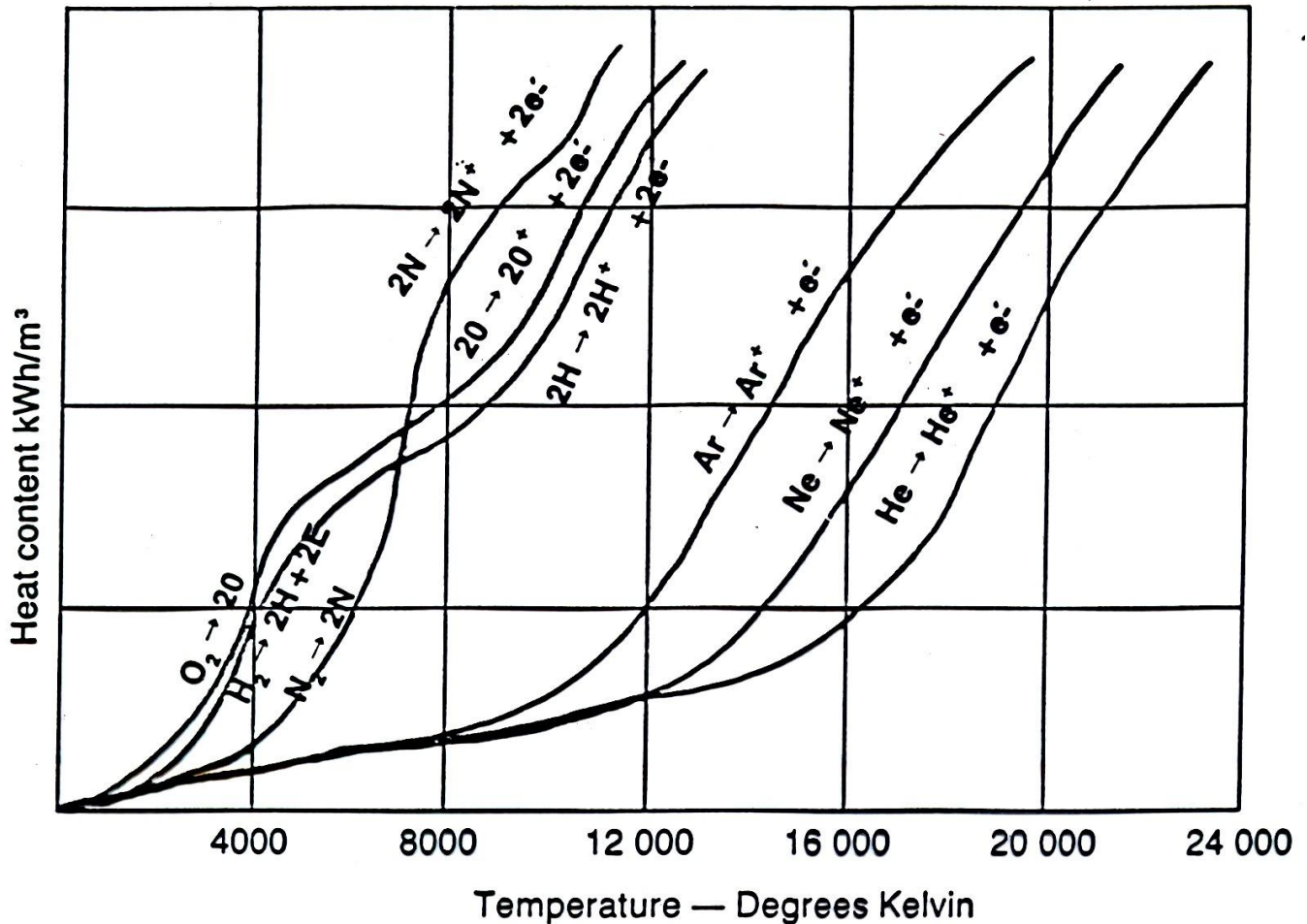


- Kde  $E_{dis.}$  je potřebná energie na disociaci a  $E_{ion}$  je ionizační energie

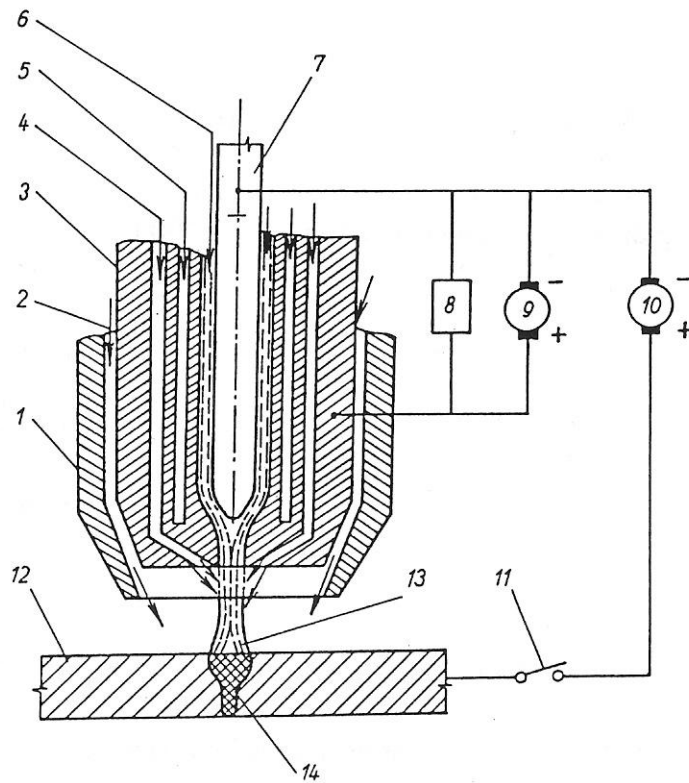
- Pro používaná prostředí platí tyto přibližné průměrné teploty plazmy:

- 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

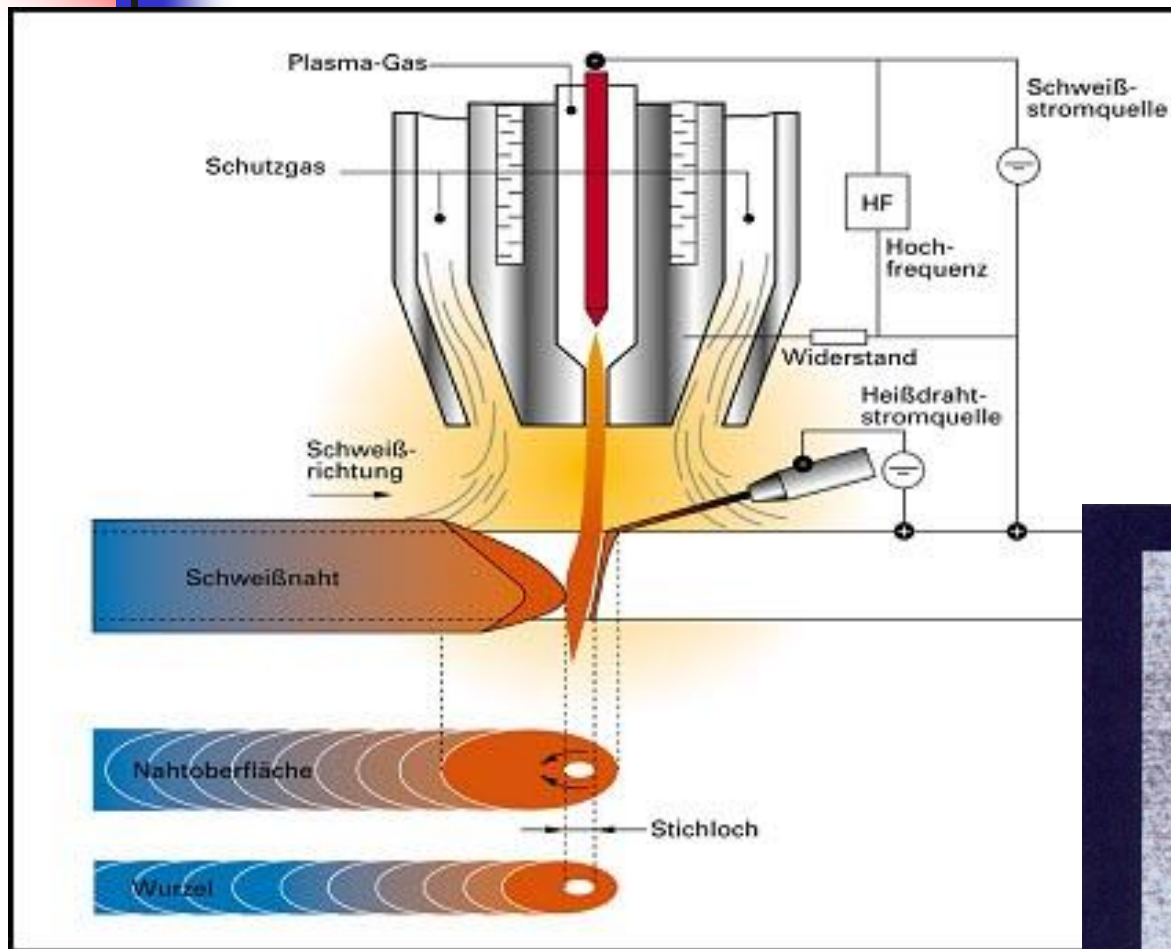
# Závislost entalpie plynů na teplotě



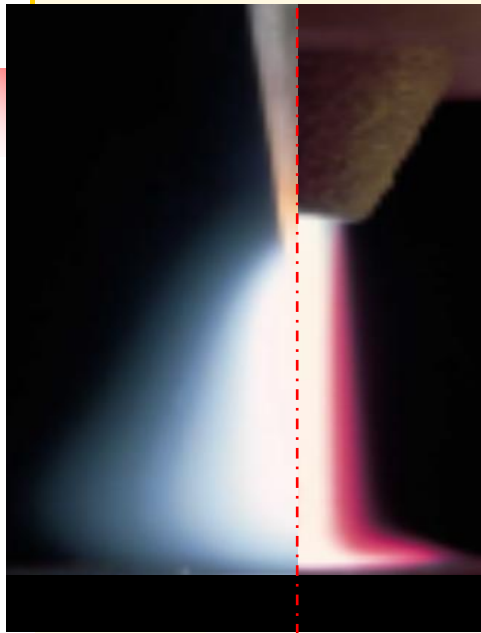
# Princip plazmového hořáku



# PRINCIP PLAZMOVÉHO SVAŘOVÁNÍ



# Průběh teplot TIG/PLAZMA



**TIG**

$I = 150$   
A

$\ddot{\cdot} = 14$

Teplota °K = 14



4000 – 10000



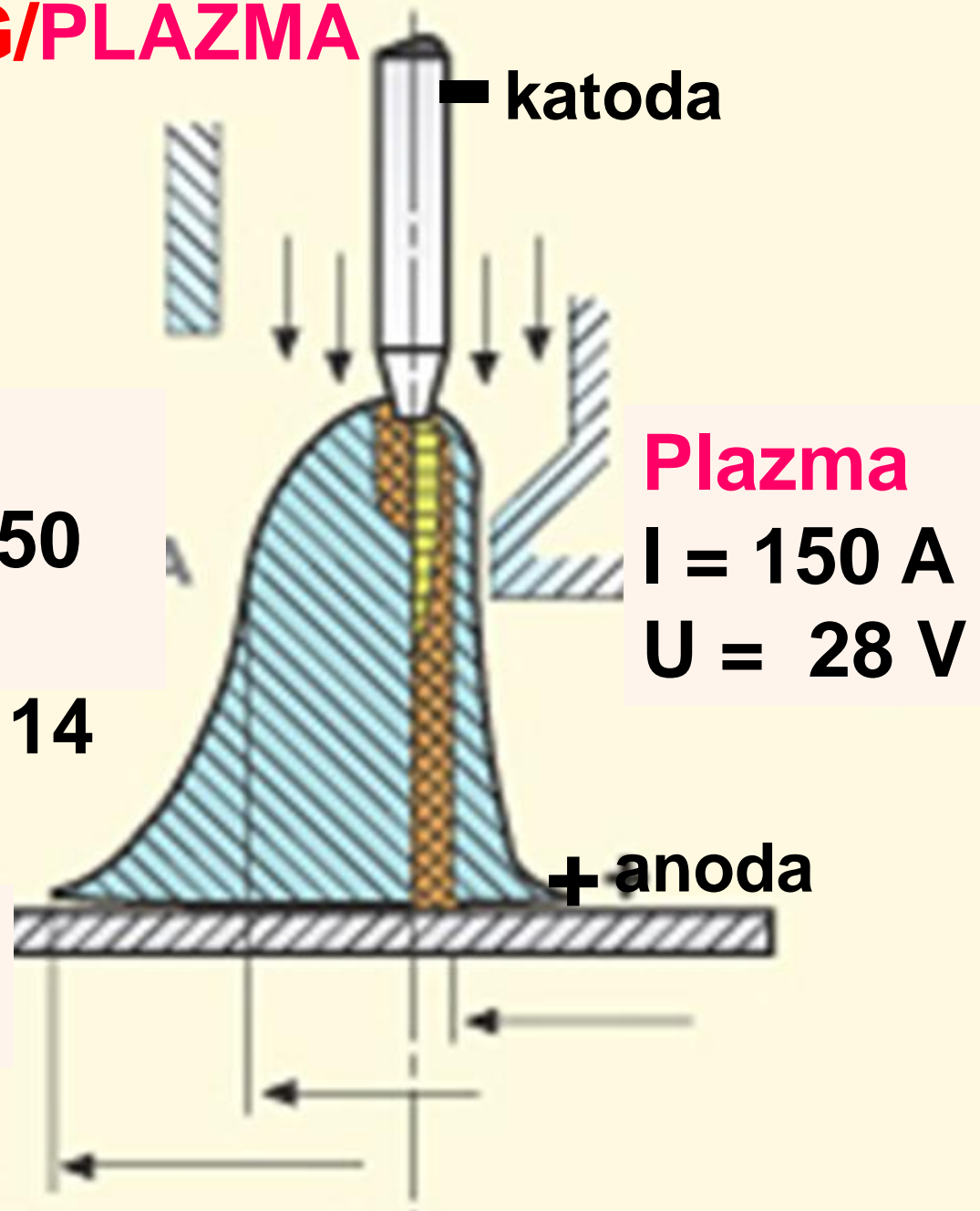
10000 – 16000



16000 -24000



> 24000



katoda

**Plazma**

$I = 150$  A

$U = 28$  V

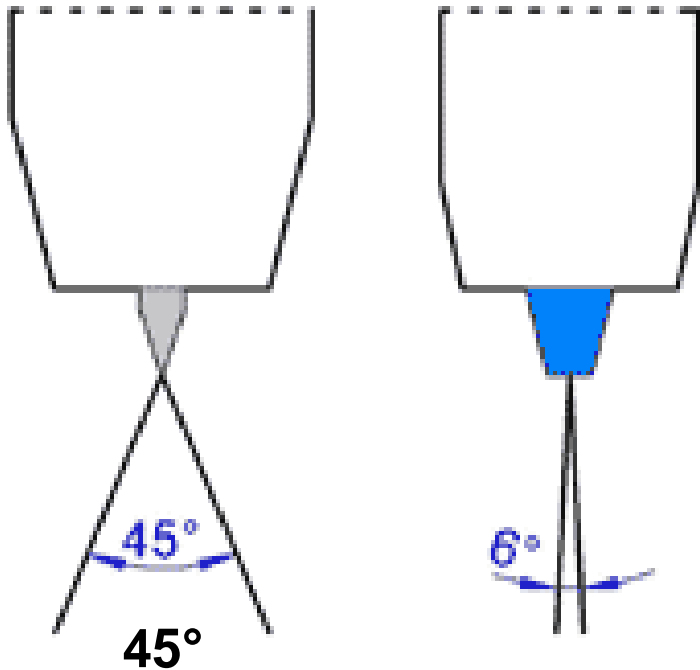
+ anoda

# Porovnání metod TIG a plazmy

**TIG**

**Plazma**

Tvar el. oblouku



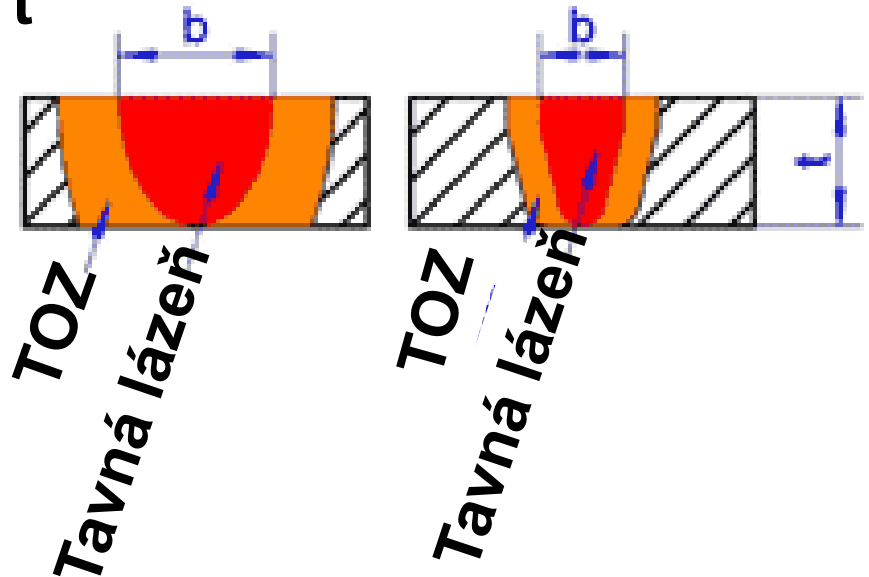
**TIG**

**Plazma**

Tvar a velikost tavné lázně a tepelně ovlivněné oblasti

$$b = (1 \text{ až } 2) * t$$

$$b = (0,6 \text{ až } 1) * t$$





# Cr – Ni ocel svar s průvarem Key-Hole

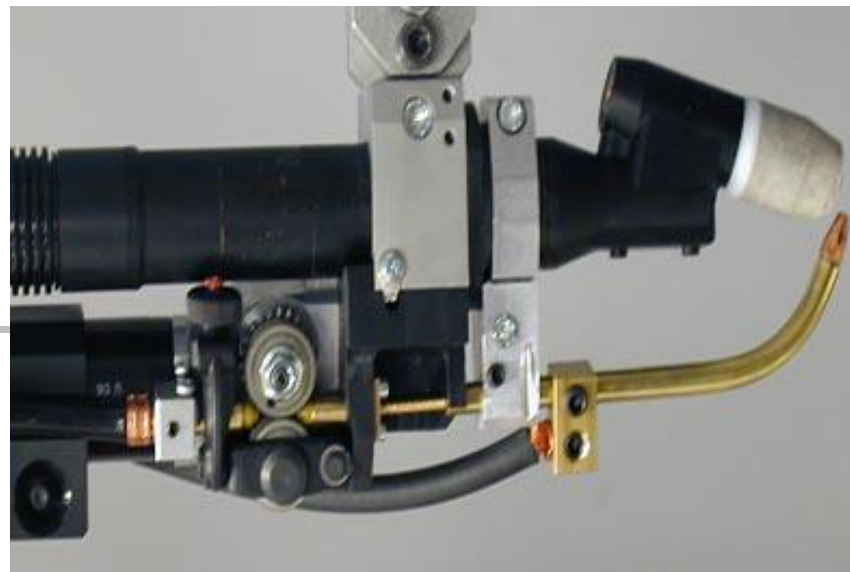
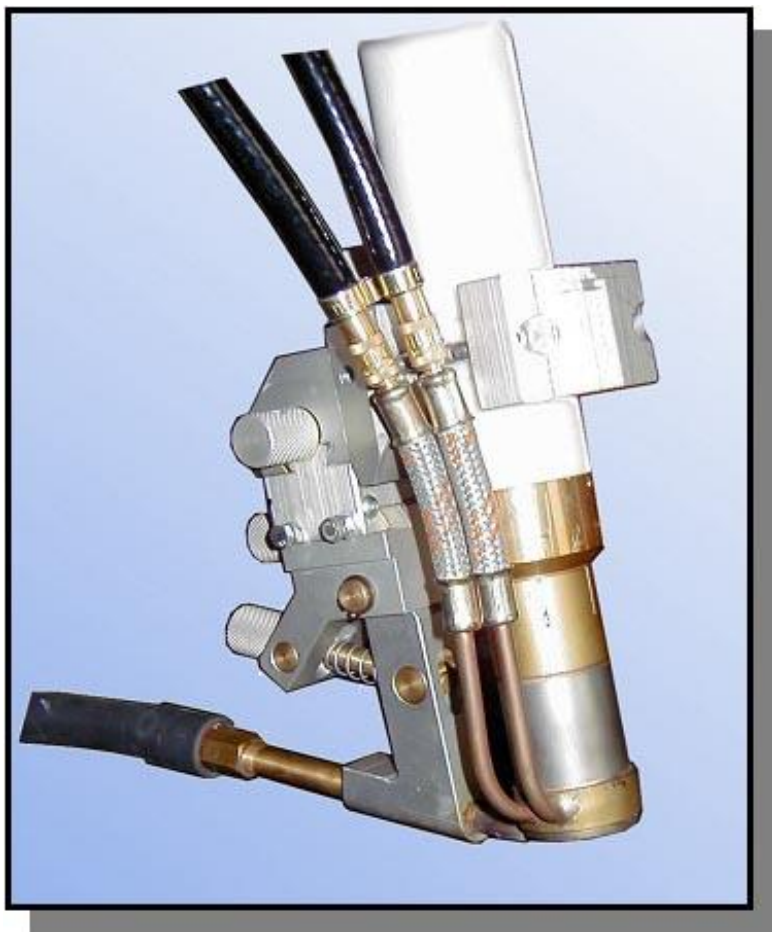
Povrch

proud 20 A

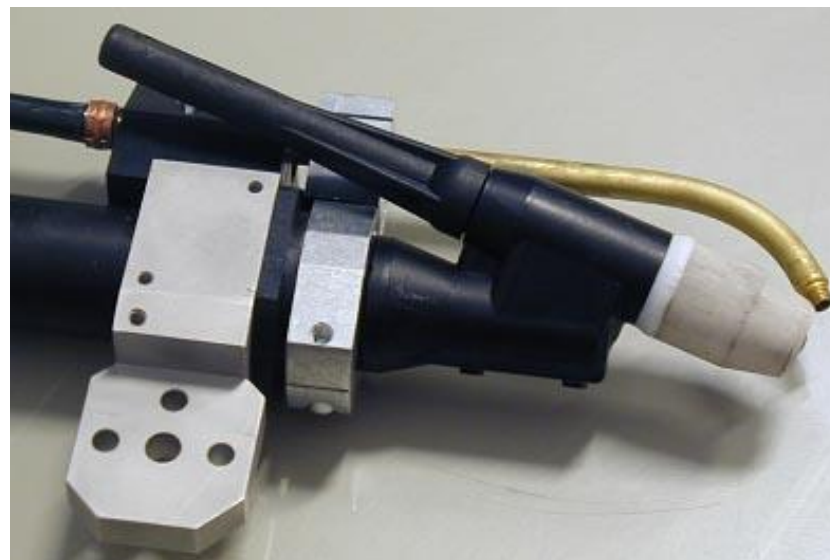
Kořen



Dovolené proudové zatížení  
100% (350A -pól, 100A +pól)



Dovolené proudové zatížení  
100% (150 A -pól, 50 A +pól)





# Výhody plazmového svařování



---

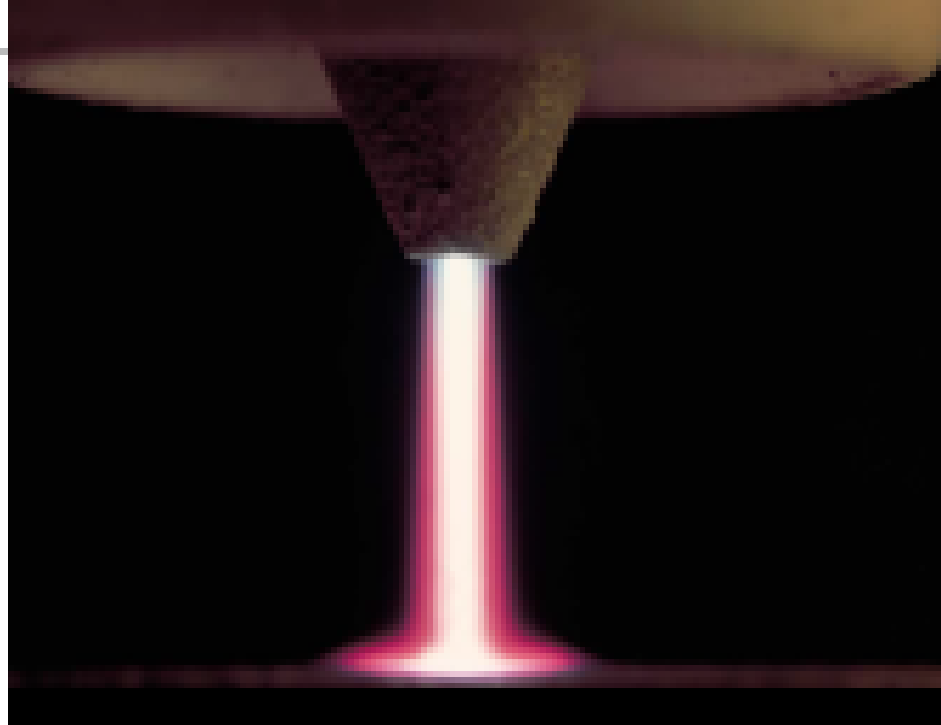
- jednoduchá úprava svarových ploch středních tloušťek
- svařování bez podložení kořene
- velmi dobrý průvar i tvar svaru
- možnost mechanizace
- vysoká čistota svaru bez pórů a bublin
- dobré mechanické vlastnosti svarového spoje
- možnost svařování střídavým i impulsním proudem.

# Rozdíl v koncentraci oblouku

## TIG



## Mikroplazma



**Při nízkých proudech (pod 20 A) je TIG oblouk velmi nestabilní, zhasíná a nelze jej využít na svařování**

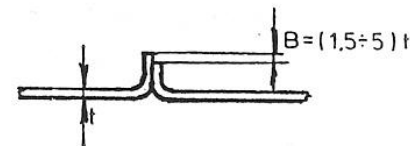
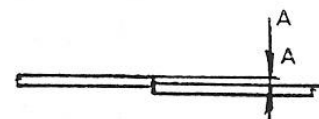
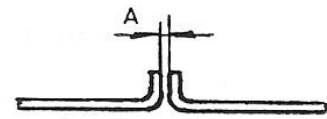
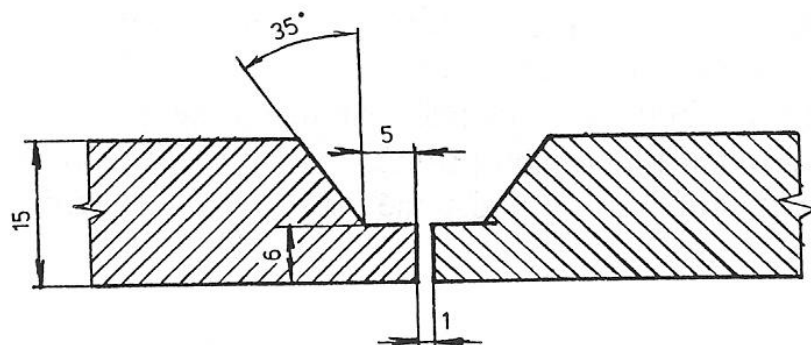
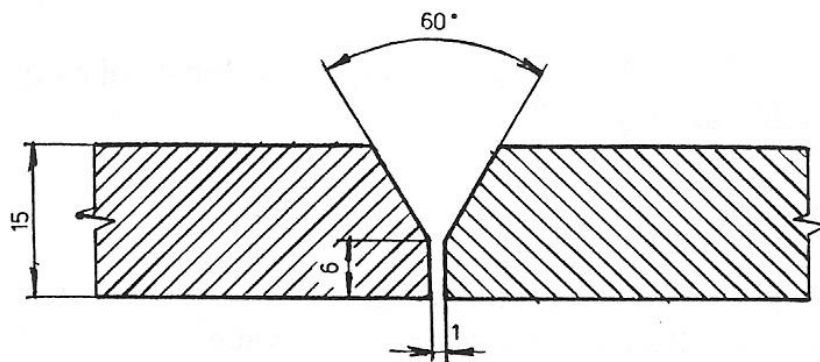


# Mikroplazmové svařování

---

- 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.

# Úpravy svarových ploch pro plazmové a mikroplazmové svařování oceli.



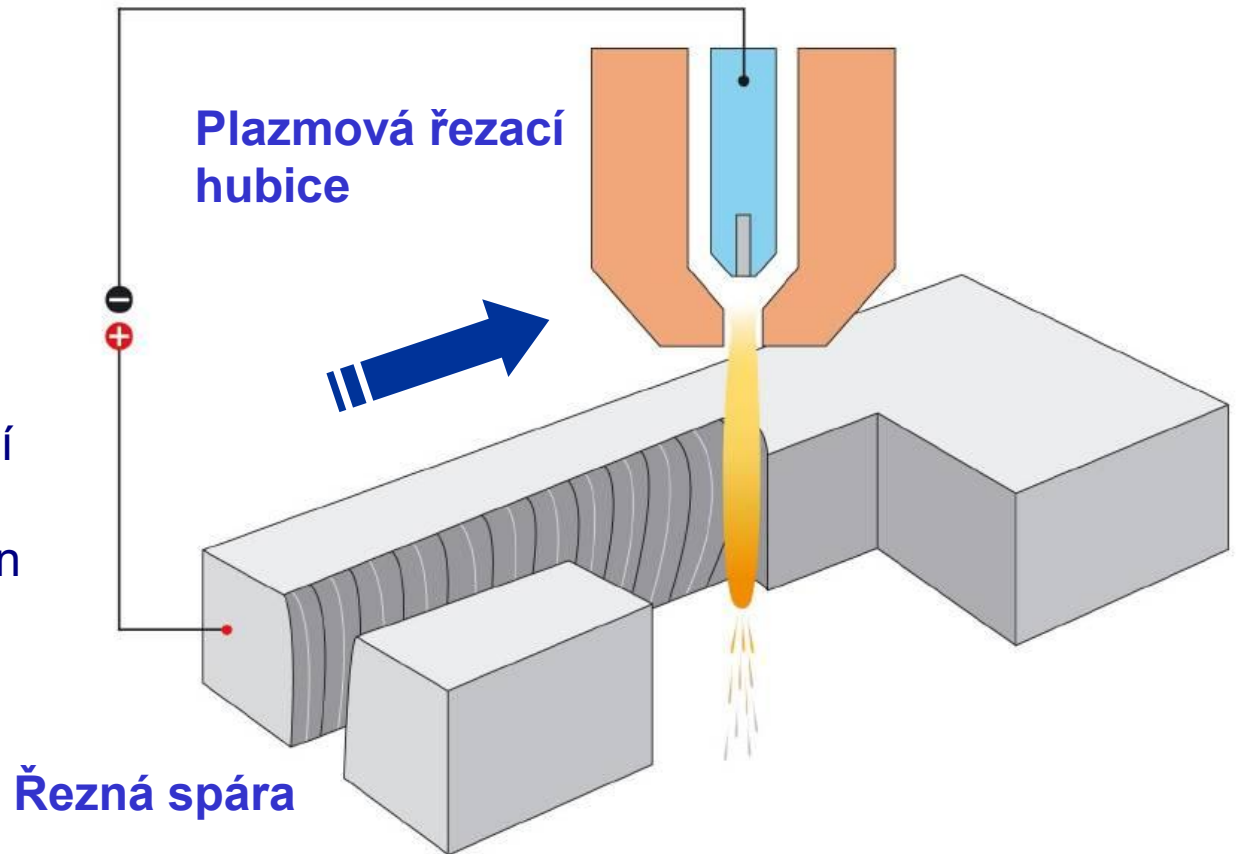
# Princip plazmového řezání

Termický proces řezání

Zúžený oblouk,  $U$  až 400V  
(plazmový paprsek)

Vysoká hustota energie  
taví materiál - bez spalování

Roztavený kov je vyfoukáván  
z řezné spáry dynamickým  
účinkem plazmatu , který  
překoná povrchové napětí  
taveniny



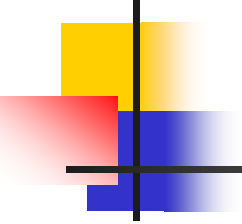


# Řezání plazmou

---

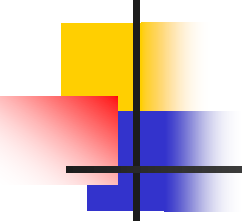
**Plynová plazma** je stabilizovaná směsí Ar + H<sub>2</sub>, elektroda je wolframová a používá se především pro řezání vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu, mědi a dalších kovů.

**Vzduchová plazma** je současně velmi rozšířená a její provoz je ekonomicky velmi výhodný do tloušťky cca 40 mm na řezání oceli. Ke stabilizaci se používá stlačený vzduch (0,4 až 0,8 MPa) o vysokém průtočném množství až 180 l.min<sup>-1</sup>.

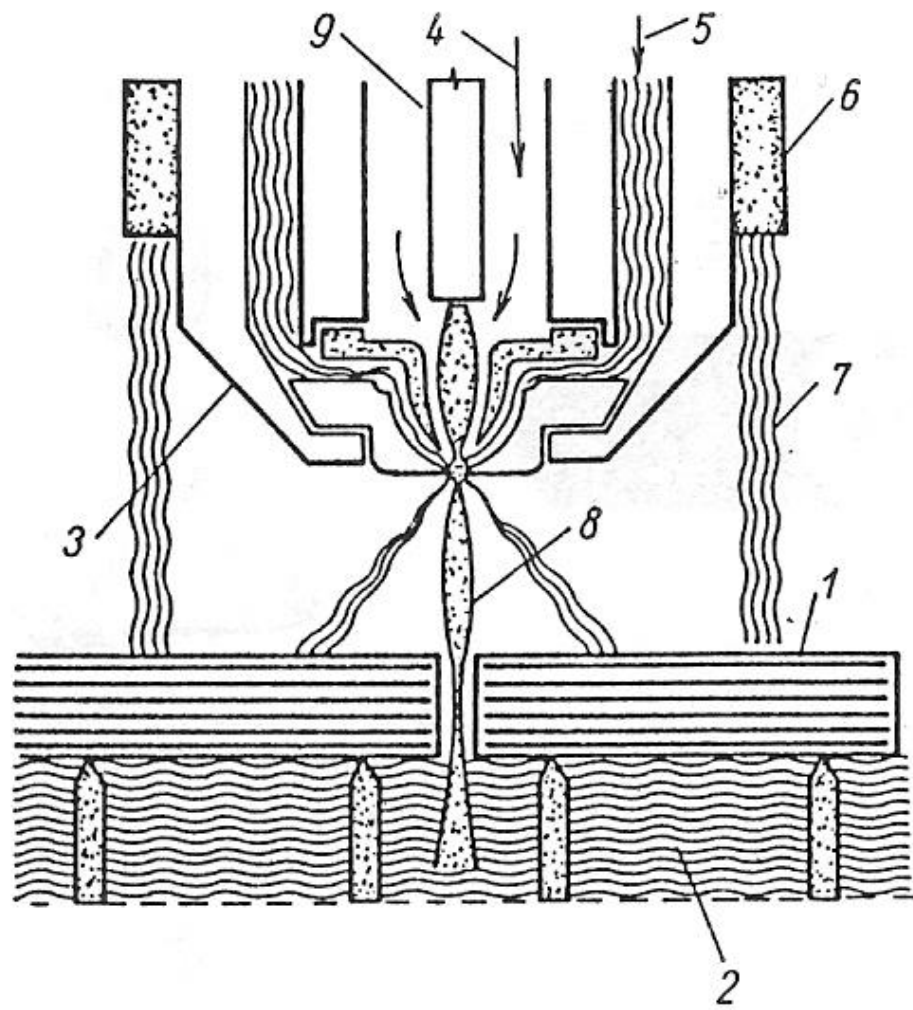
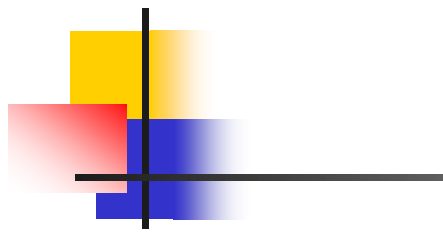


---

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

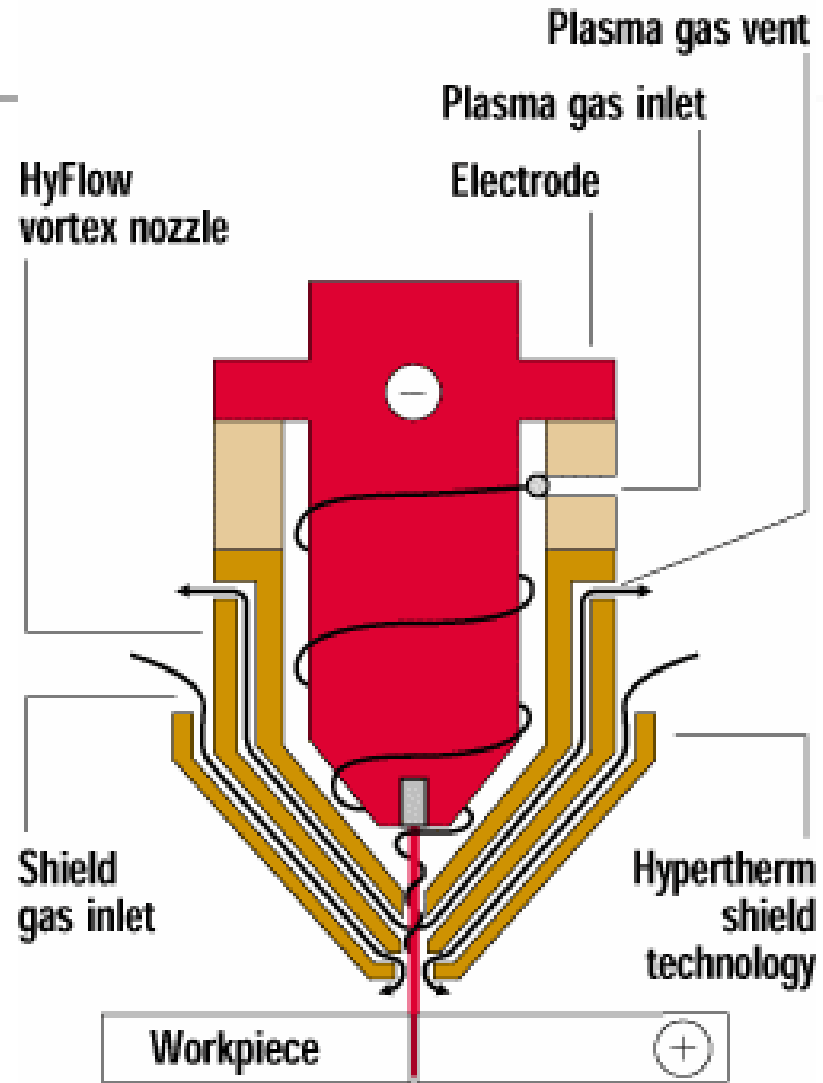
- 
- **Dusíková plazma** kombinovaná s injekčním přívodem vody je určena především pro řezání velkých tloušťek vysokolegovaných ocelí. Konstrukčním uspořádáním hořáku se k okrajovým vrstvám plazmového paprsku tangenciálně přivádí voda (někdy oxid uhličitý). Vytváří se vodní vír, který ochlazuje vnější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



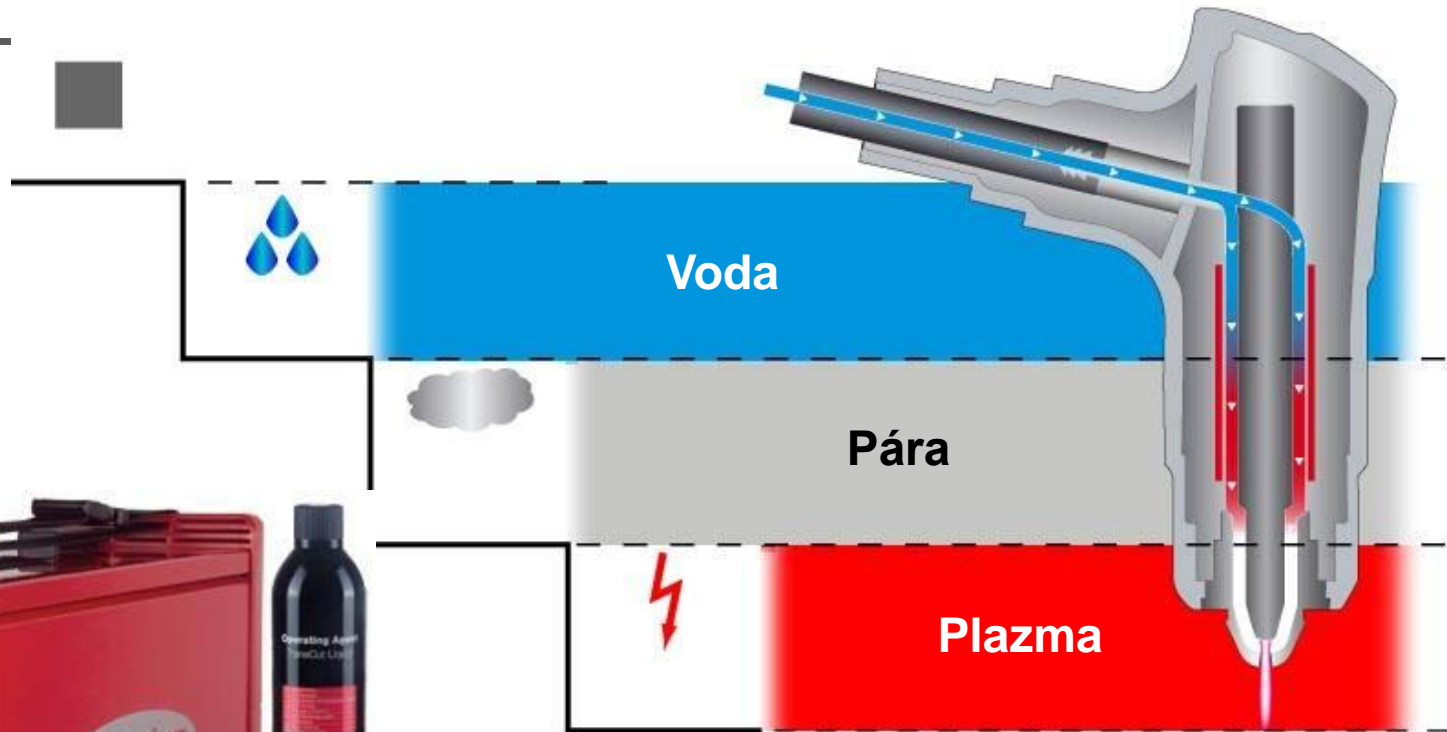
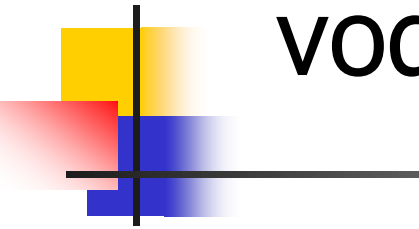


# HD plazma

## Patented HyFlow vortex technology



# Nový princip stabilizace plazmy - vodní parou





- **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

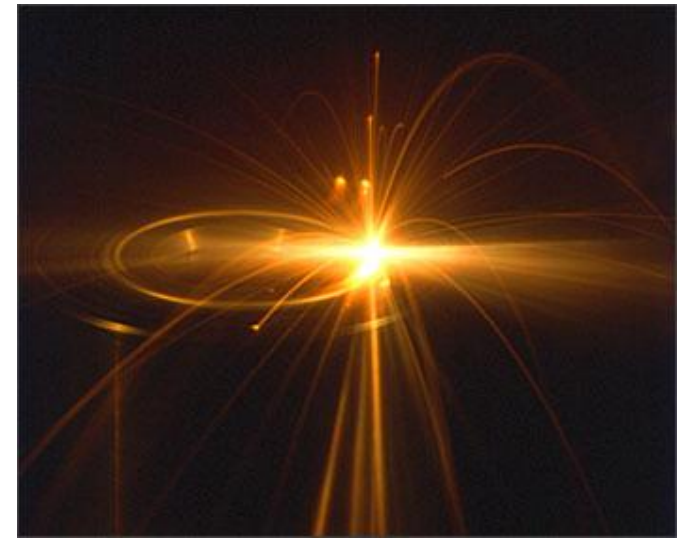
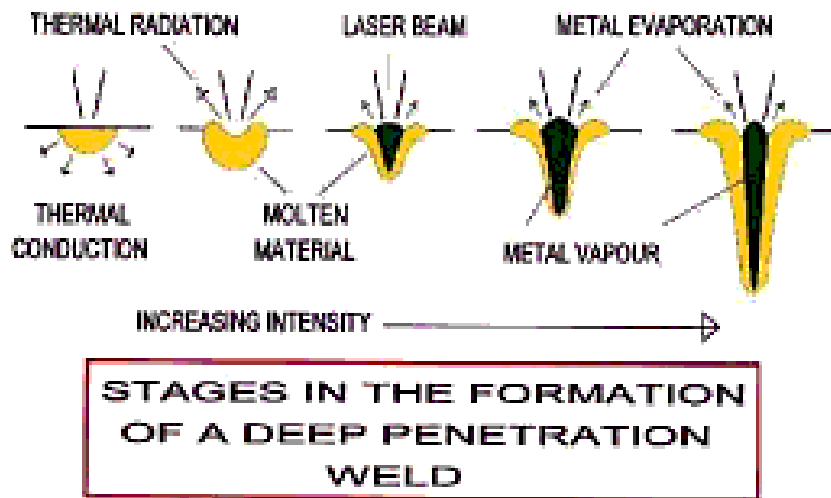
- **Nevýhody plazmového řezání:**

- 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.

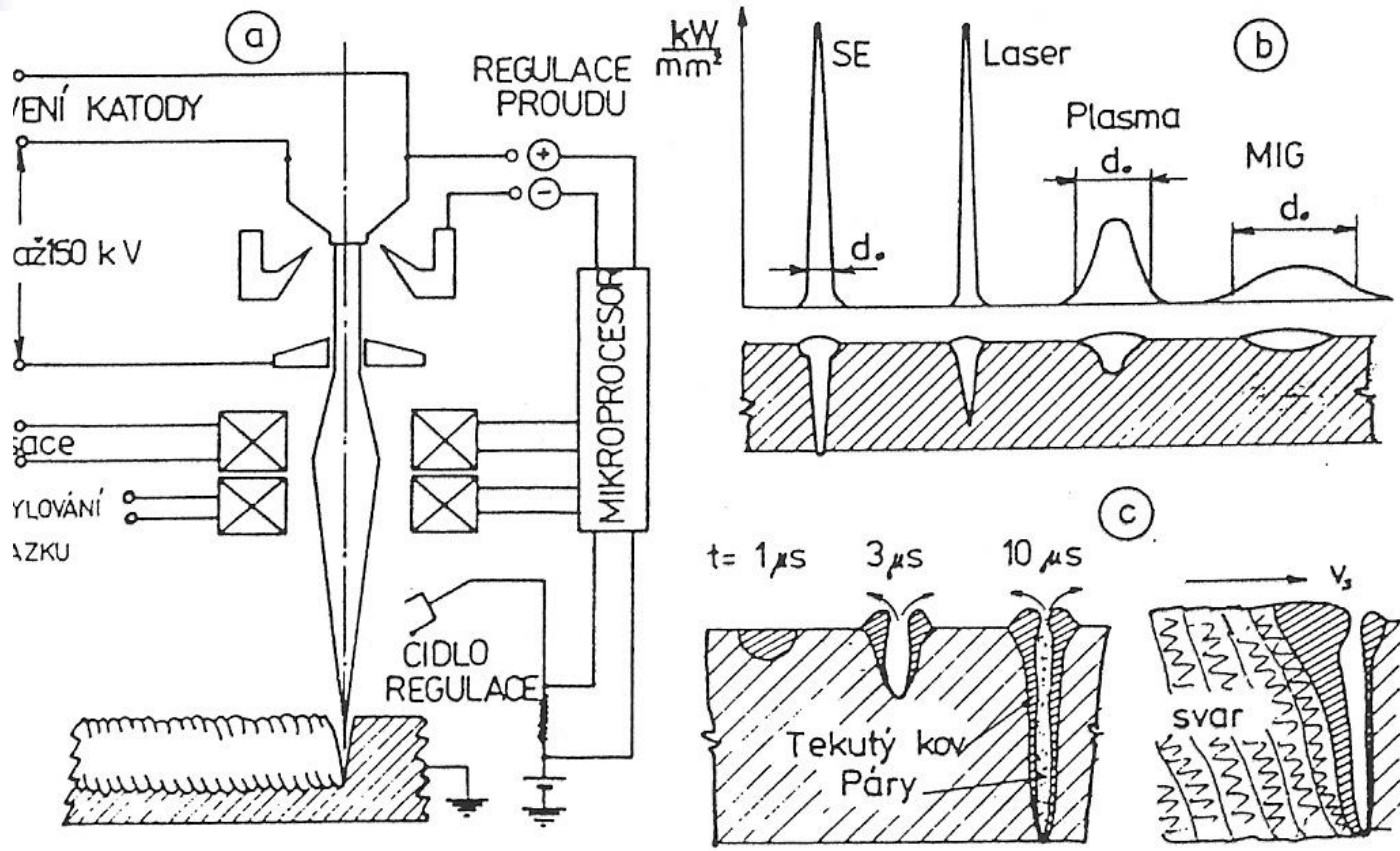
# Elektronové svařování

## Historie metody

- 1948 – Karl-Heinz Steigerwald prováděl experimenty s vysokým urychlovacím napětím pro elektronovou mikroskopii – vzorky se při vysokých hodnotách urychlovacího napětí začaly tavit.
- Tavné svařování, kinetická energie rychle letících elektronů se mění na tepelnou při dopadu na povrch svařovaného materiálu.
- Dva módy svařování –
  - 1) klasická tavná metoda – prakticky se nepožívá
  - 2) svařování metodou hlubokého závaru – tzv. metody klíčové dírky – poprvé použita v roce 1958 pro svařování plechu o tl. 5 mm ze slitiny Zircalloy. – umožňuje svařovat tloušťky 200 mm na jeden průchod paprsku. Hlavní přednost elektronového svařování.



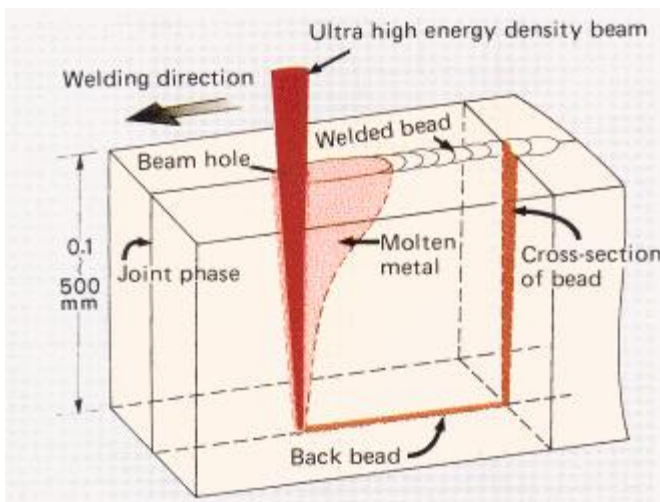
# ELEKTRONOVÉ SVAŘOVÁNÍ



# Elektronové svařování

## Hluboký závar – svařování pomocí klíčové dírky

- Pro vytvoření efektu klíčové dírky je nutná koncentrace energie na povrchu nad  $10^5$  W cm<sup>-2</sup>
- Příkon energie je tak vysoký, že základní materiál není schopen odvádět teplo, kov se lokalizovaně silně přehřívá a intenzivně se vypařuje.
- Postupně se vytvoří úzký kanálek s vnitřním přetlakem par kovu a obálkou tekutého kovu, který při pohledu shora tvarem připomíná „klíčovou díрку“.
- Jednotlivé složky kanálku jsou ve vzájemné rovnováze, nebo kvazi rovnováze.

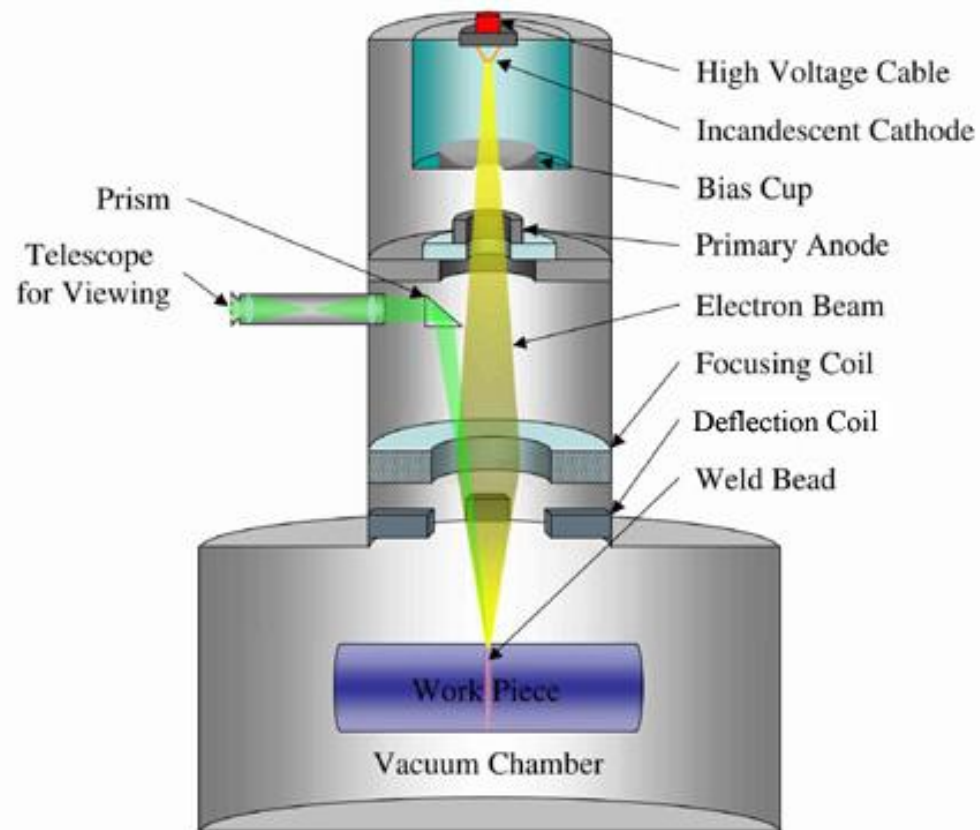




# Elektronové svařování

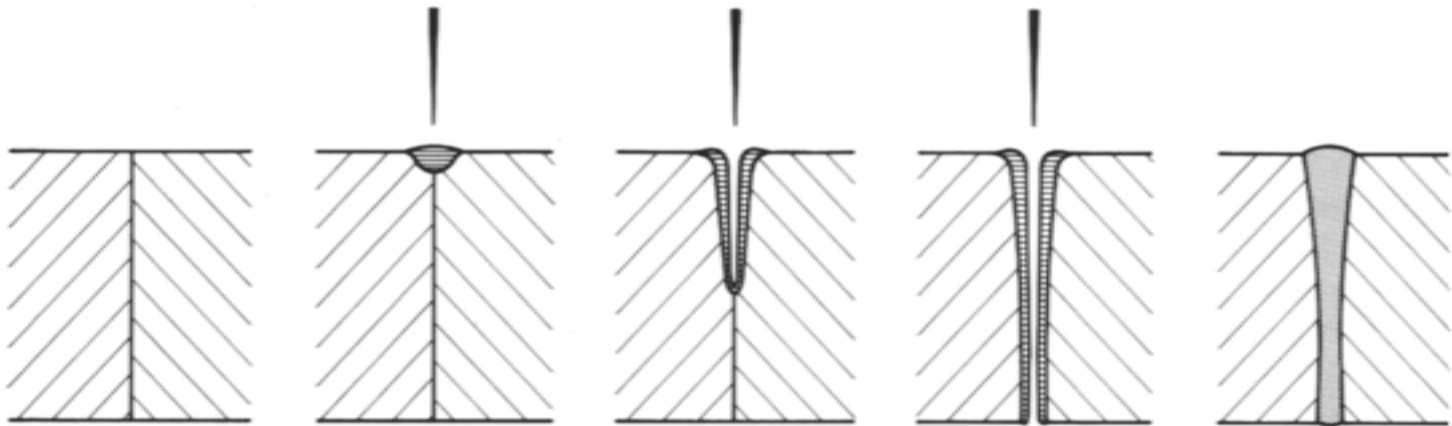
## Princip metody

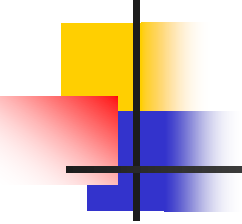
- Zdroj je vakuovaná nádoba, na jednom konci opatřená přímo nebo nepřímo žhavenou emisní elektrodou a na druhém konci vybavená oddělovacím uzávěrem, který je kombinovaný s hranolem pozorovací optiky.
- Vakuum je důležité pro zajištění termoemise elektronů, tepelné a chemické izolace katody, zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami a zamezení srážkám elektronů s molekulami vzduchu.





- 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 200 až 400 mm.

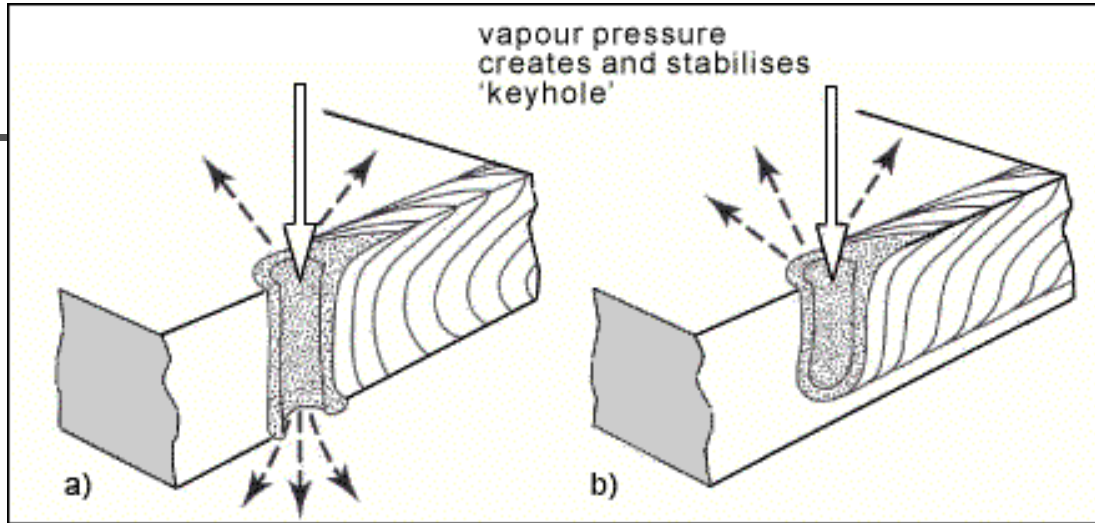


- 
- Urychlení elektronů ve vakuu se dosahuje vysokým napětím jenž mezi katodou a anodou vytváří potenciál 30 až 300 kV. Při průchodu elektronu homogenním elektrickým polem získá kinetickou energii
  - Při výpočtu kinetické energie elektronů se vychází také ze vztah

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

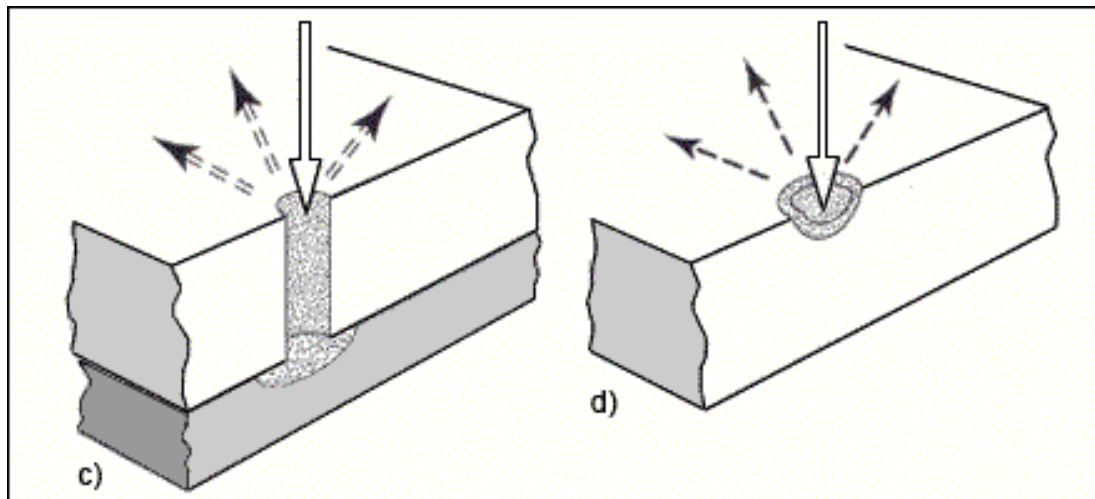
**full penetration EB  
welding**

**b) partial penetration EB  
welding**

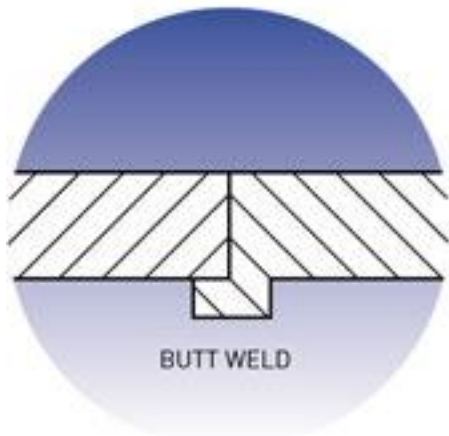
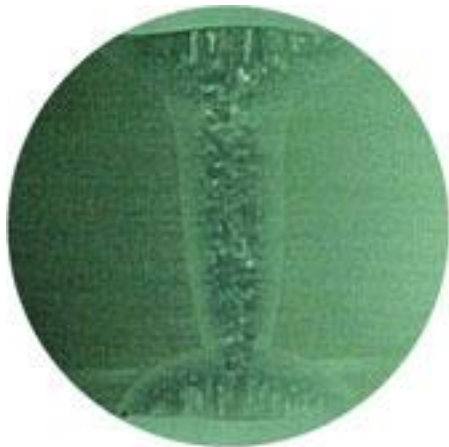


**c) EB drilling**

**d) EB texturing**



# Tvary svarů svazkem elektronů



**Aluminum [2.250]**  
[Not Maximized]

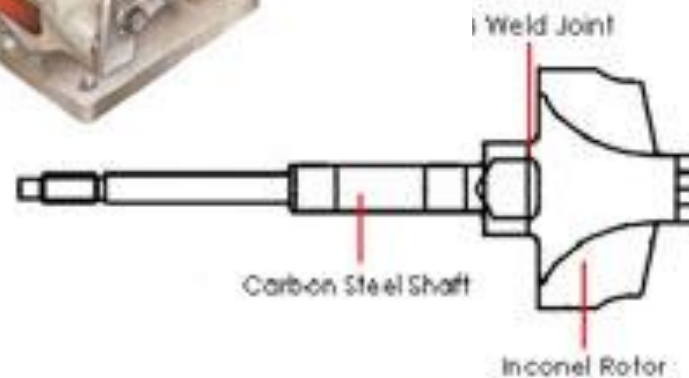


**Carbon Steel**  
6" total-double sided  
-3.250" per side



**Inconel 718**  
2.375" Depth  
(Not Maximized)

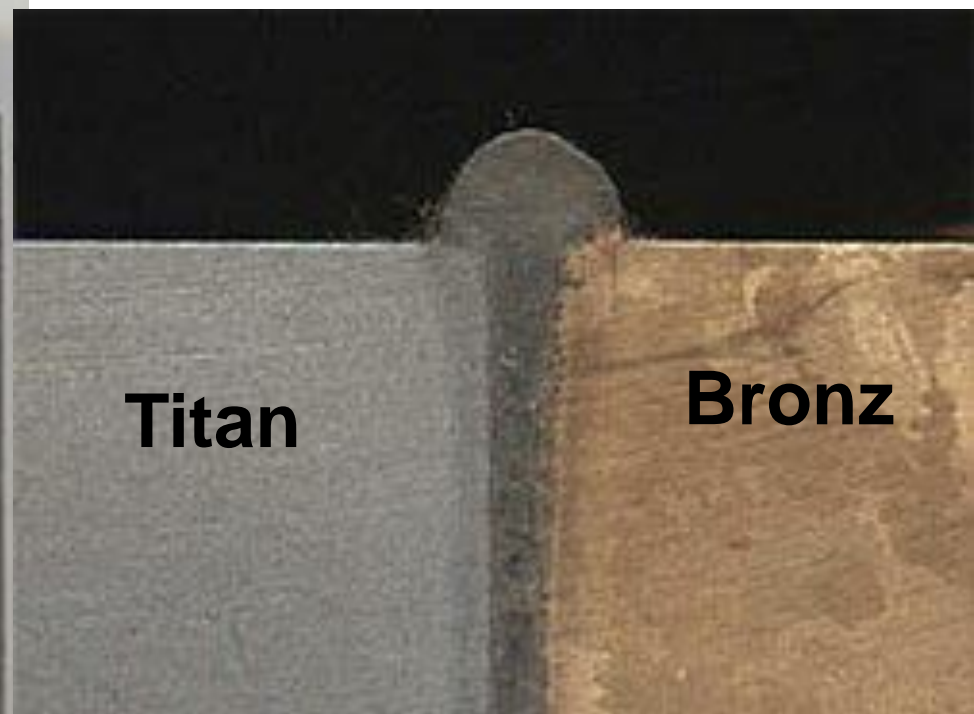
# Svařování hřídele turbokompresoru





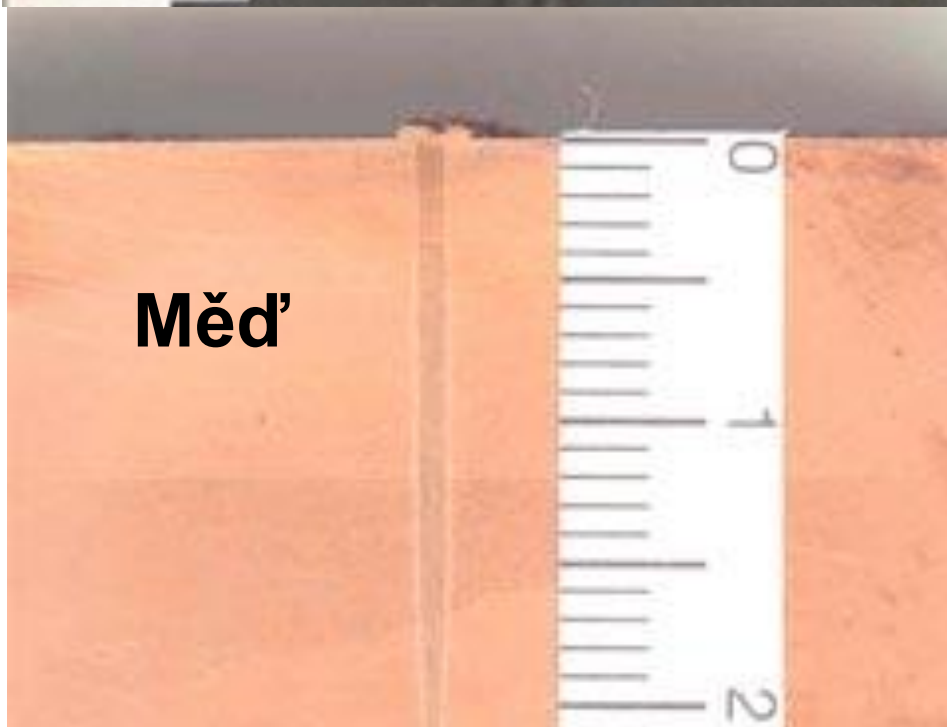


**Hliník**

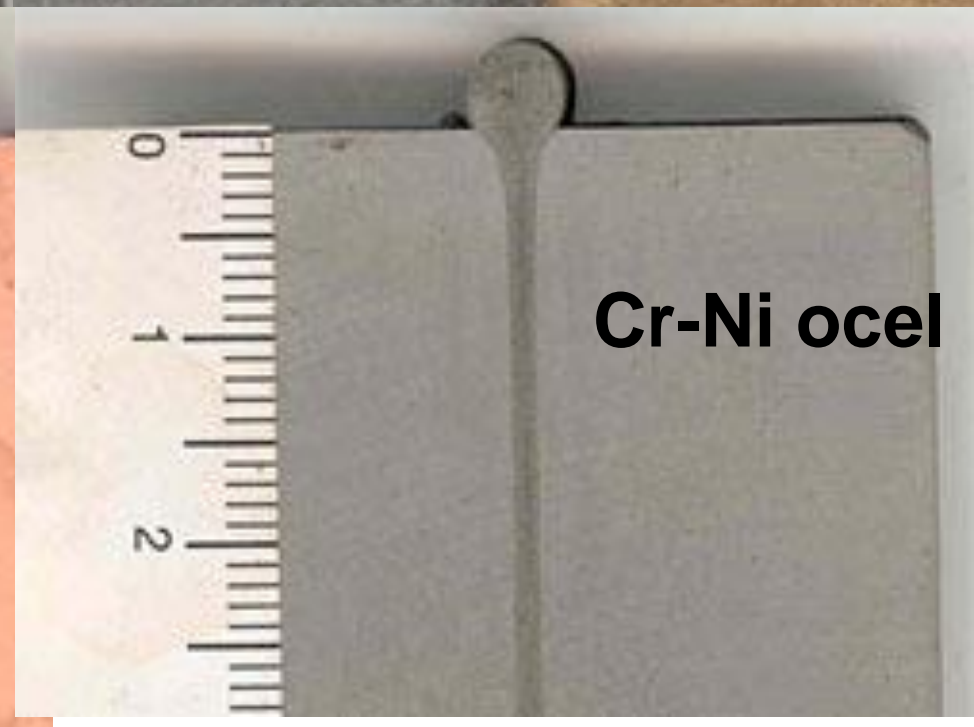


**Titan**

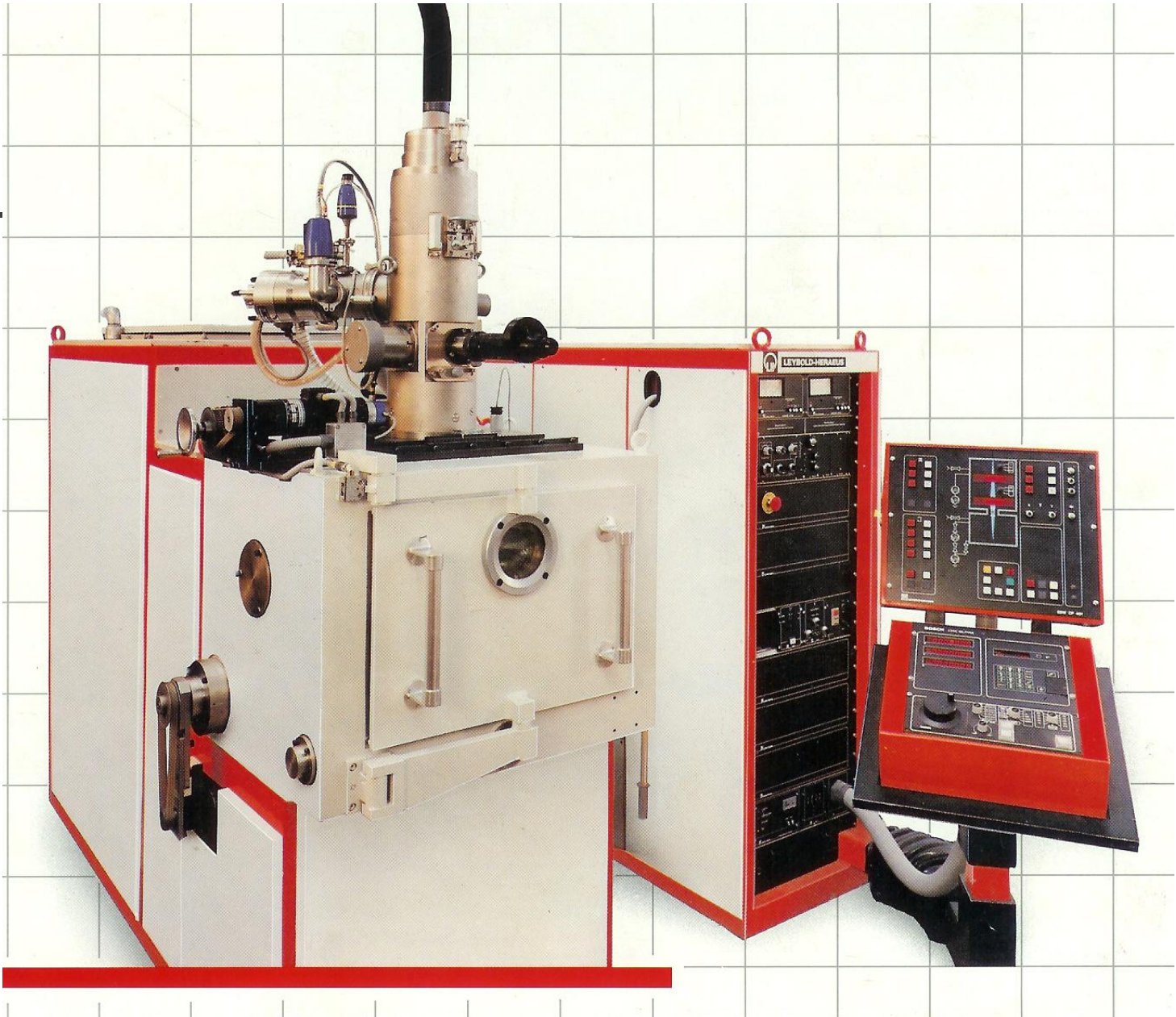
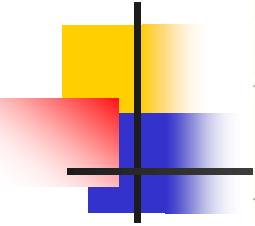
**Bronz**



**Měď**



**Cr-Ni ocel**

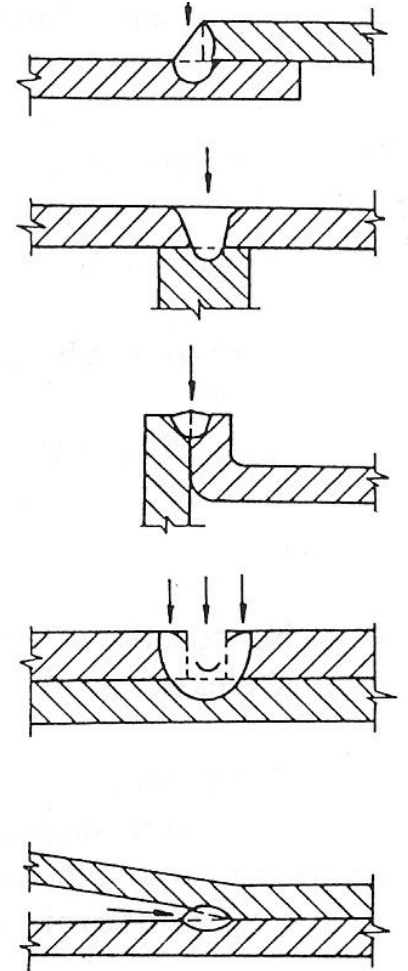
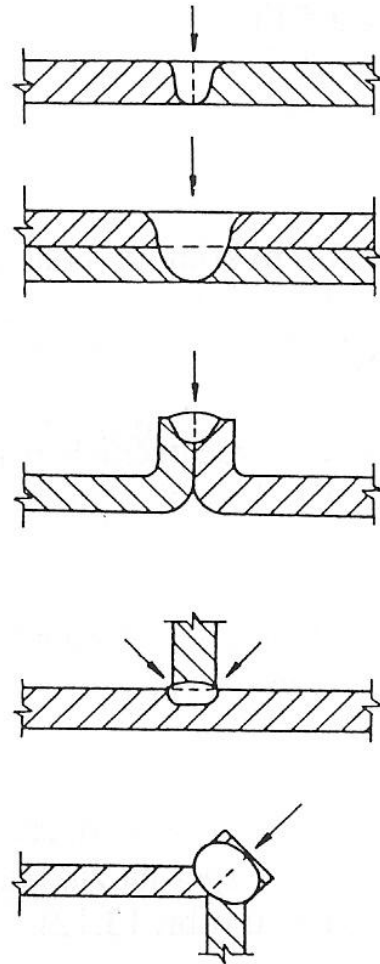
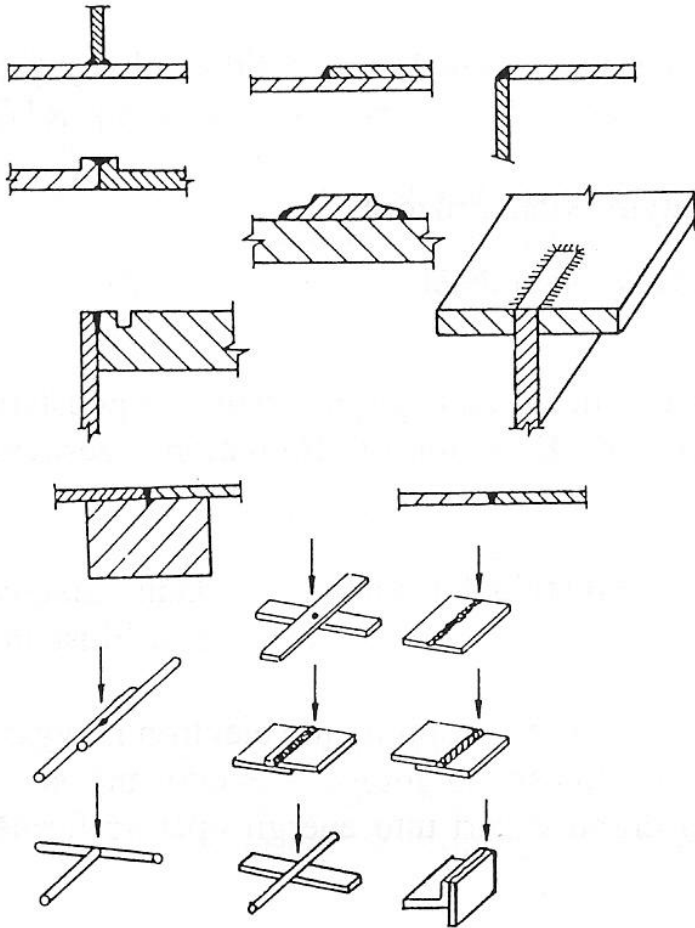


# Svařitelnost materiálů.

- 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 vysokotavítené a žárupevné slitiny typu Inconel, Nimonic.



4. КОШИКОВСКОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ





# Elektronové svařování

## Výhody metody

---

- Svary dosahují vysoké jakosti (bez pórů a kontaminace atmosférickými plyny) a mohou být prováděny vysokou rychlostí.
- Zóna natavení svaru a TOO je extrémně úzká.
- Díky silně koncentrovanému svazku jsou deformace po svařování téměř zanedbatelné.
- Vysoké vakuum dovoluje svařovat silně reaktivní kovy jako je Ti, Zr s vysokou čistotou svarového kovu.
- Svarové spoje jsou po svaření čisté bez oxidů, strusky a zbytků tavidel, není požadováno žádné čištění po svaření.
- Svary provedené elektronovým paprskem mají extrémní poměr hloubky závaru k šířce. Na jeden závar lze dosáhnout extrémní průvar
- Malé tenké součásti mohou být svařeny s masivní součástí
- Tupé svary lze provádět na foliích od 0,025 mm.
- Na nerezích o síle 100 mm lze elektronovým paprskem provést jednovrstvý svar s plným průvarem rychlostí přibližně  $170 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .
- Náklady na energii jsou velmi malé v porovnání jinými metodami svařování.
- Kontrola polohy svařování je velmi přesná, svary mohou být provedeny na dlouhou vzdálenost.
- Rafinační účinky vakua.
- Možnost přenosu energie i na vzdálenost větší jak 500mm.

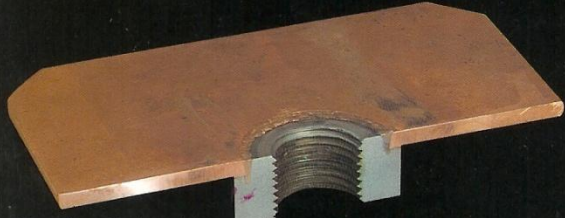
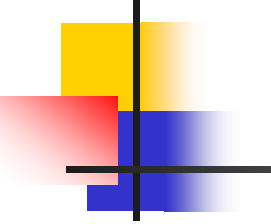


# Elektronové svařování

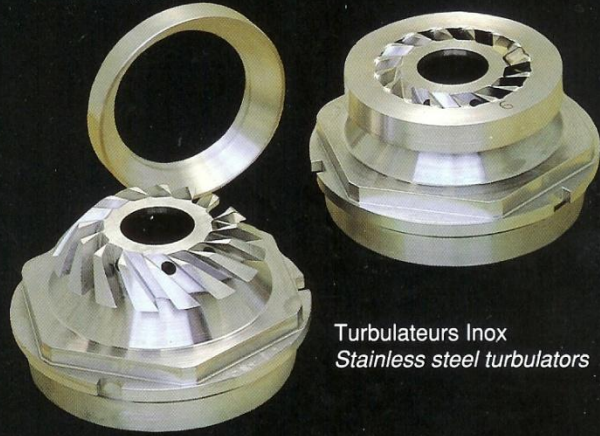
## Nevýhody metody

---

- Pořizovací náklady svařovacího zařízení jsou velmi vysoké; přenosné provedení svařovacího zařízení je ojedinělé ale jsou v současnosti dostupné.
- Svařování se musí provádět ve vakuové komoře chráněné vakuovým těsněním.
- Významný časový prostož a finanční náklady tvoří vakuování komory při zavezení nové dávky.
- Jako jediná metoda svařování vyzařuje RTG záření (od urychlovacího napětí 60 kV a výše).
- Paprsek dopadá z elektronového děla na povrch po přímce; stíněné spoje nelze svařit.
- Obsluha a návrh technologie vyžaduje vysoce kvalifikovaný personál.
- Maximální velikost svařence je omezena velikostí vakuové komory. Po vakuování komory je svařenec nepřístupný, jakákoliv dodatečný pohyb svařence vyžaduje speciálně navrhované manipulátory.
- V případě velkých vakuových komor je elektronové dělo umístěno na robotickém ramenu speciálně navrženém pro práci ve vakuu.
- Vypařování některých kovů ve vakuu, vakuová komora se pokovuje.



Soudure Cuivre / Inox  
Copper / Steel weld



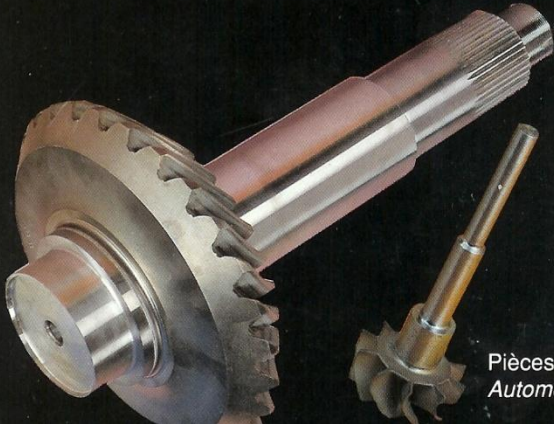
Turbulateurs Inox  
Stainless steel turbulators



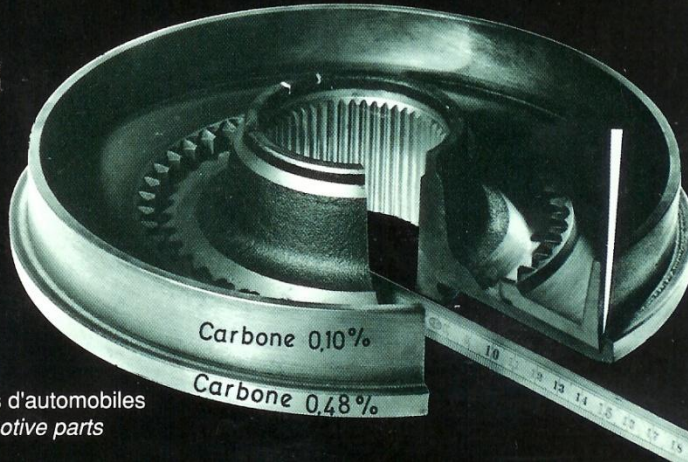
Turbine à gaz  
Gaz turbine



Tubes Cuivre épais  
Thick Copper tubes



Pièces d'automobiles  
Automotive parts



Carbone 0,10%  
Carbone 0,48%

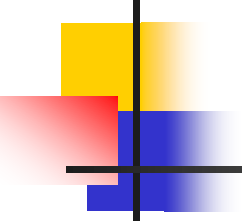


# LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ

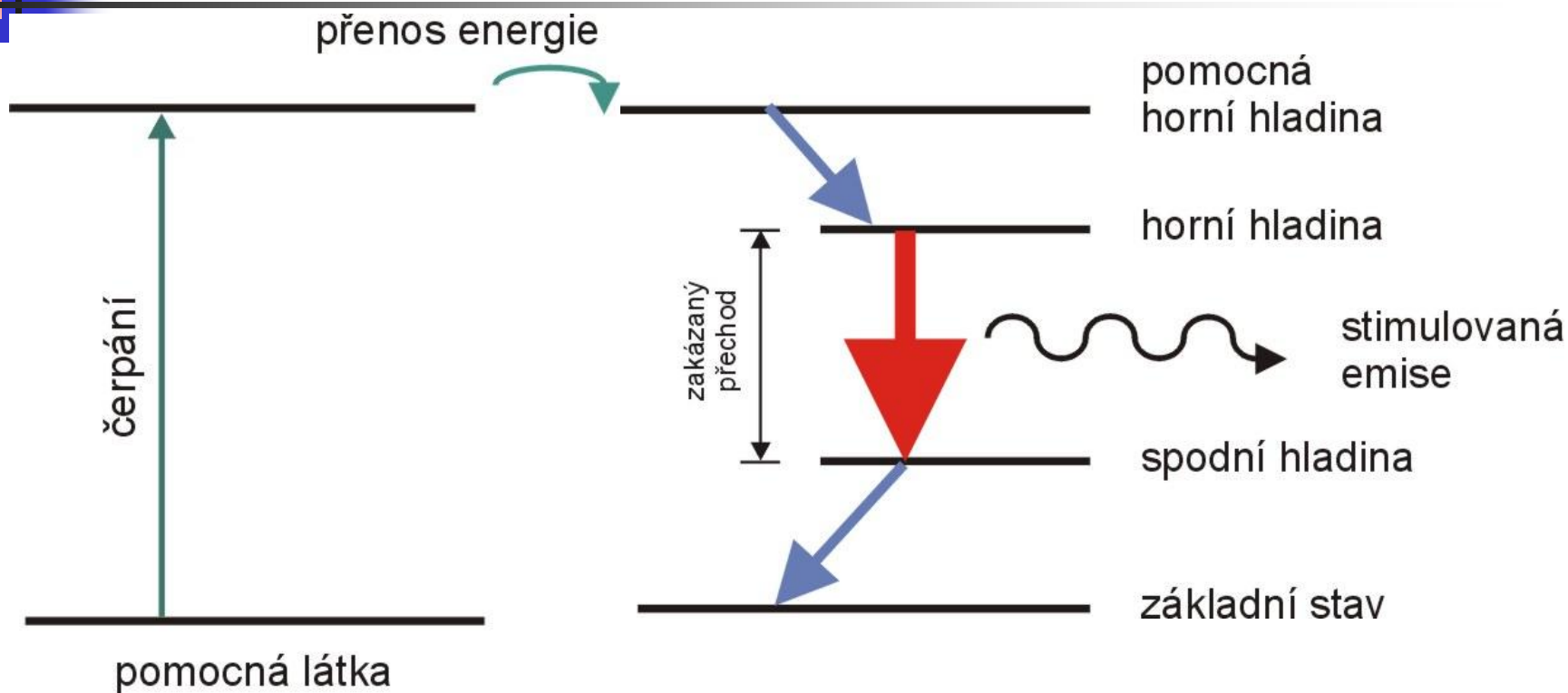
---

- 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.

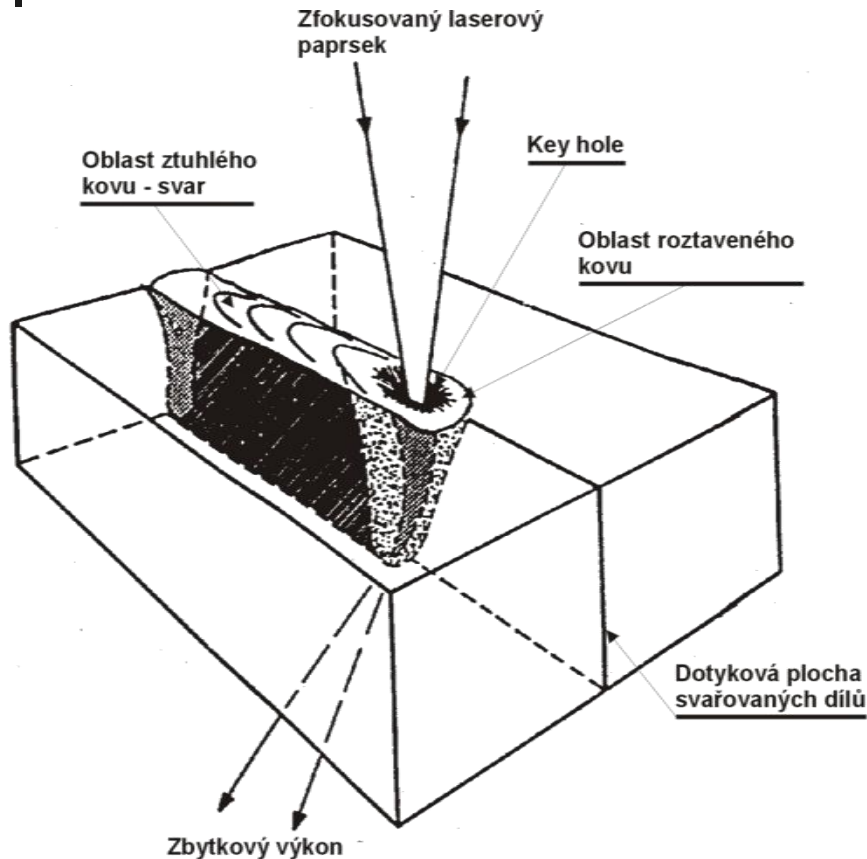


- 
- **stimulovaná emise záření** a je využitelná pro zesílení záření jedné vlnové délky, na rozdíl od spontánní emise, kdy vyzářená energie ve formě fotonů různých vlnových délek je nevyužitelná pro zesílení, ale je ztracena ve formě tepla.
  - Energie fotonů se rovná rozdílu energetických hladin:
$$h \cdot f_{12} = E_2 - E_1$$
  - kde  $h$  je Planckova konstanta  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s
  - $f_{12}$  je frekvence kmitání odpovídající přechodu  $E_1$  až  $E_2$ .

# Princip funkce laseru



# TVORBA SVARU

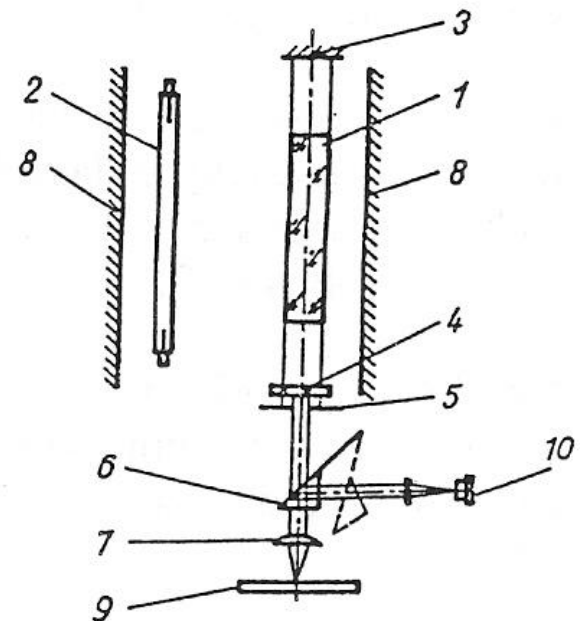


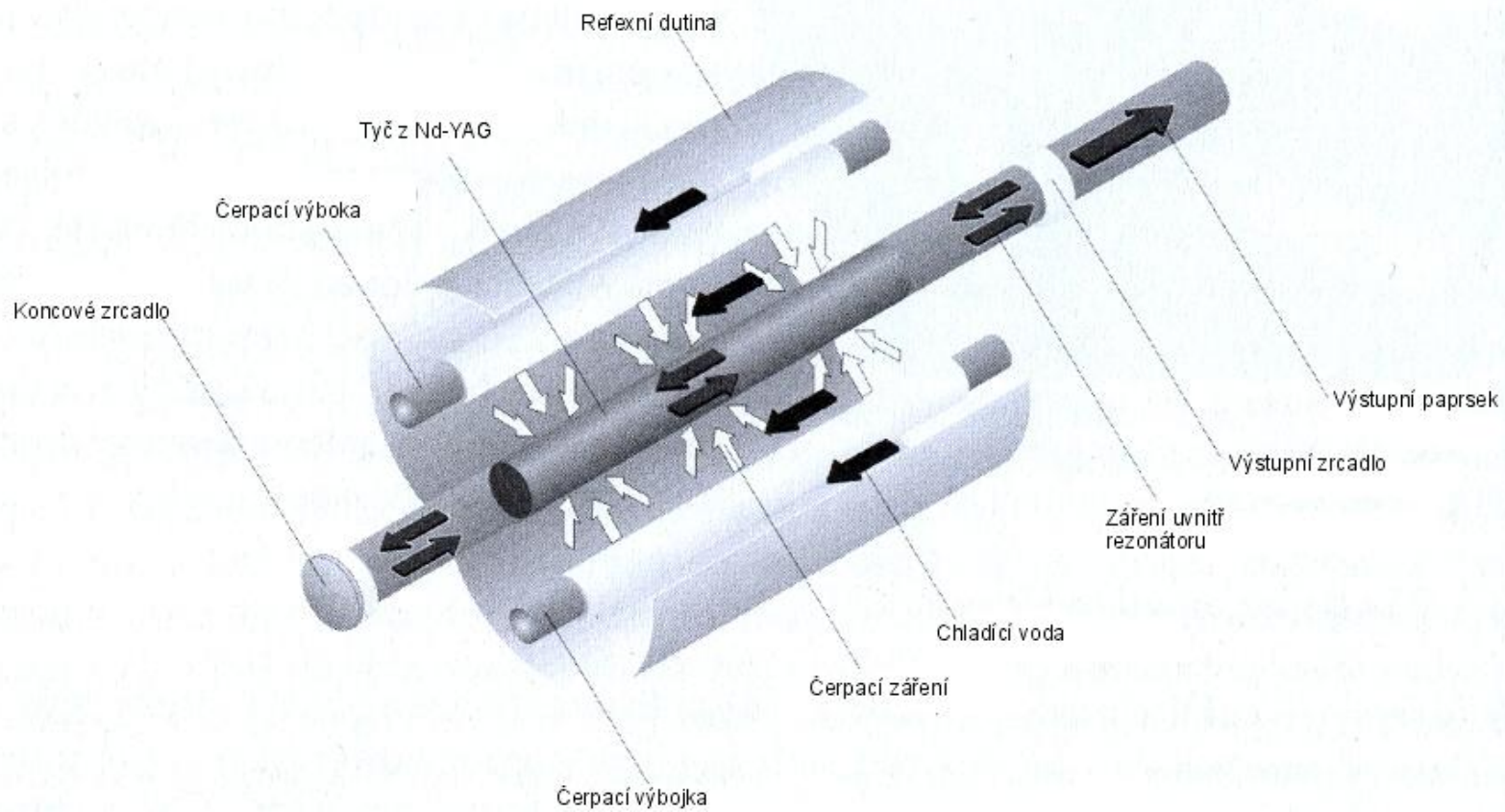
Výborné výsledky svařování se dosahují u vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu. Lasery umožňují velmi rychlý ohřev a svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí – Cu, Ag, Al i materiály s vysokou teplotou tavení W, Mo, Ta, Zr, Ti atd.



# PEVNOLÁTKOVÉ LASERY

	Vlnová délka $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
■ Rubín $\text{Cr}^3 + \text{Al}_2 \text{O}_3$	0,694
■ neodýmové sklo $\text{Nd}^3 + \text{sklo}$	1,060
■ Nd:YAG $\text{Nd}^3 + \text{Y}_3 \text{Al}_5 \text{O}_{12}$	1,065





# Nd-YAG laser

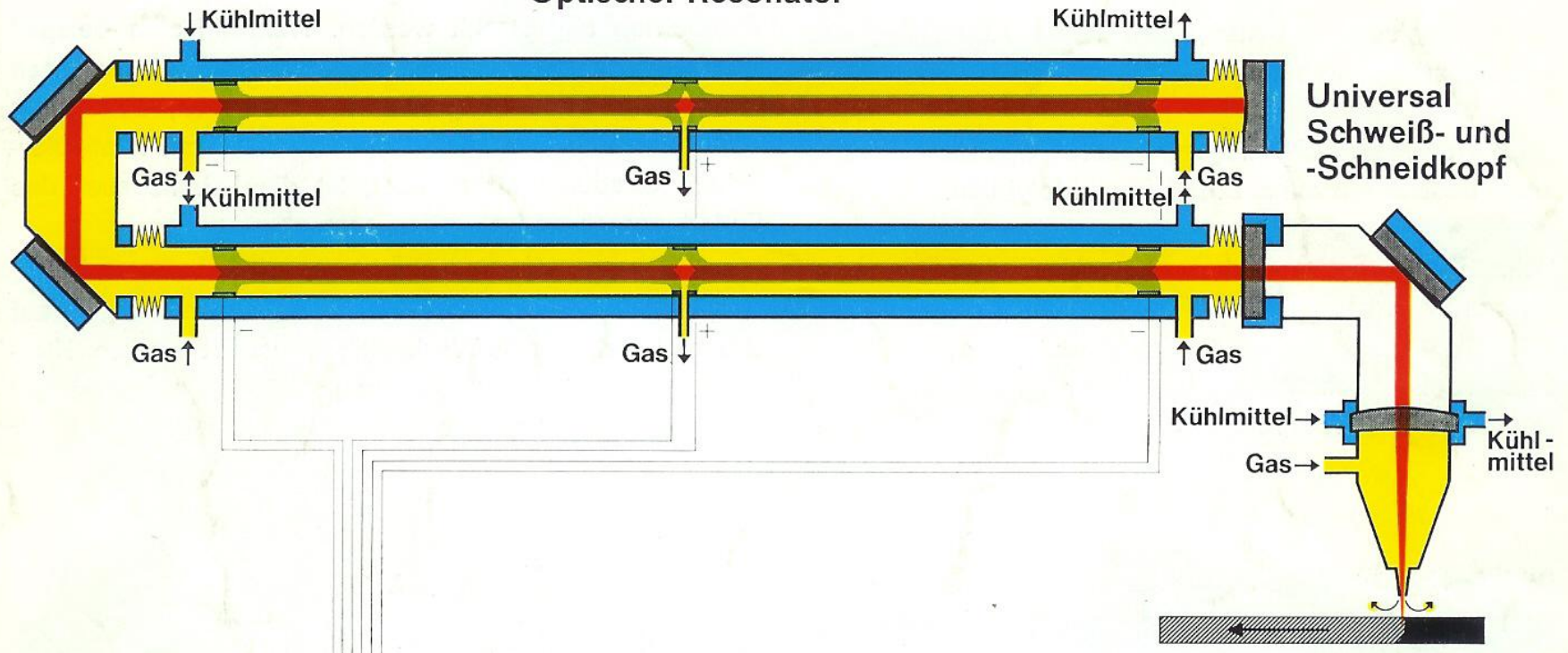


pevnotátkový laser  
buzení optické (výbojky, polovod. lasery)  
kontinuální i pulzní provoz  
pracovní vlnová délka 1,06  $\mu\text{m}$   
výkon cw do 6 kW  
účinnost 2-3%



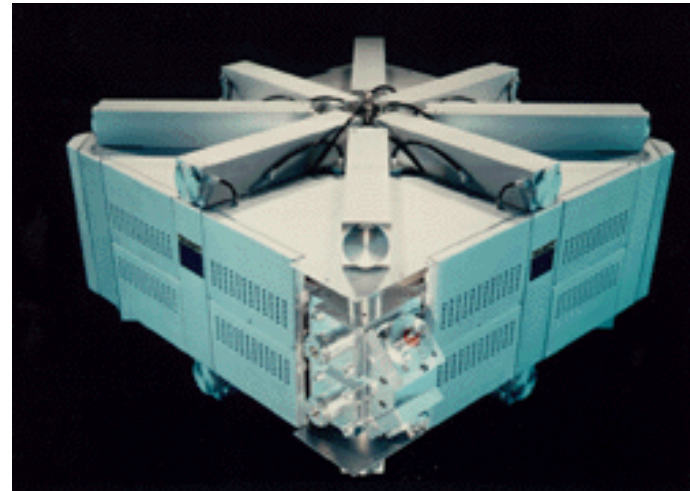
# PRINCIP LASERU CO<sub>2</sub>

Optischer Resonator



# CO<sub>2</sub> LASER

- plynový laser (He + N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>)
- buzení elektrickým výbojem
- kontinuální i pulzní provoz
- pracovní vlnová délka 10,6  $\lambda$  ( $\mu$  m)
- výkon do 20 kW
- účinnost 5 – 10 %

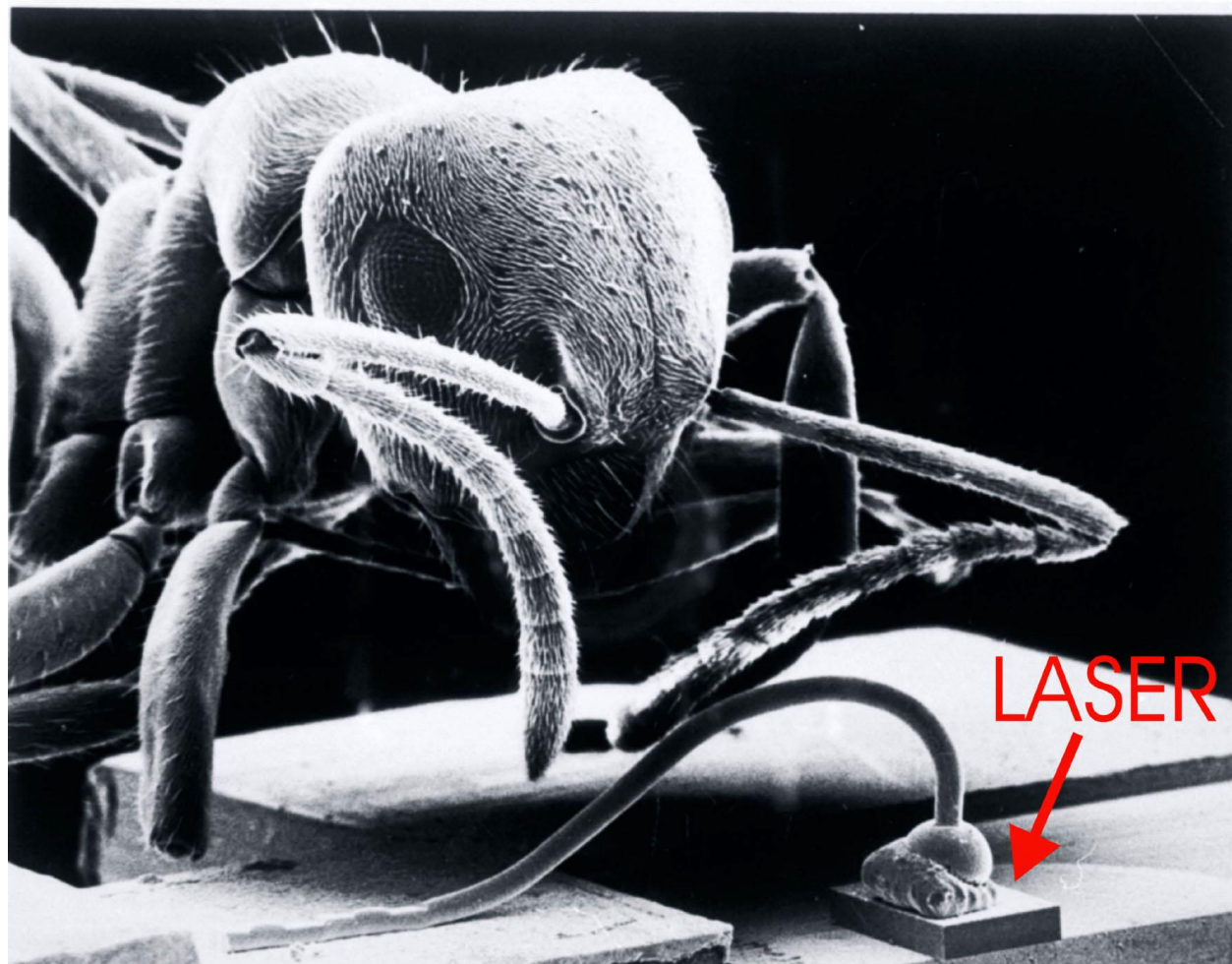


# Fokusovaný svazek fotonů má tyto hlavní vlastnosti:

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

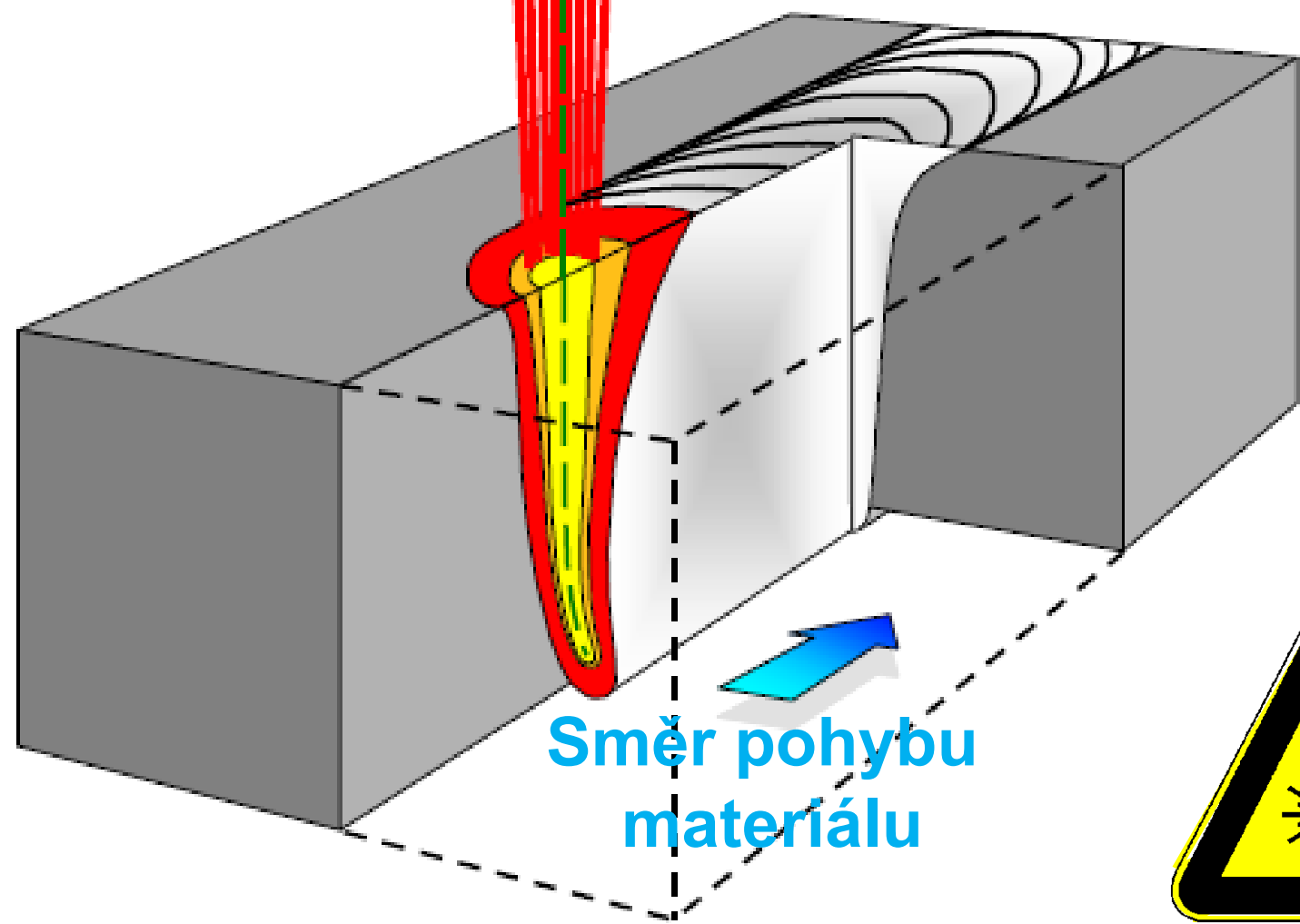
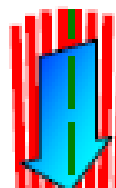


# Svařování laserem



# Keyholing – průvar v podobě „klíčové dírky“

Paprsek laseru



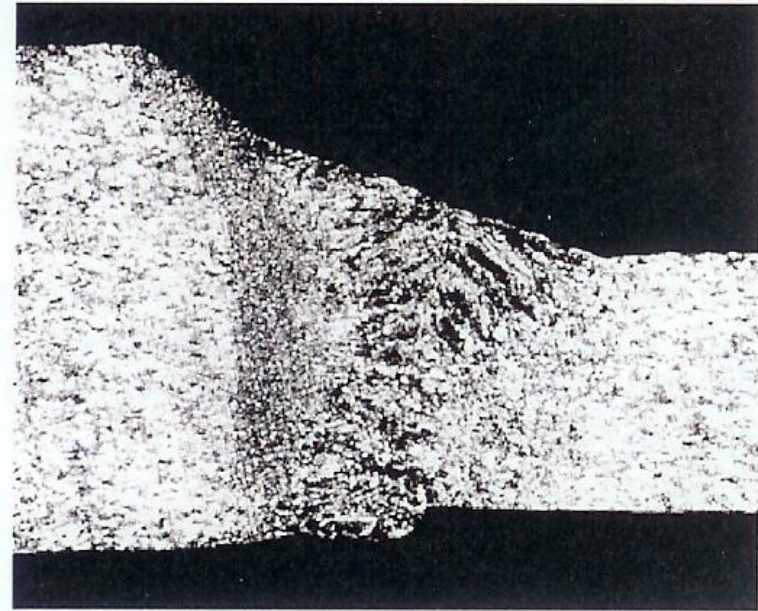
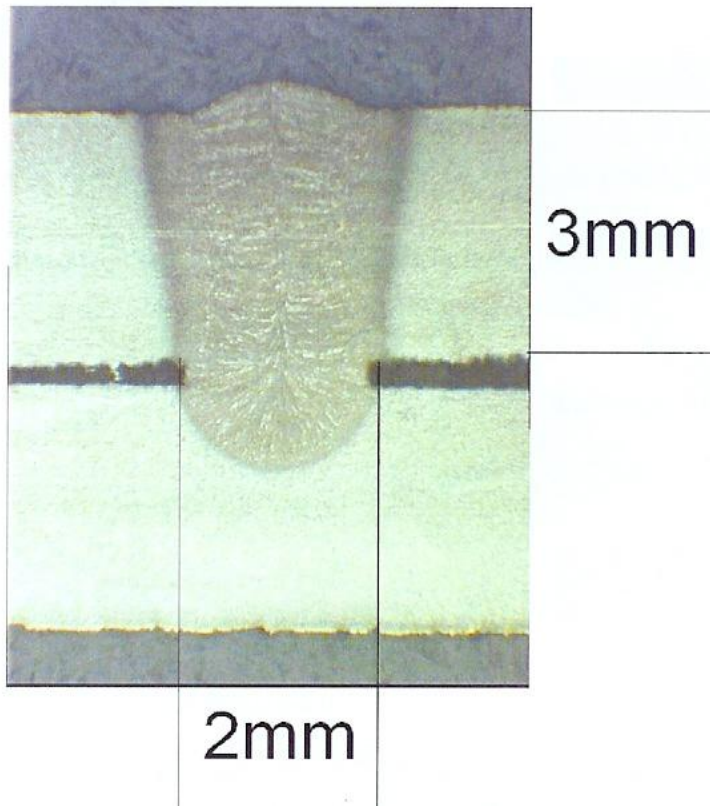
Směr pohybu  
materiálu





# Laserový průvarkový svar

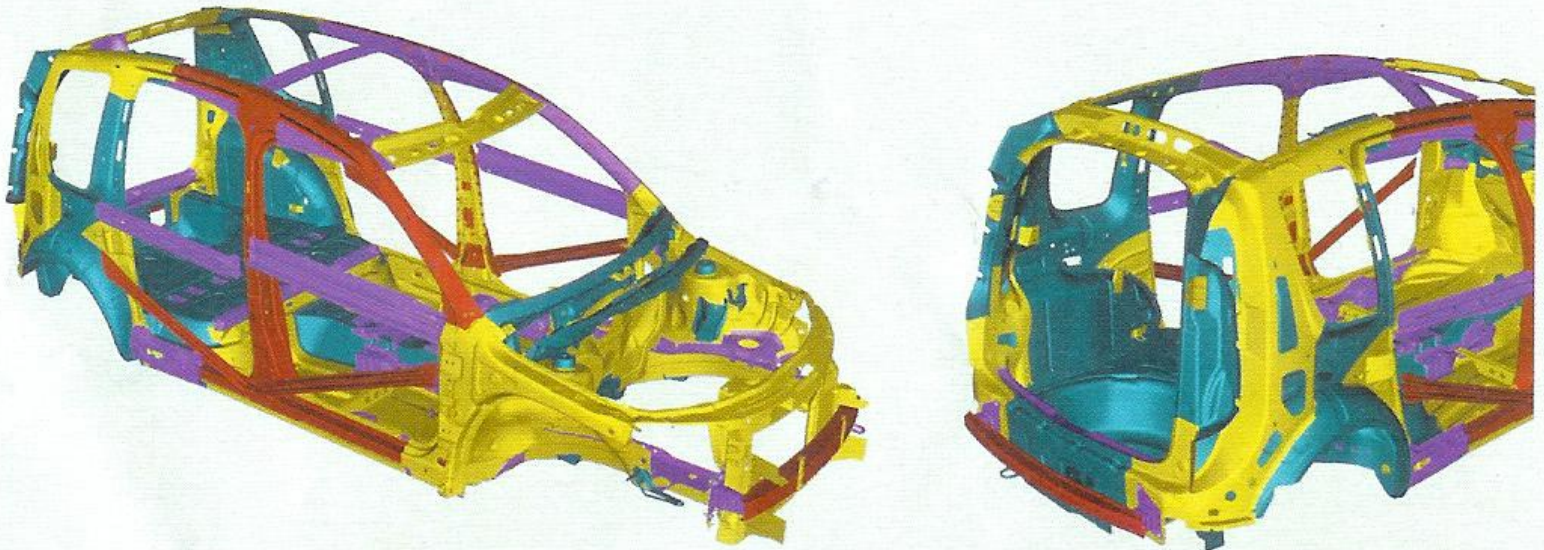
## Svar tailored blank ve výrobě karoserií





*Fig. 12: Cross section of a laser-TIG hybrid weld seam in a steel tailored blank*


# Škoda Roomster


## Využití vysokopevnostních ocelí



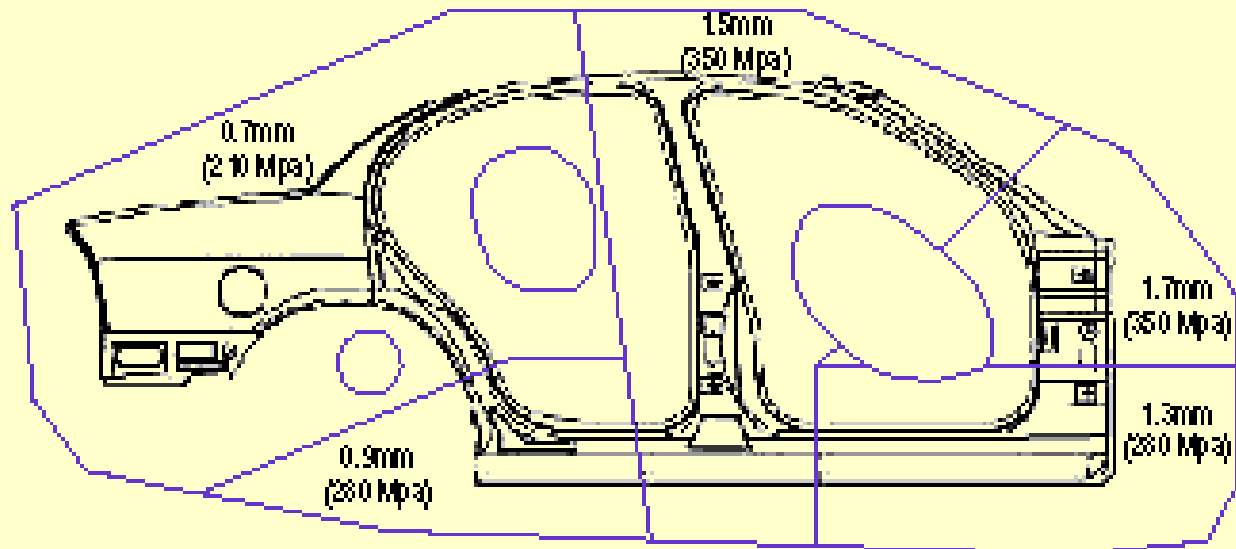
  $R_{p0,2} < 180 \text{ MPa}$

  $R_{p0,2} 180-300 \text{ MPa}$

  $R_{p0,2} 300-500 \text{ MPa}$

  $R_{p0,2} > 500 \text{ MPa}$

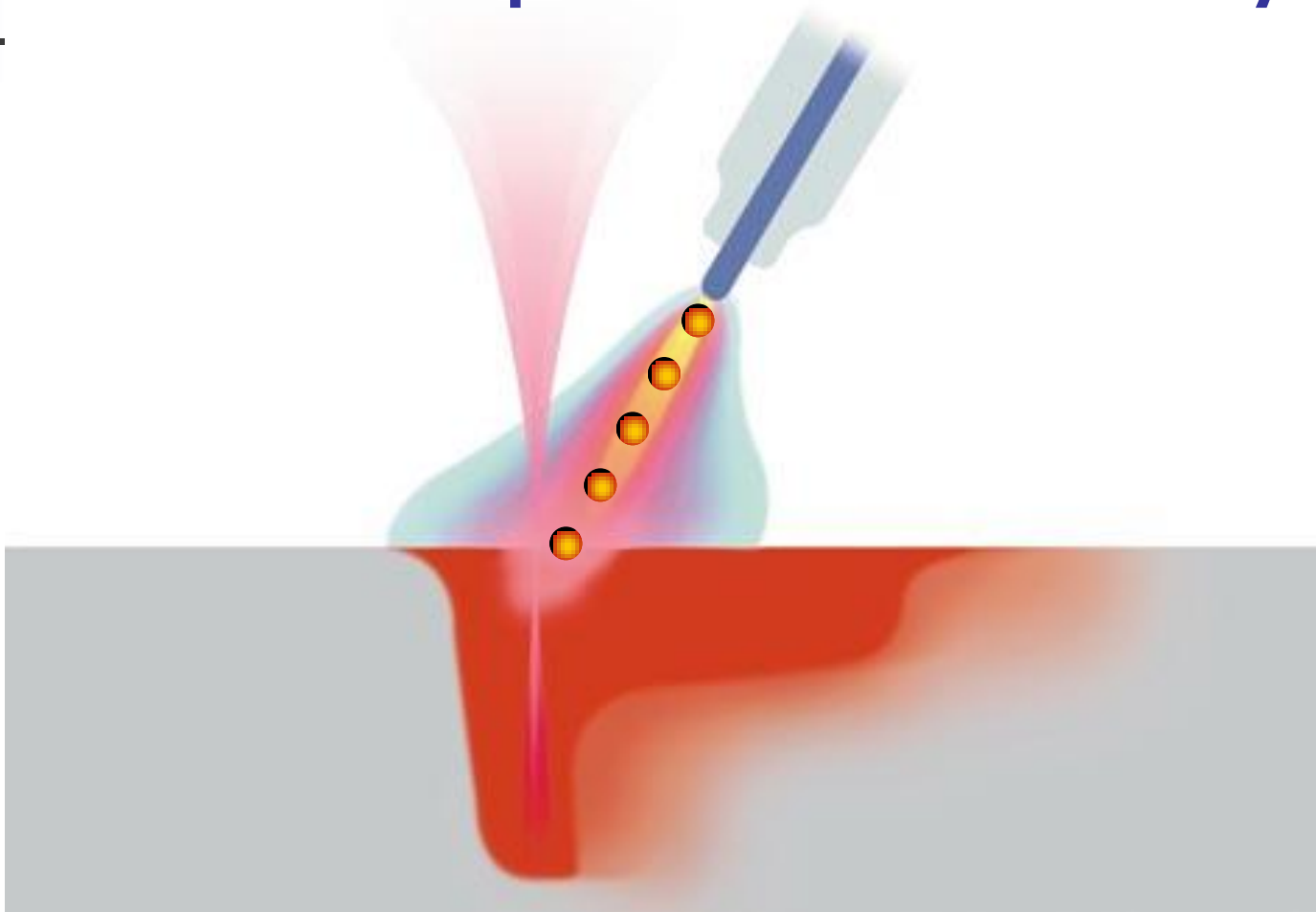
## Panel Body Side Outer



(Shows developed production blank layout)

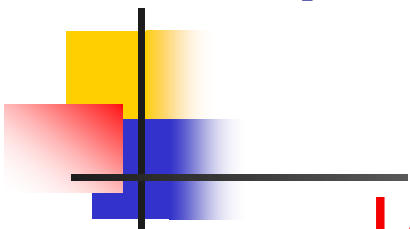
(Source: ULSAB)

# Svařovací proces Laser-Hybrid



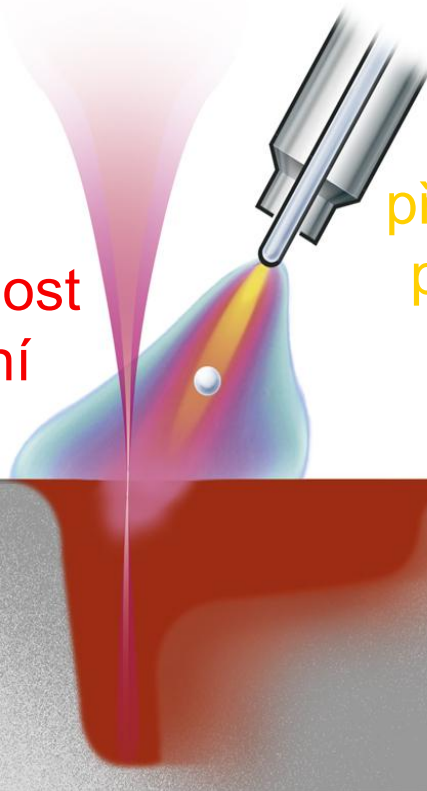


# Synergické efekty



## Laser

hluboký závar  
vysoká svařovací rychlost  
nízké tepelné zatížení  
vysoká pevnost



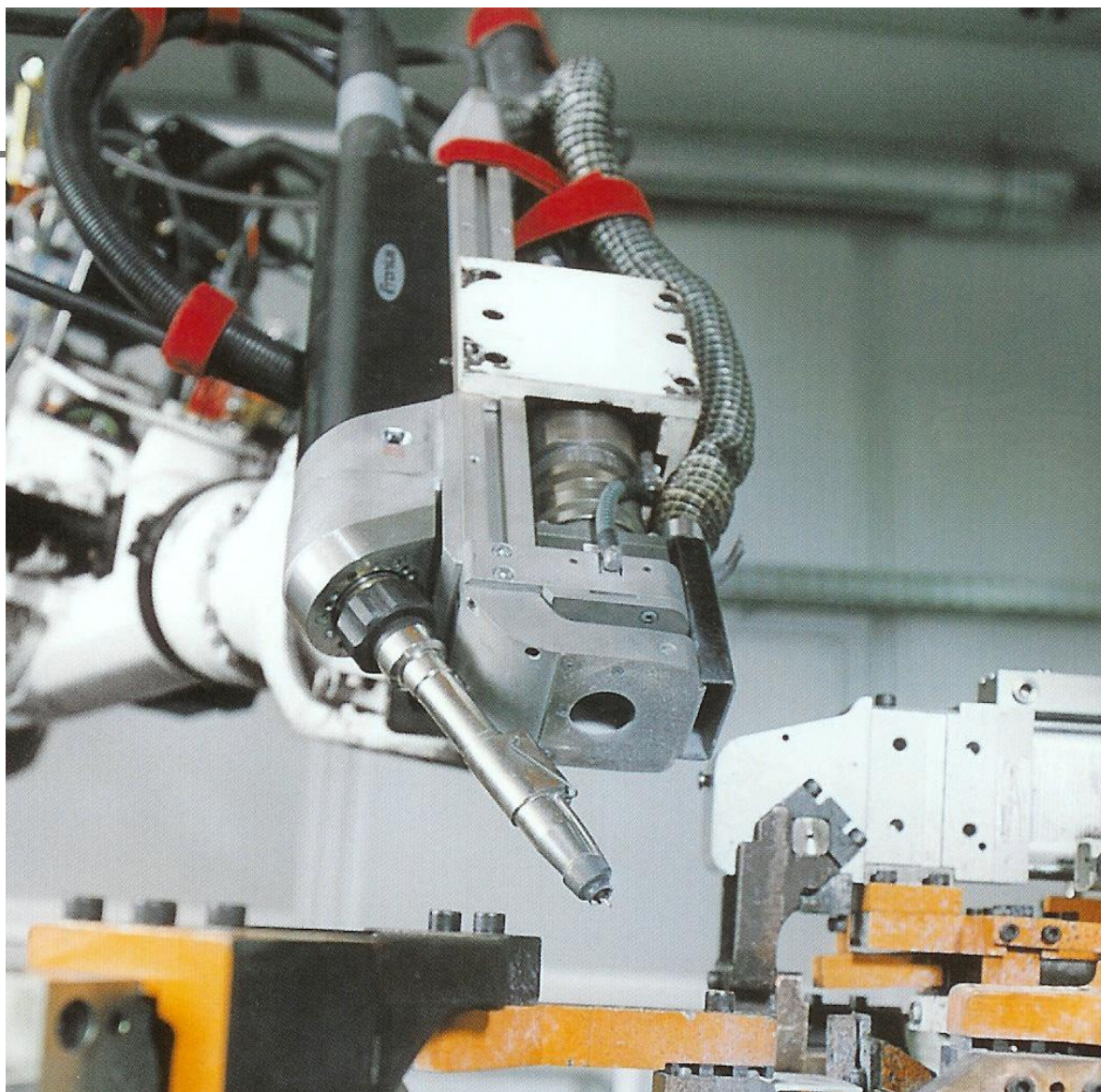
## Oblouk

cenově přístupný zdroj energie  
přemostitelnost svarové spáry  
přísun přídavného materiálu  
možnost ovlivňovat složení svarového kovu

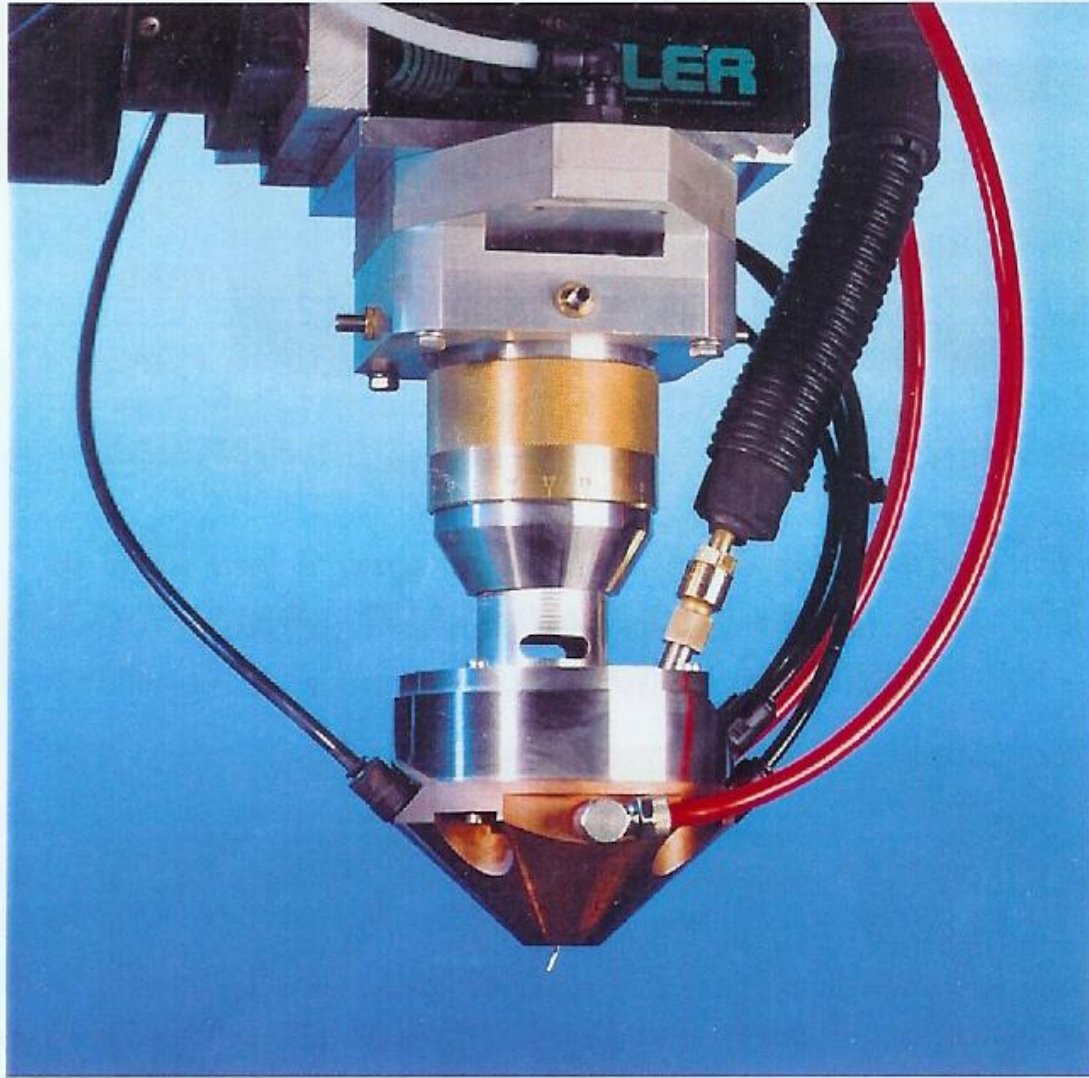
## Laser-Hybrid

vyšší stabilita procesu, vyšší svařovací rychlost,  
dobrá roztékavost na okrajích svaru  
velký objem svaru, dobré metalurgické vlastnosti

# LaserHybrid v uspořádání fy.Fronius







*Fig. 9: "Integrated Hybrid Welding Nozzle" (industrial heavy duty version)*

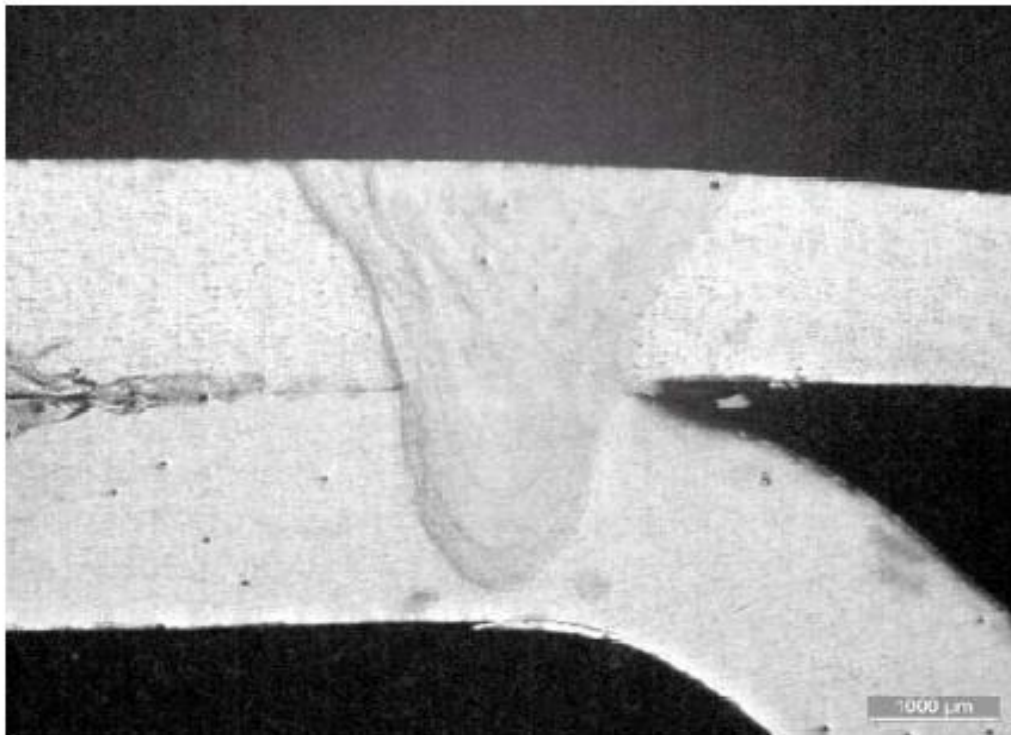
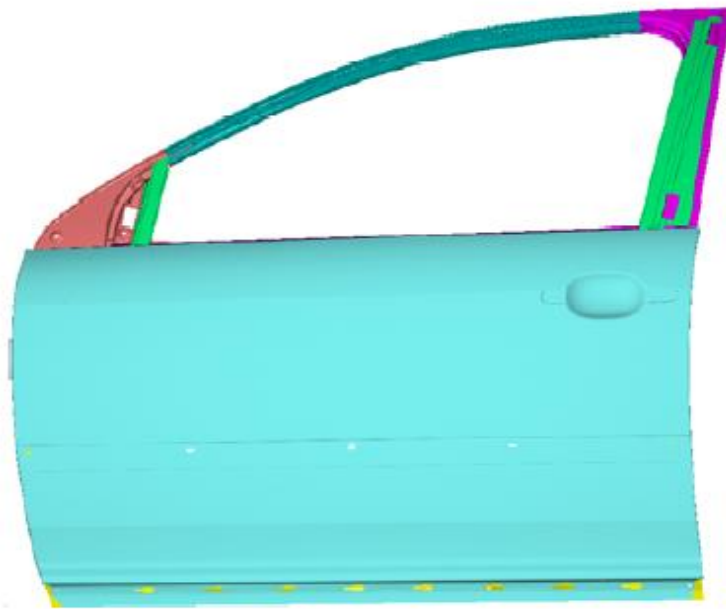


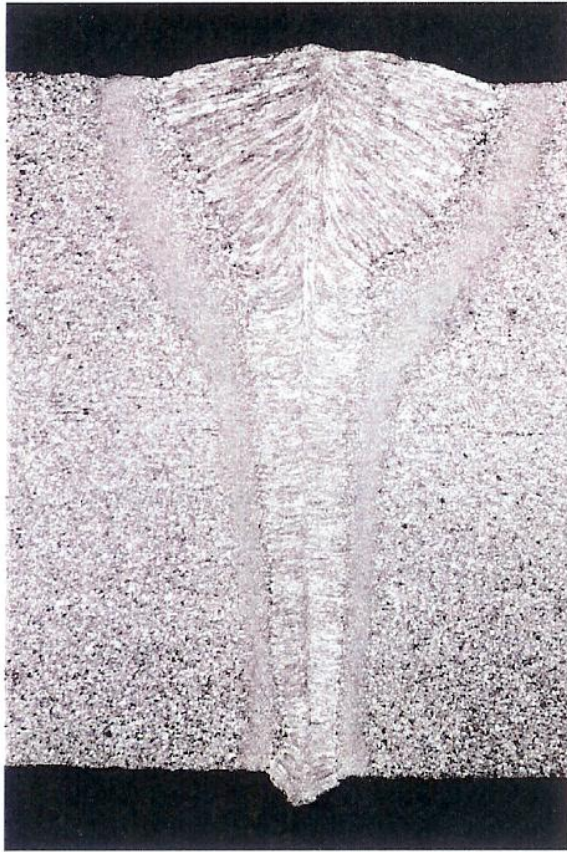
Fig. 6: Laser coldwire welding at Volkswagen

# Porovnání technologií svařování předních dveří VW Phaeton

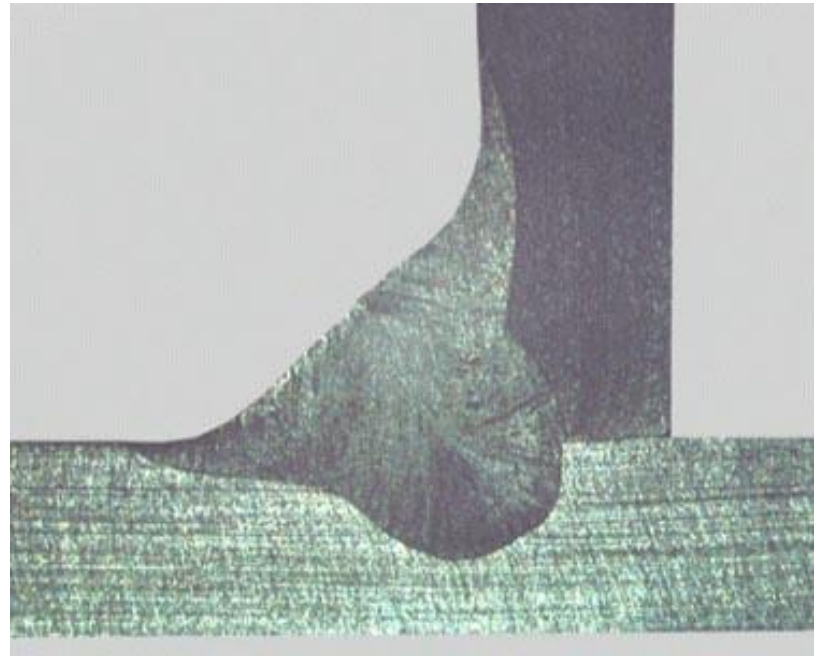


<u>Process</u>	<u>amount of seams:</u>	<u>welded length:</u>
MIG	7 seams	(380 mm)
Laser	11 seams	(1030 mm)
LaserHybrid	48 seams	(3570 mm)
$\Sigma$		<b>4980 mm</b>

Fig. 3: Comparison of joining techniques on the Volkswagen Phaeton front door

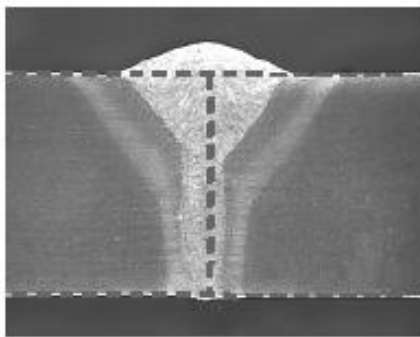


**Fig. 8:** Hybrid welding of mild steel S355NL, 15 mm thickness (single-pass), edge preparation 6° single-V groove: CO<sub>2</sub> laser 15.5 kW, MIG impulse arc leading, filler wire G3Si1, diameter 1.2 mm, assist gas: argon-helium mixture, welding speed: 1.2 m/min.

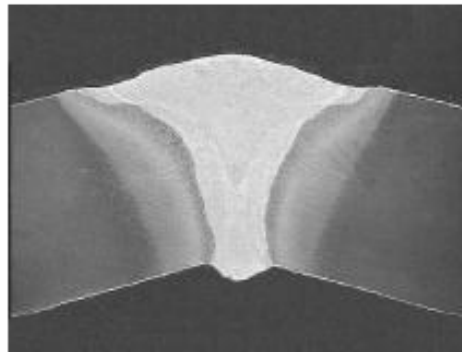




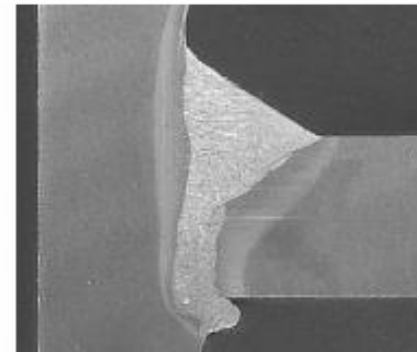
# Možné typy svarových spojů vytvořené LaserHybridem



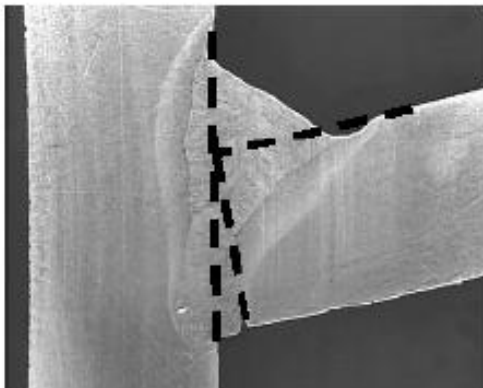
(a)



(b)



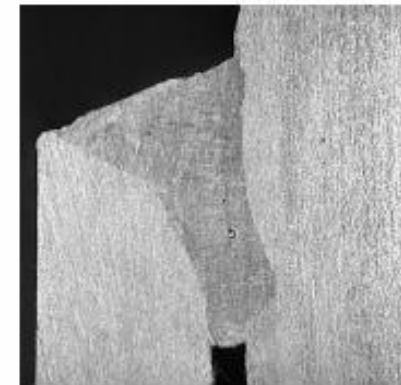
(c)



(d)



(e)

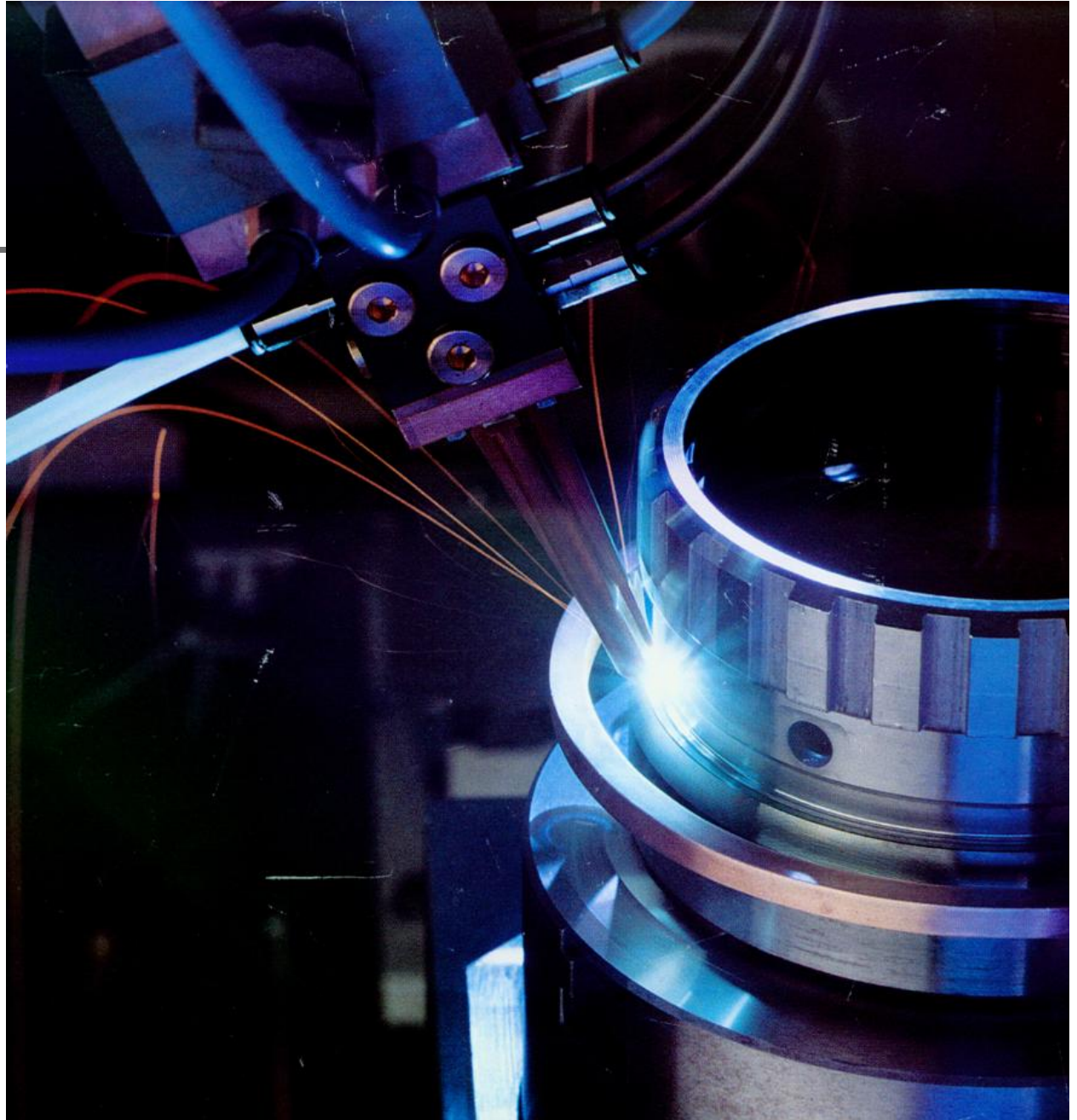
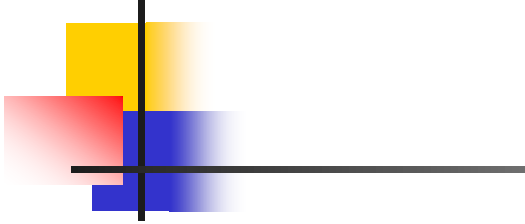


(f)

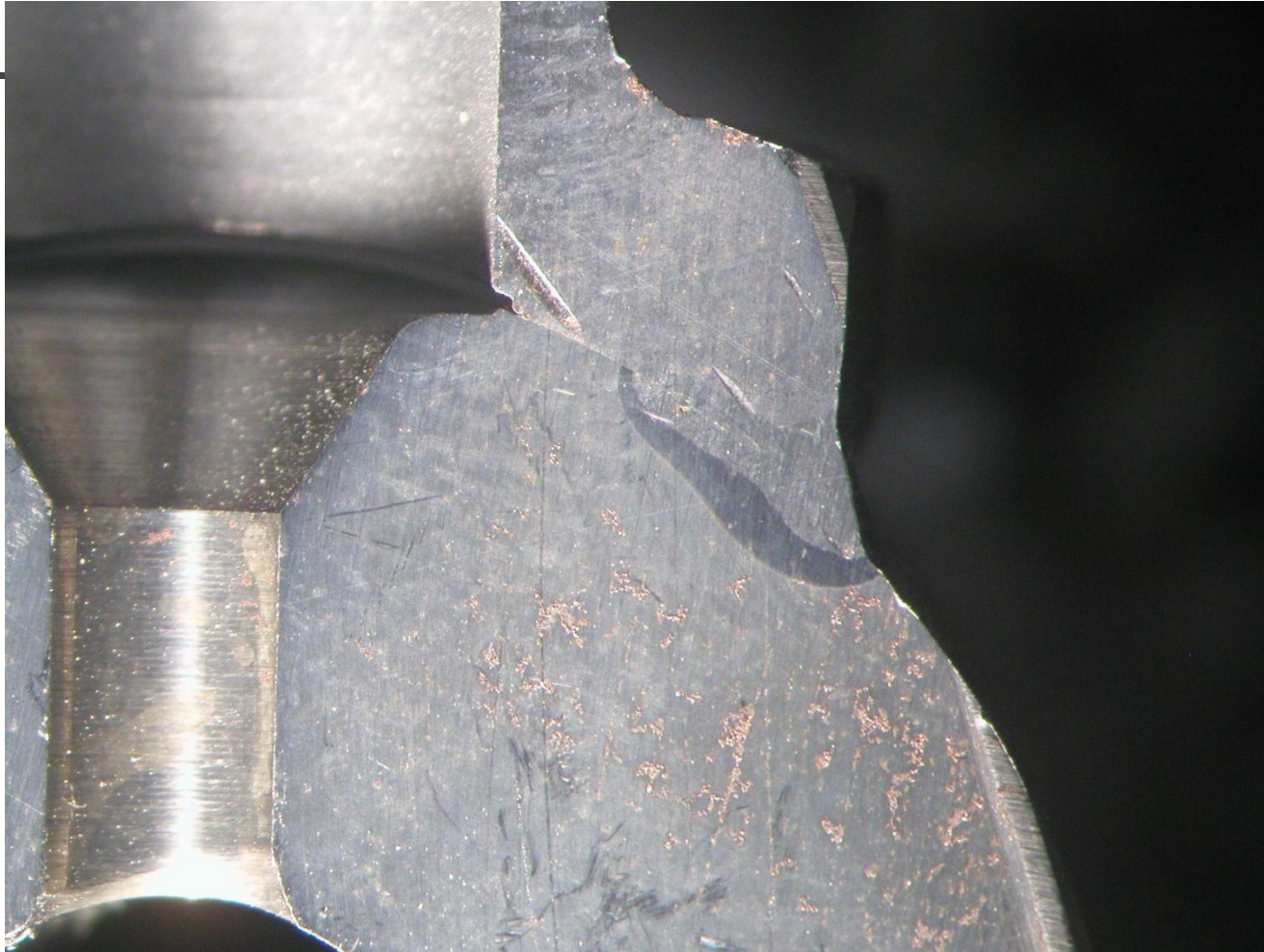
# Svařování LASERHYBRIDEM v loděnicích



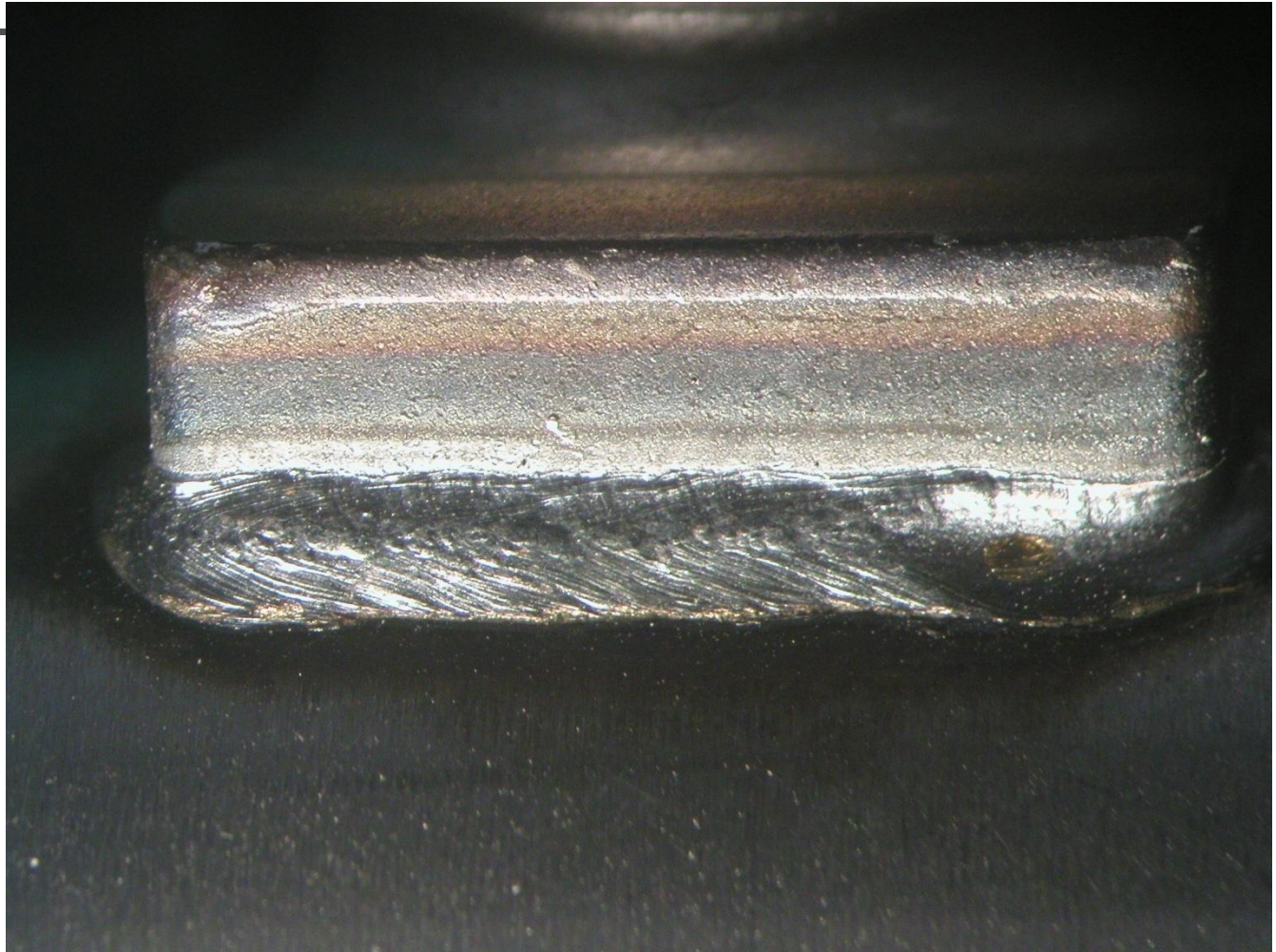
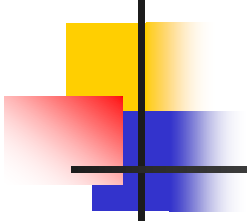




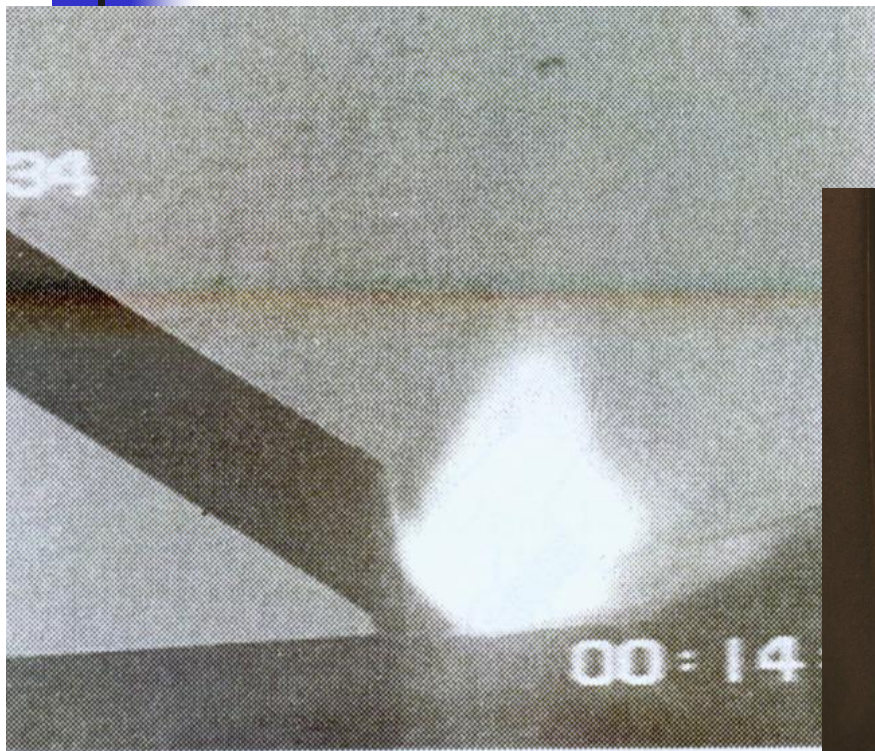
# BOSCH JIHLAVA



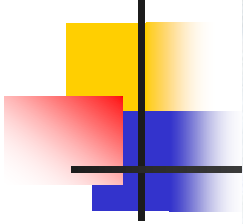
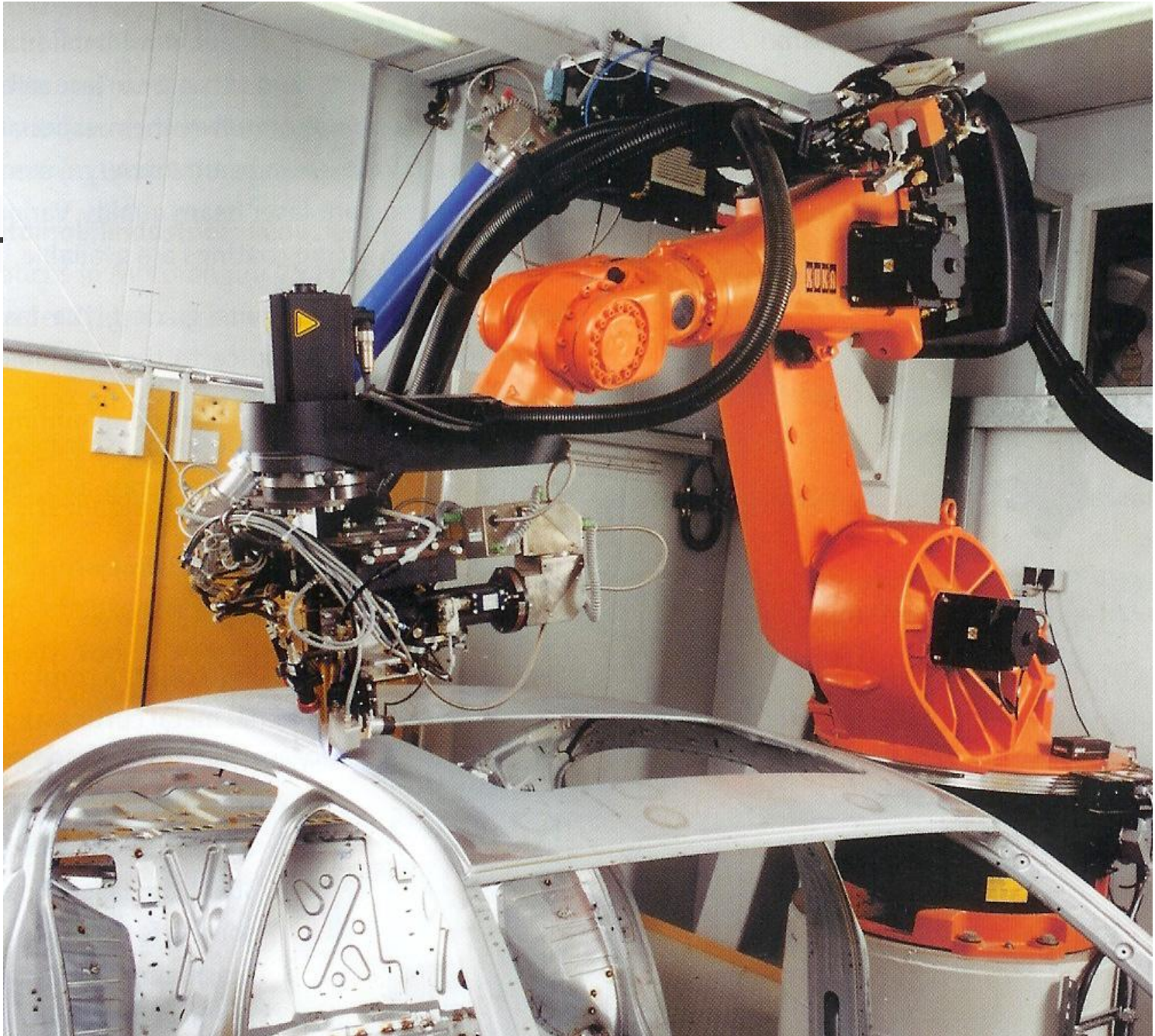




# LASEROVÉ PÁJENÍ







# 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 přídatný materiál ve formě drátu a překlenout širší mezery - LASERHYBRID



# 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 hranicí 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.

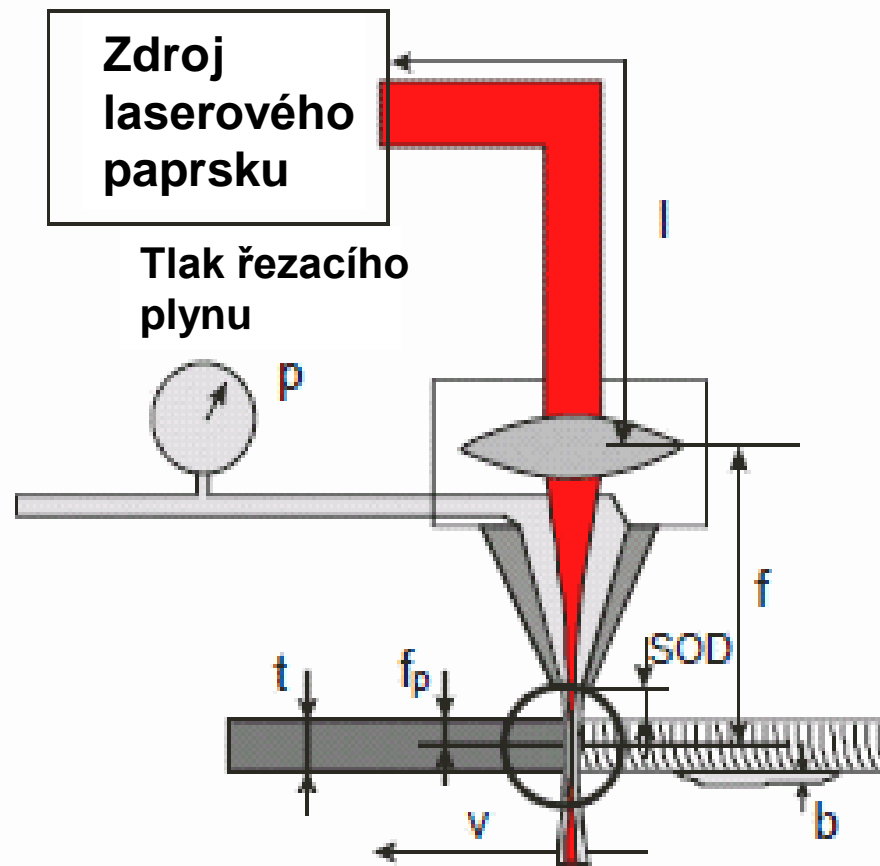
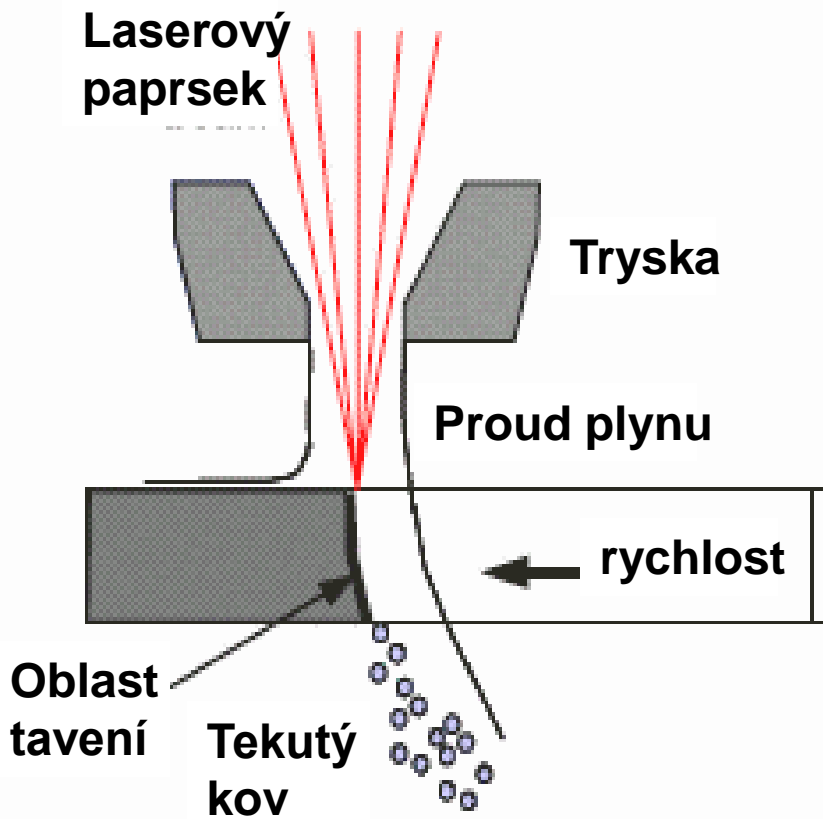


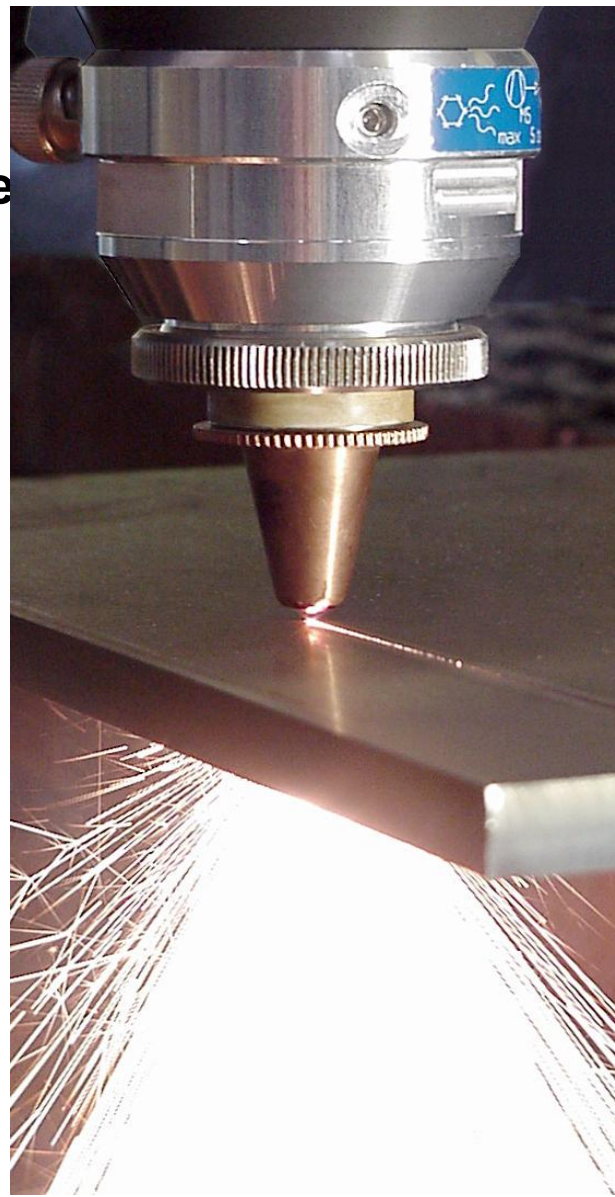
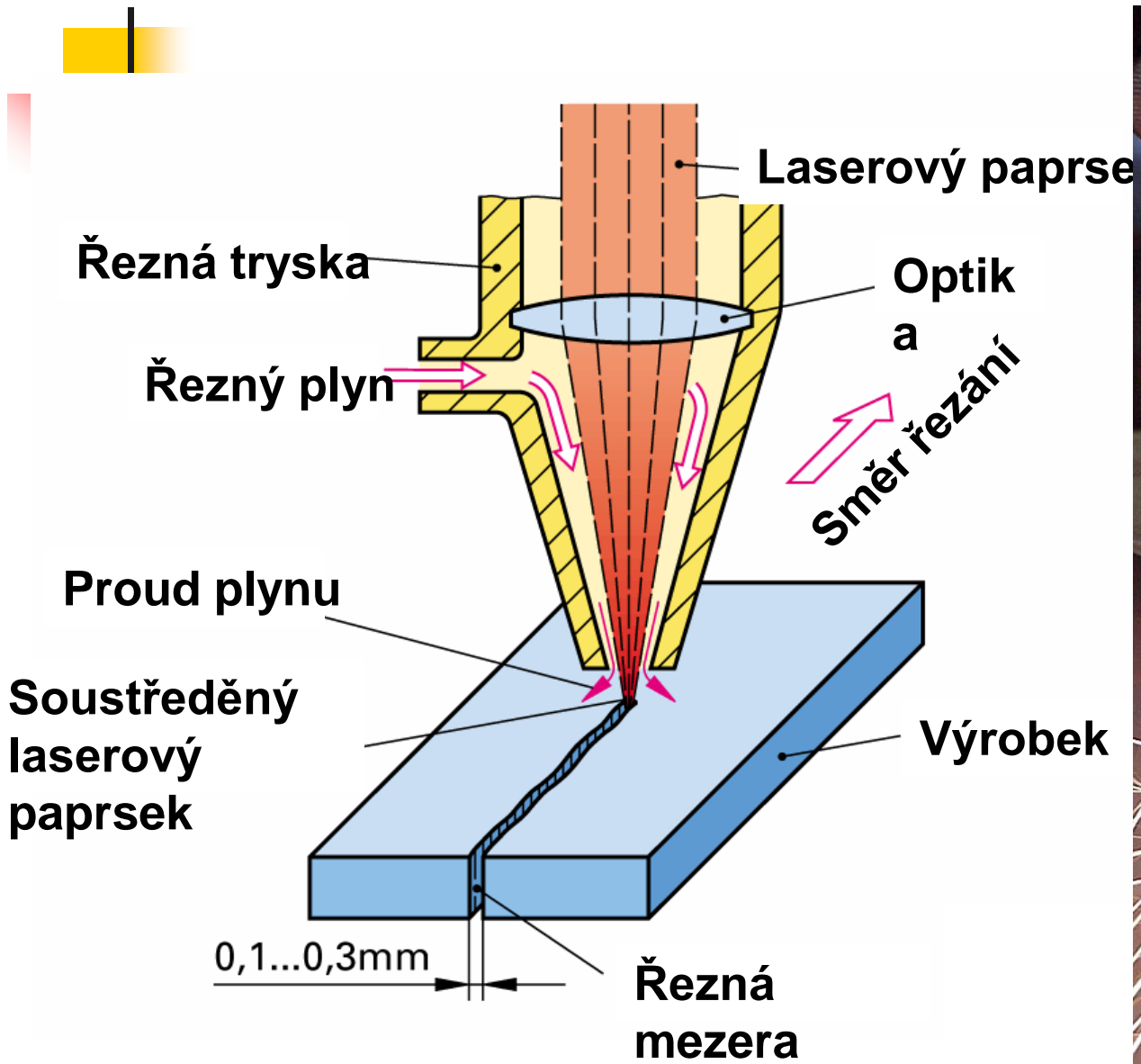
# Řezání laserem

---

- 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.

# Princip řezání laserem





**Rozstřík při počátku  
protavení otvorů**





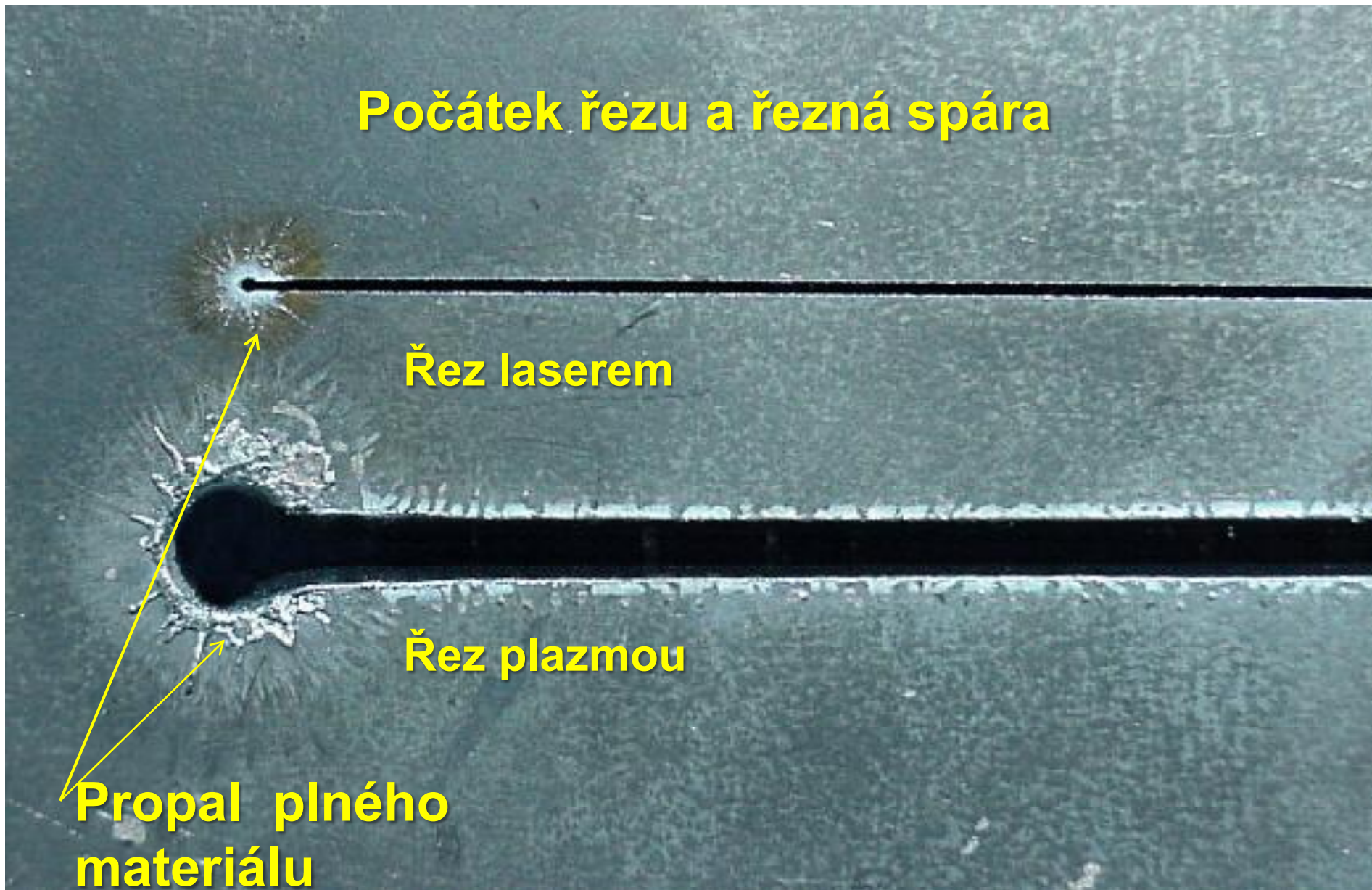
# Laser a plazma

Počátek řezu a řezná spára

Řez laserem

Řez plazmou

Propal plného  
materiálu







# 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.



# Tavné řezání

---

- Kontinuálním laserovým svazkem se materiál ohřívá na teplotu tavení a proudem neaktivního plynu (N<sub>2</sub>) 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. Rezná 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.



# 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

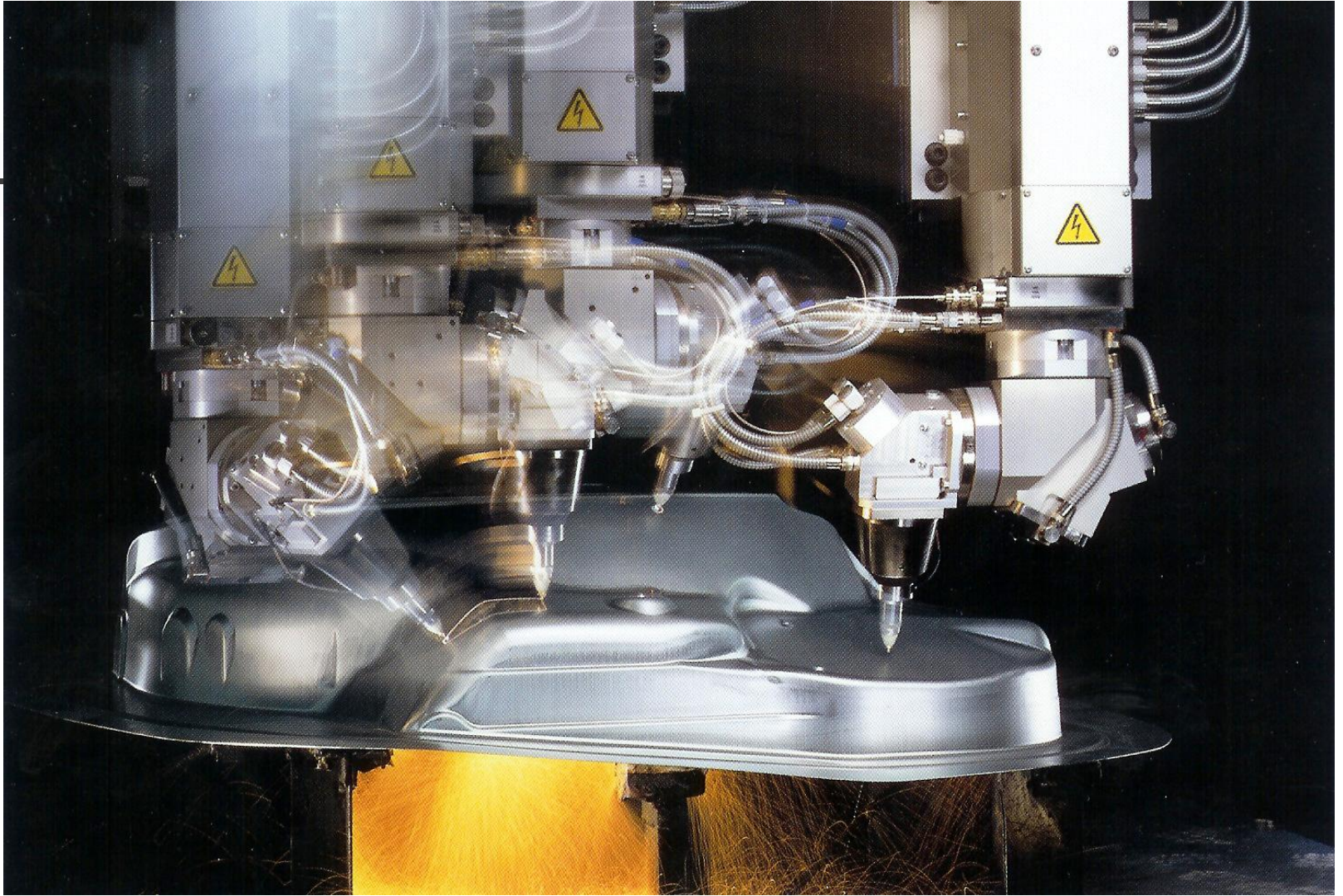
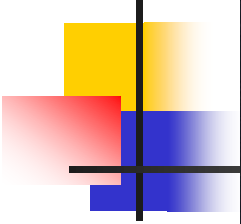
# Laserové řezání se vyznačuje těmito výhodami:

- 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.

# Pracoviště řezání laserem









# Jakost řezné plochy laserem u různých tloušťkách

**Cr/Ni ocel 18/10**

**YRL 4000 laser – optické  
vlákno**

**Ohnisková vzdálenost 250**

10 mm



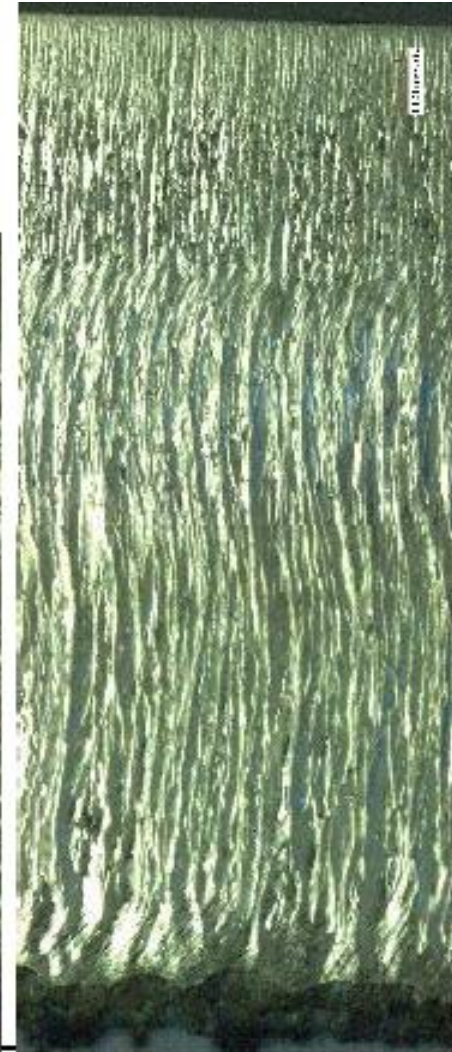
12 mm



15 mm

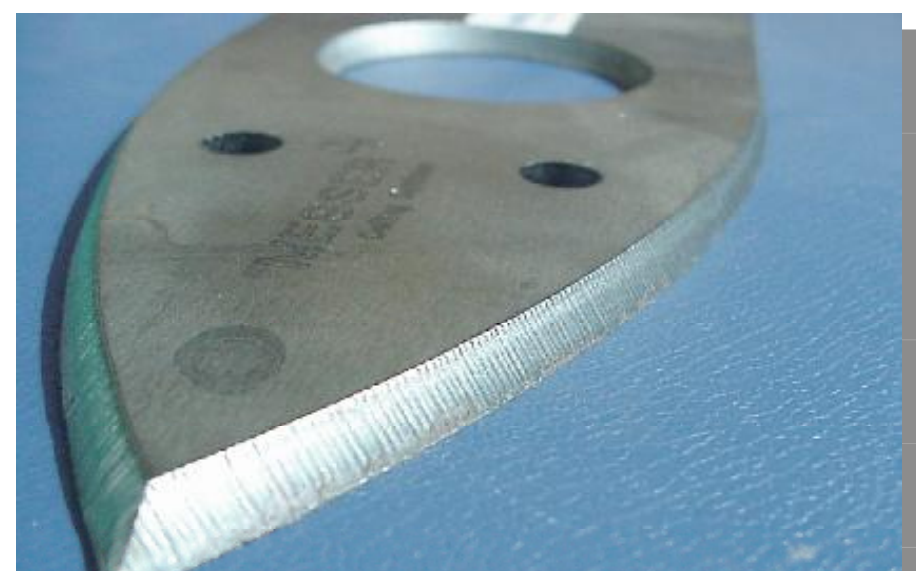
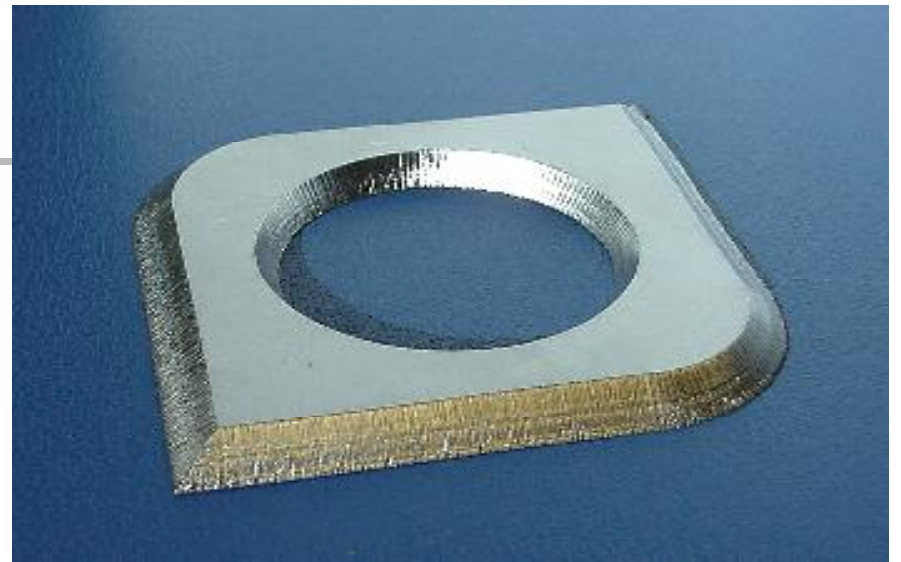
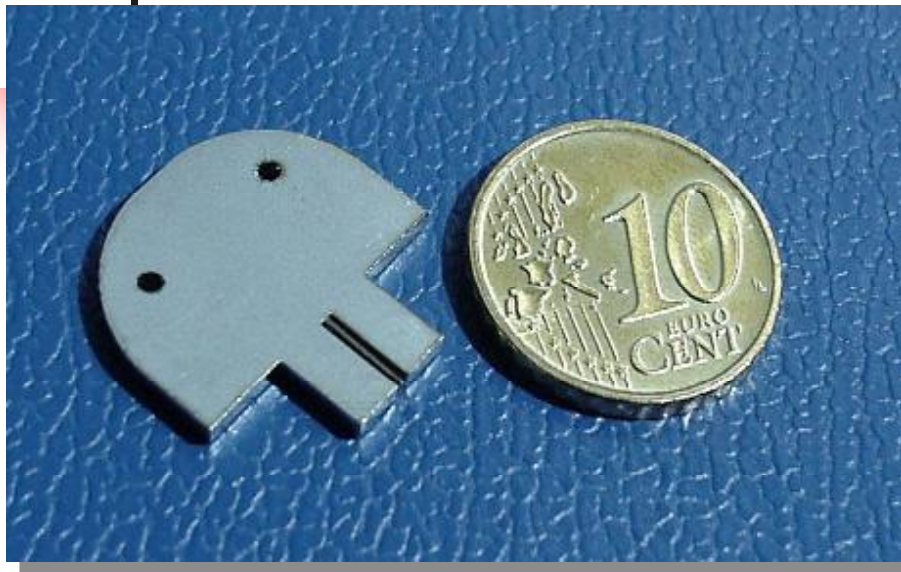


20 mm

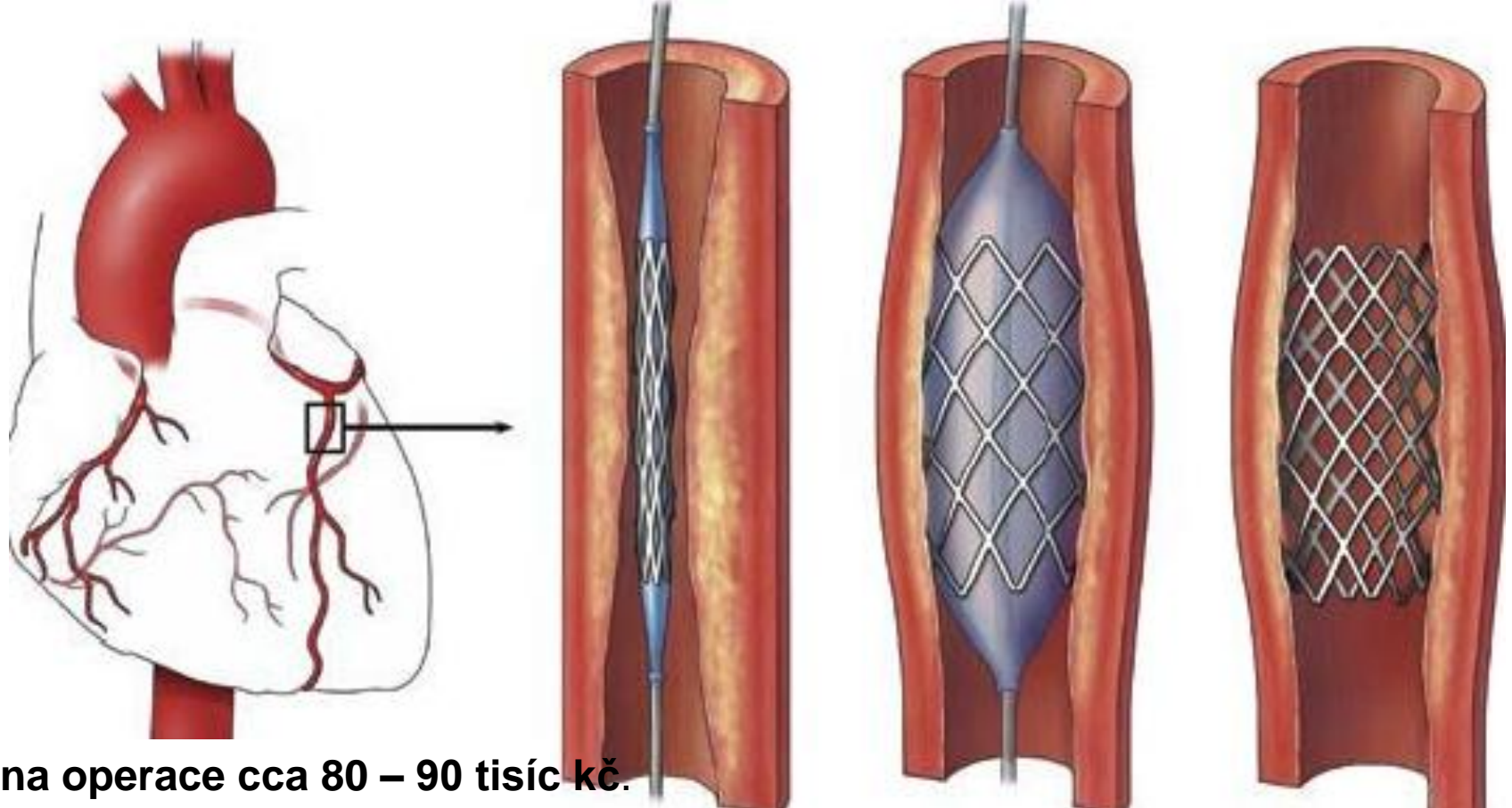
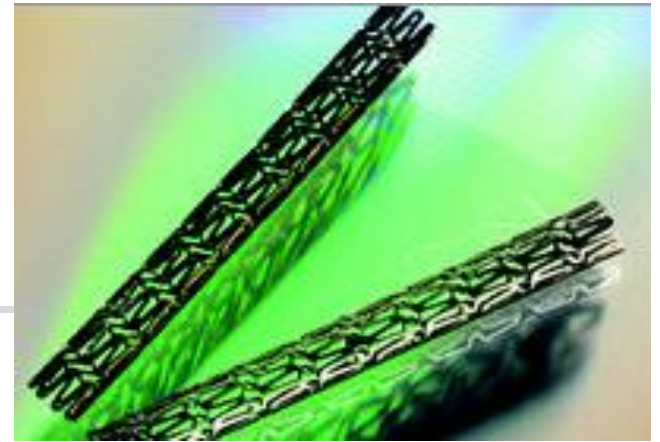
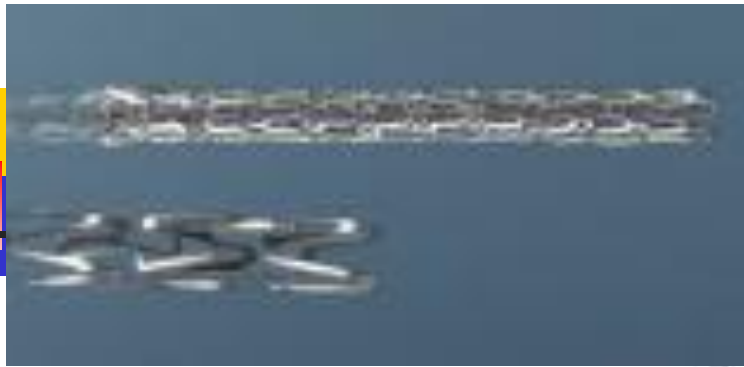




# Ukázky řezů laserem



# Stenty zhotovené laserem



Cena operace cca 80 – 90 tisíc Kč.

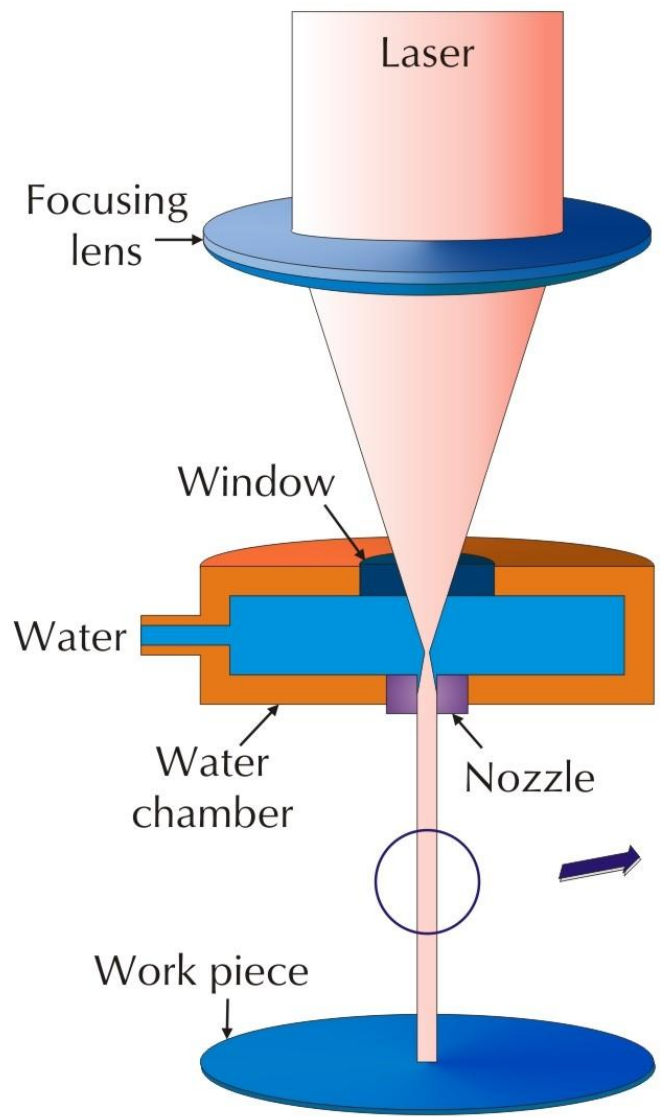
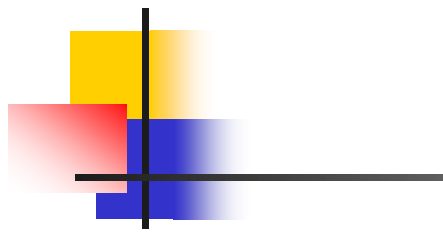
# Kombinace řezání vodním paprskem a laserem



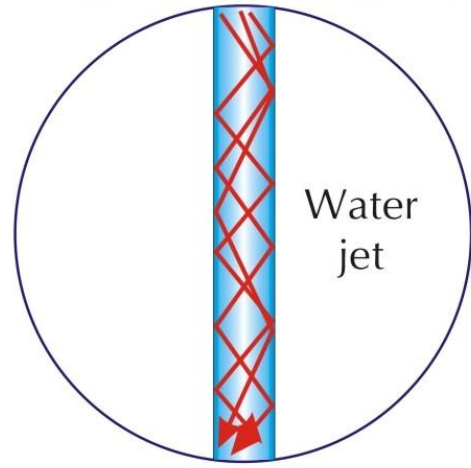
---

- 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.

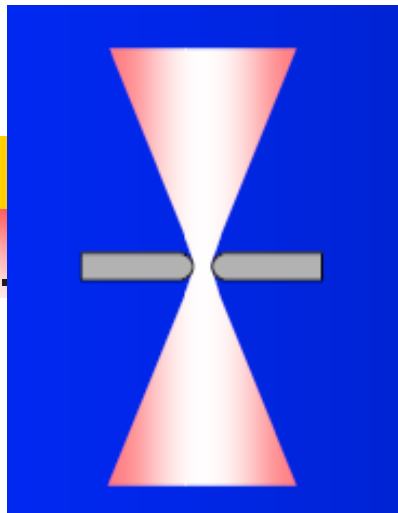




Laser guided by total internal reflection

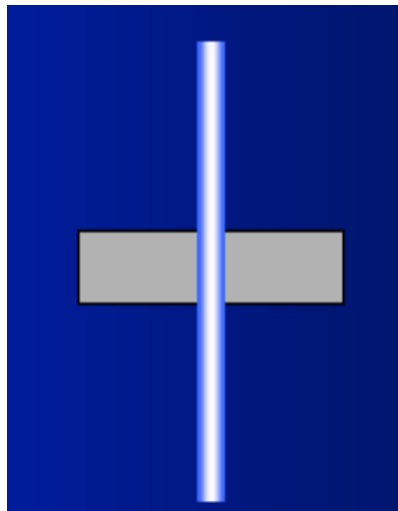


### Běžný laser

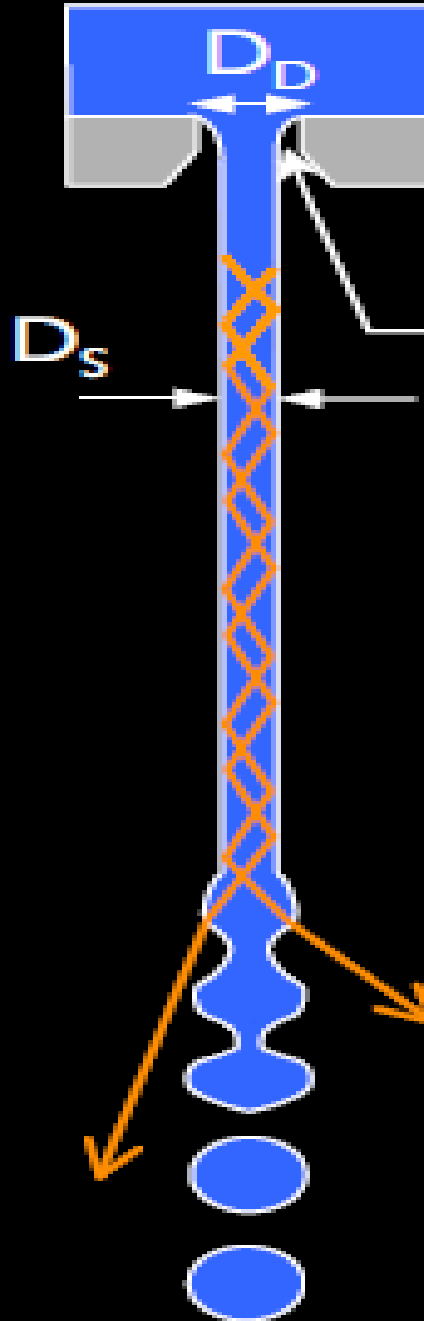


Divergentní paprsek

### MicroJet Laser



Paralelní paprsek



Tryska

Zúžení:

$$D_S = 0,83 * D_D$$

Funkční

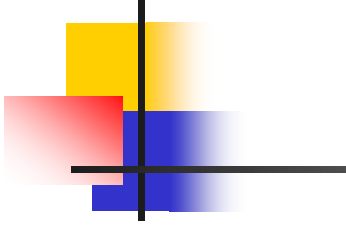
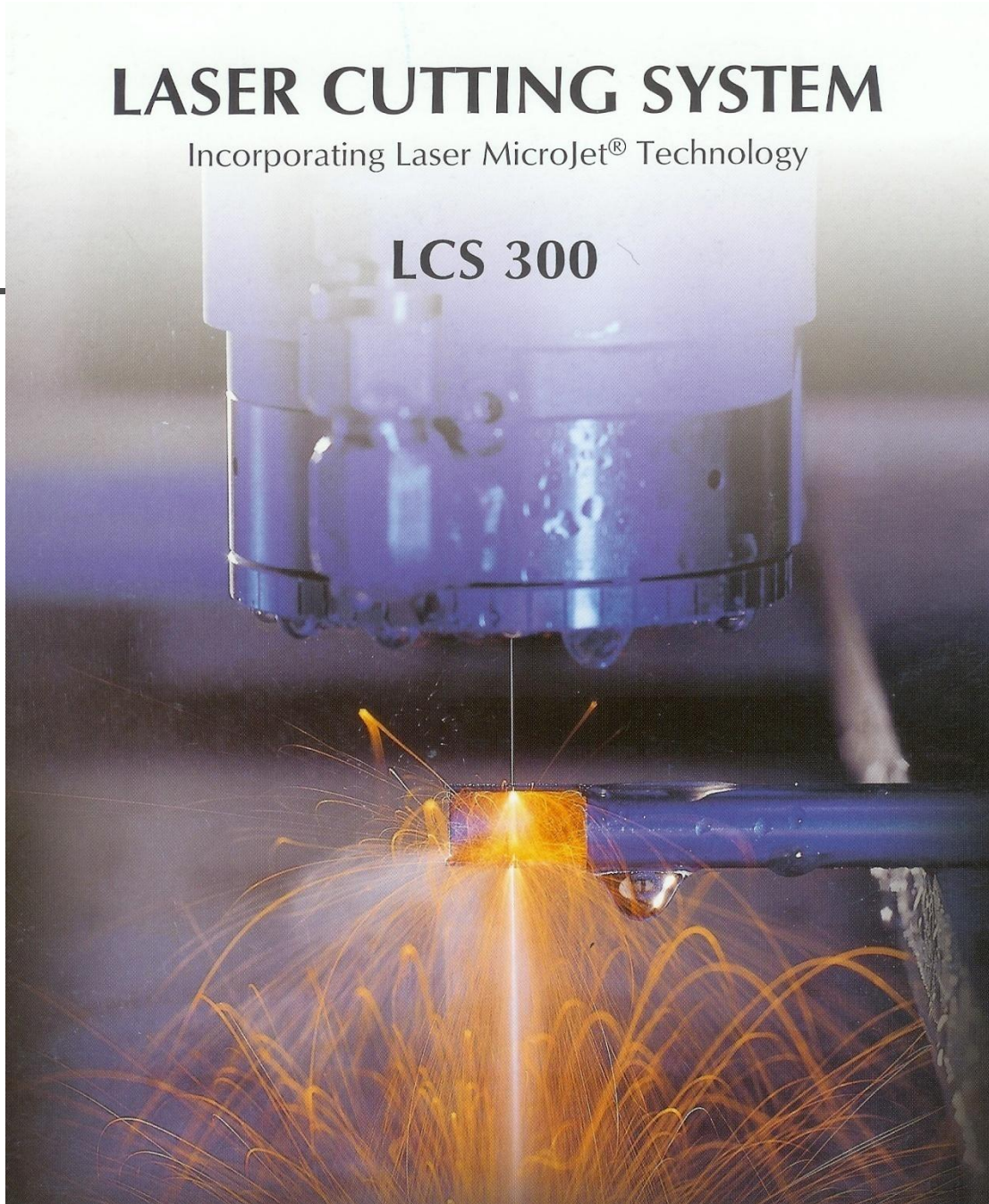
vzdálenost  $D_D$

Neporušená  $\tau$   
délka paprsku

# LASER CUTTING SYSTEM

Incorporating Laser MicroJet® Technology

## LCS 300





Směr dalšího vývoje



$25\mu\text{m}$



Příklad :  
Řez  
mikročipem

$27\mu\text{m}$



$D_D = 30\mu\text{m}$

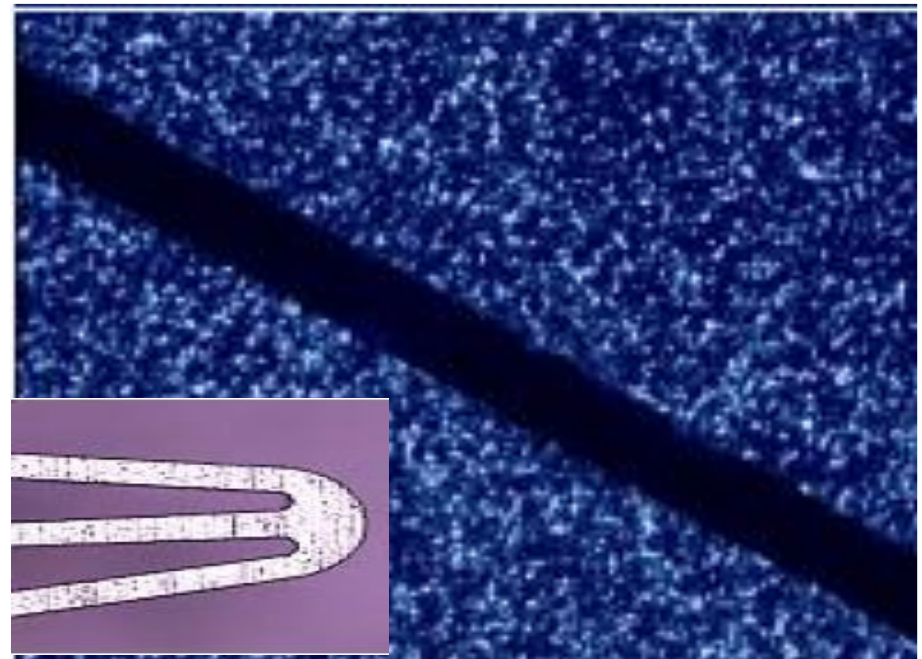
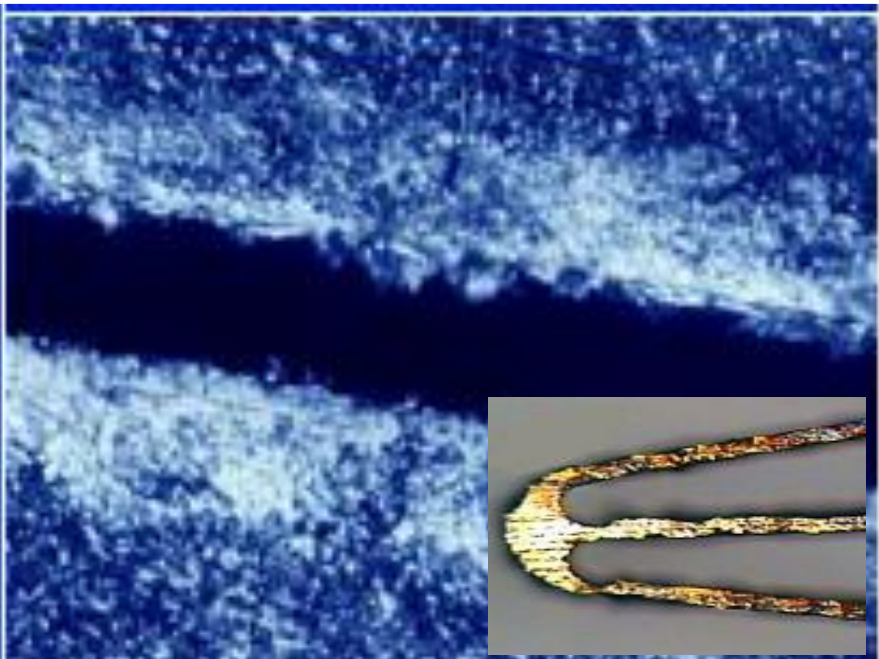




Řez běžným laserem



Řez laserem MicroJet





# TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ.

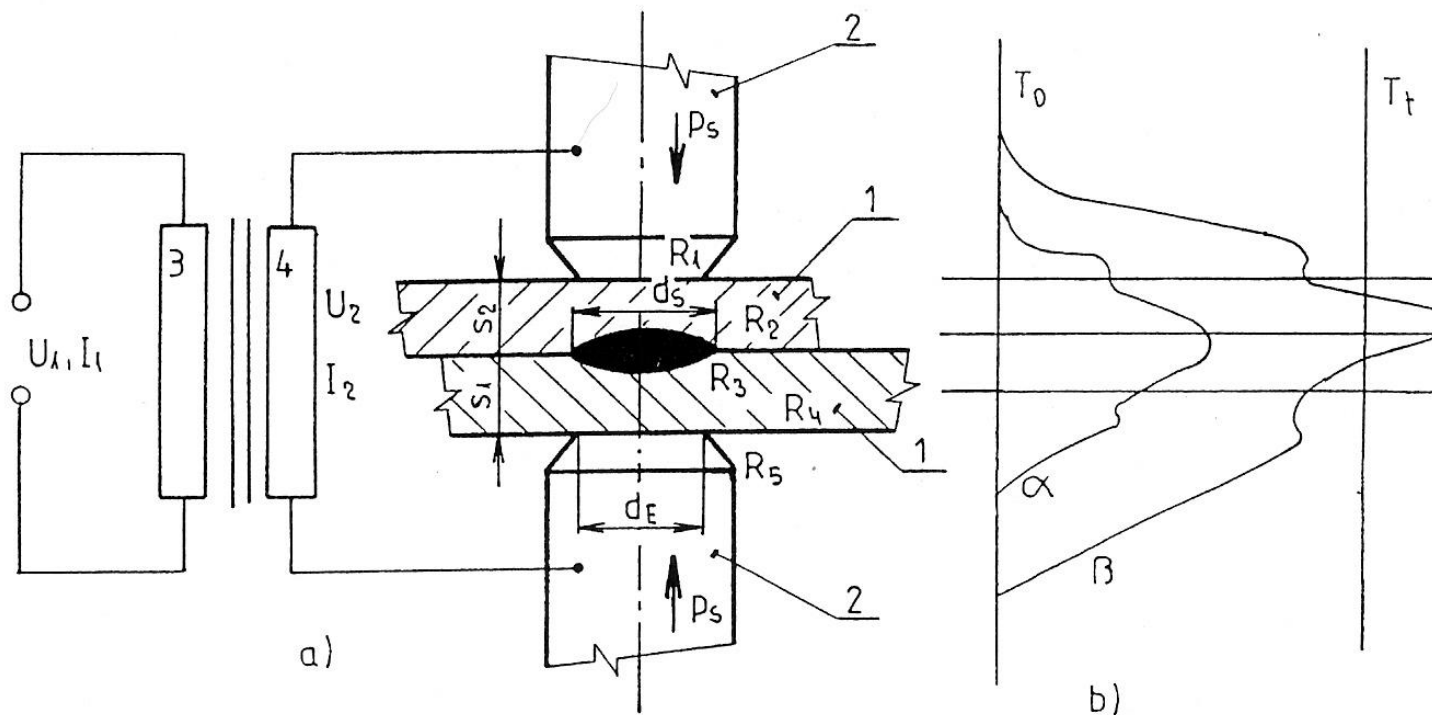
- Mezi speciální metody tlakového svařování lze zařadit tyto metody:
- Svařování elektrickým odporem, svařování třením, difúzí, ultrazvukem, výbuchem, tlakem za studena a indukční. U všech způsobů vzniká spoj v důsledku silového působení při přiblížení kontaktních ploch na vzdálenost působení meziatomových sil tzn. téměř na parametr atomové mřížky. Ke spojení dochází v tuhém nebo plastickém stavu většinou bez vnějšího přívodu tepelné energie.

# svařování elektrickým odporem



---

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



a) schéma uspořádání

b) průběh teplot ( $\alpha$ -po době 0,02s,  $\beta$ -po době 0,1s)

Schéma odporového bodového svařování

1 - svařované materiály,

2 - svařovací elektrody,

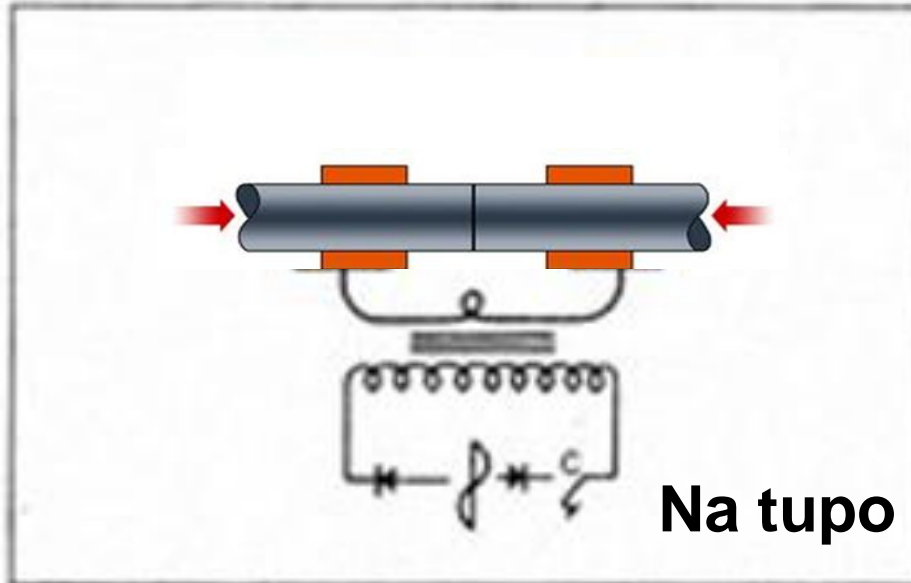
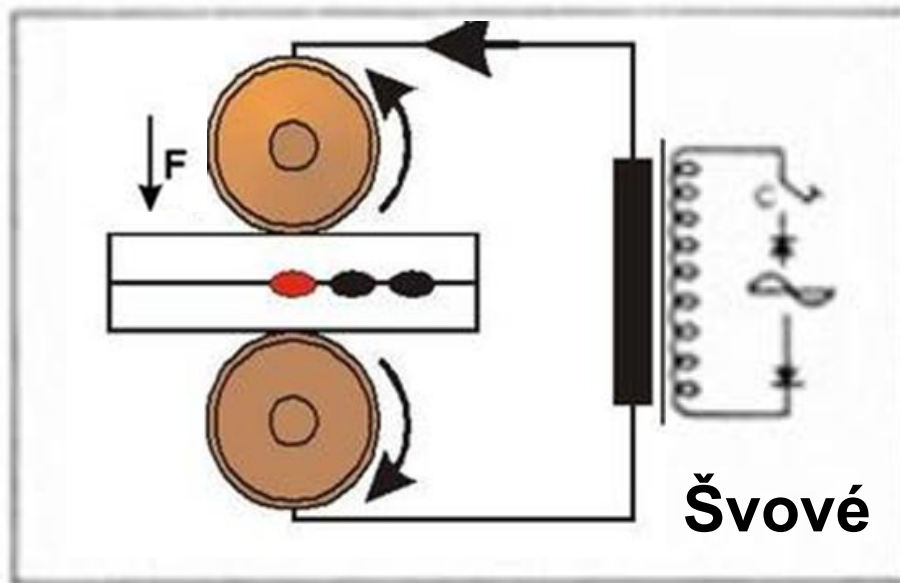
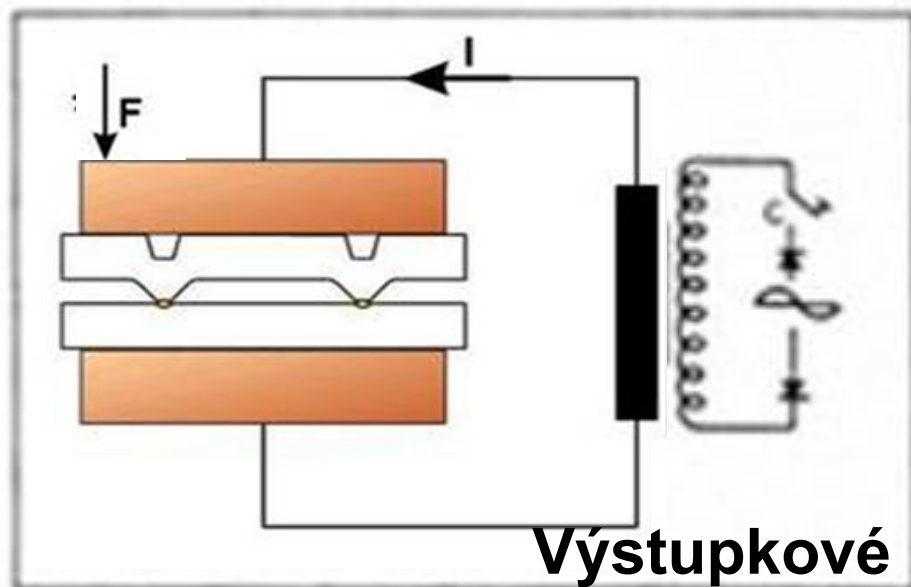
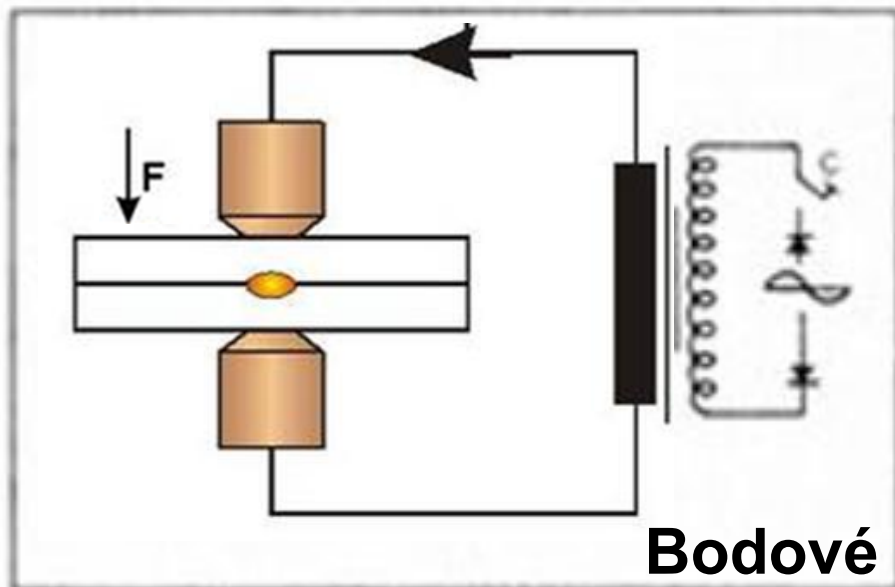
3 - primární vinutí transformátoru,

4 - sekundární vinutí transformátoru

# Řez svarovou čočkou



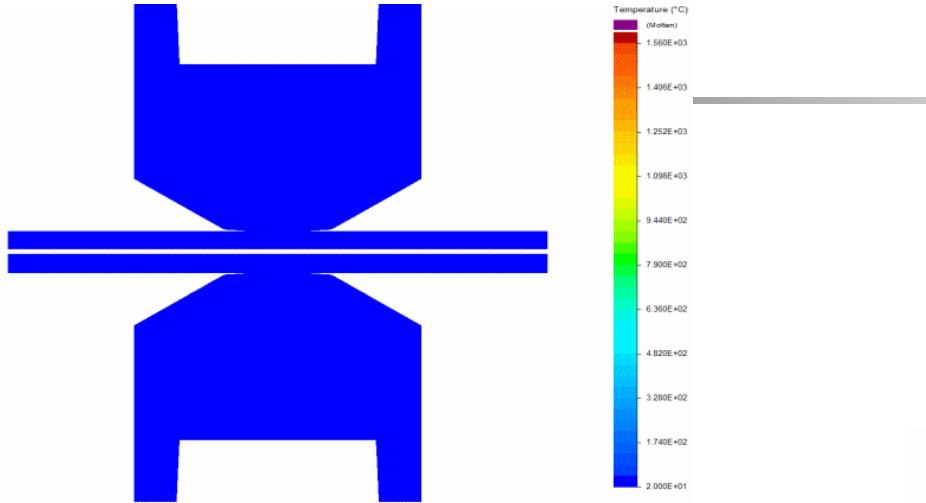
# Varianty odporového svařování



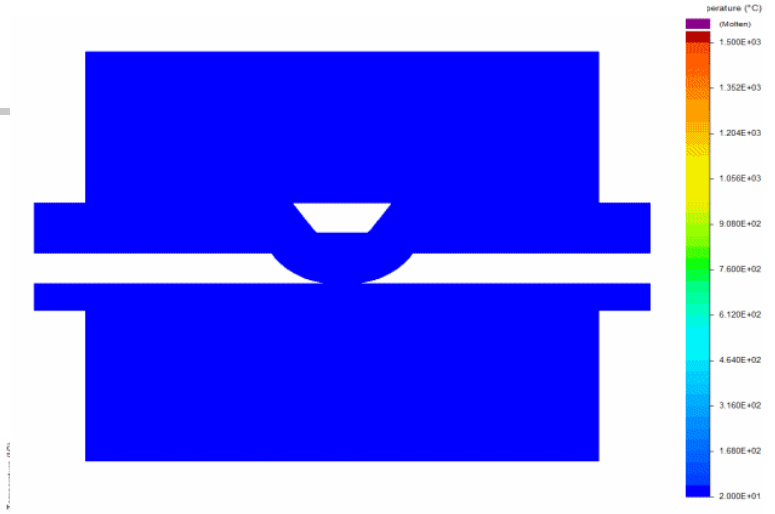


# Varianty odporového svařování

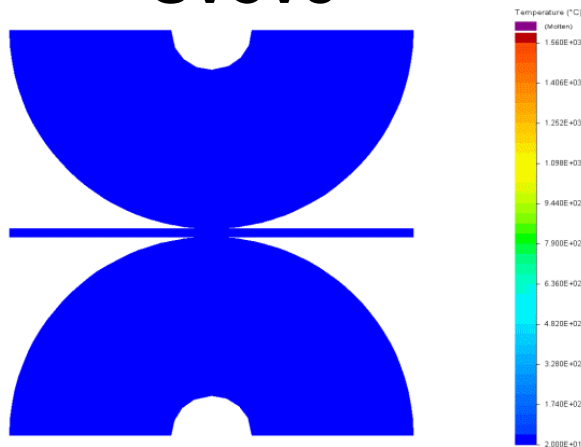
## Bodové



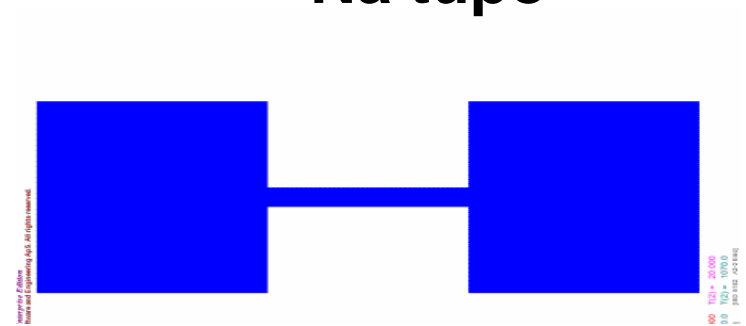
## Výstupkové

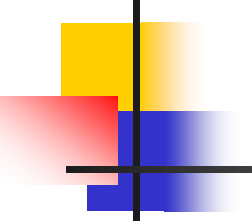


## Švové



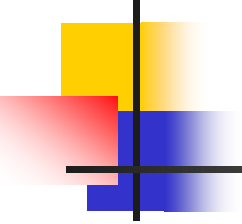
## Na tupo





**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
- přítláčná síla  $P_S = 500$  až  $10\ 000$  N
- svařovací čas  $t_S = 0,04$  až  $2$  s
- Stejné množství tepla dodaného do svaru můžeme dosáhnout vysokým proudem a krátkým časem- **tvrdý režim** nebo nižším svařovacím proudem dodaným v delším čase- **měkký režim**

- 
- 
- Výhody měkkého režimu:
  - nevyžaduje stroje velkého příkonu,
  - umožňuje používat menší průřezy elektrických vodičů,
  - je méně citlivý na odchylky odporové svařitelnosti svařovaných materiálů.
  - Nevýhody měkkého režimu:
  - vyžaduje delší strojové časy (nižší produktivita),
  - vznikají větší deformace a napětí ve svarových spojích,
  - 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,
- snižuje spotřebu elektrické energie a elektrod

- Nevýhody tvrdého režimu:

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



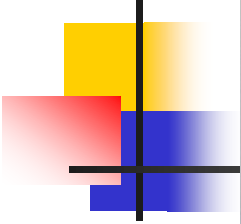


# Využití odporového svařování

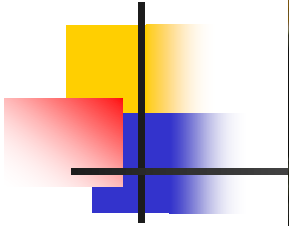
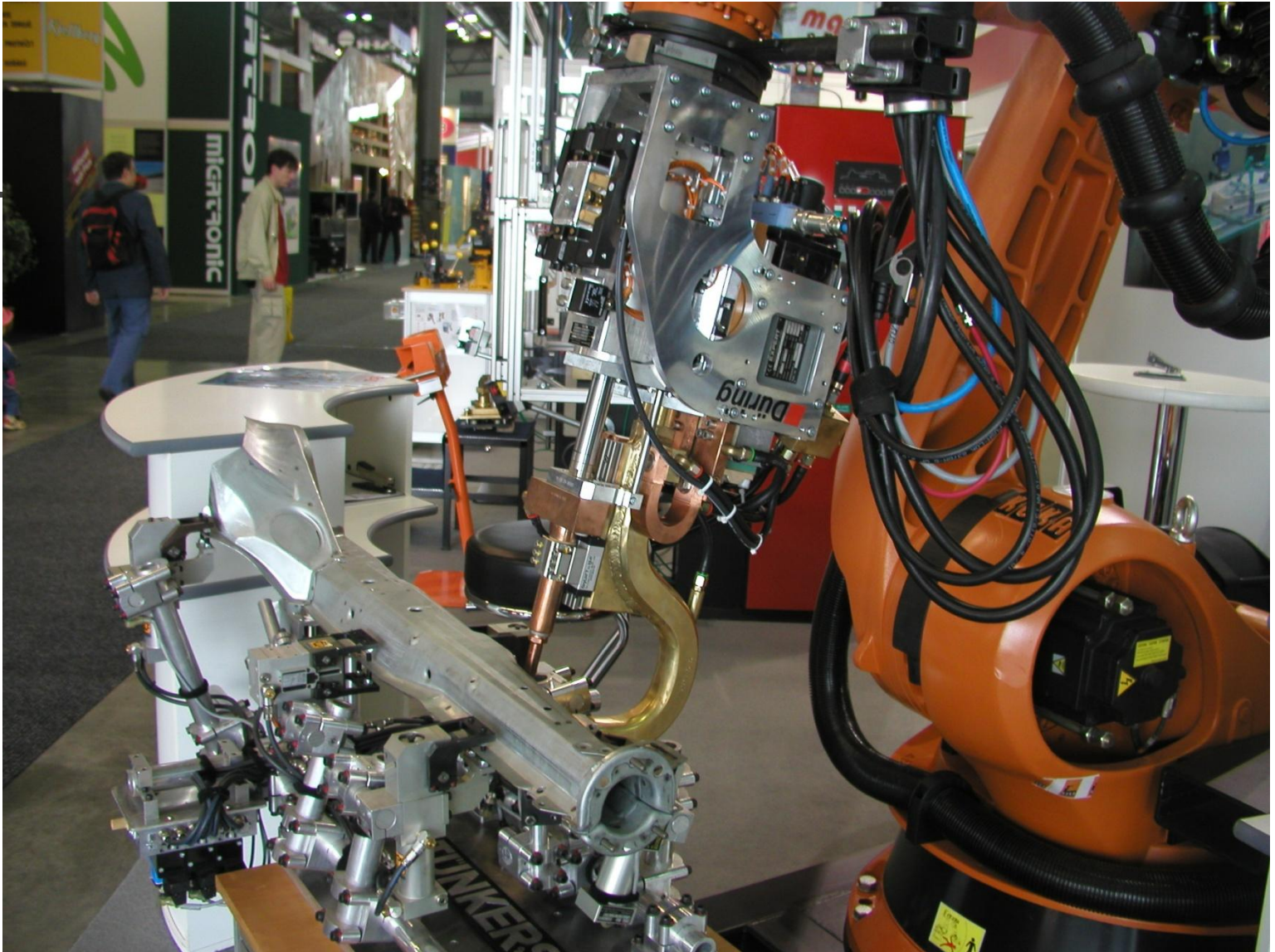
---

- Nejvýznamější aplikací je nasazení odporového svařování v automobilovém průmyslu při svařování karoserií. Např. na typu Škoda Fabie 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.

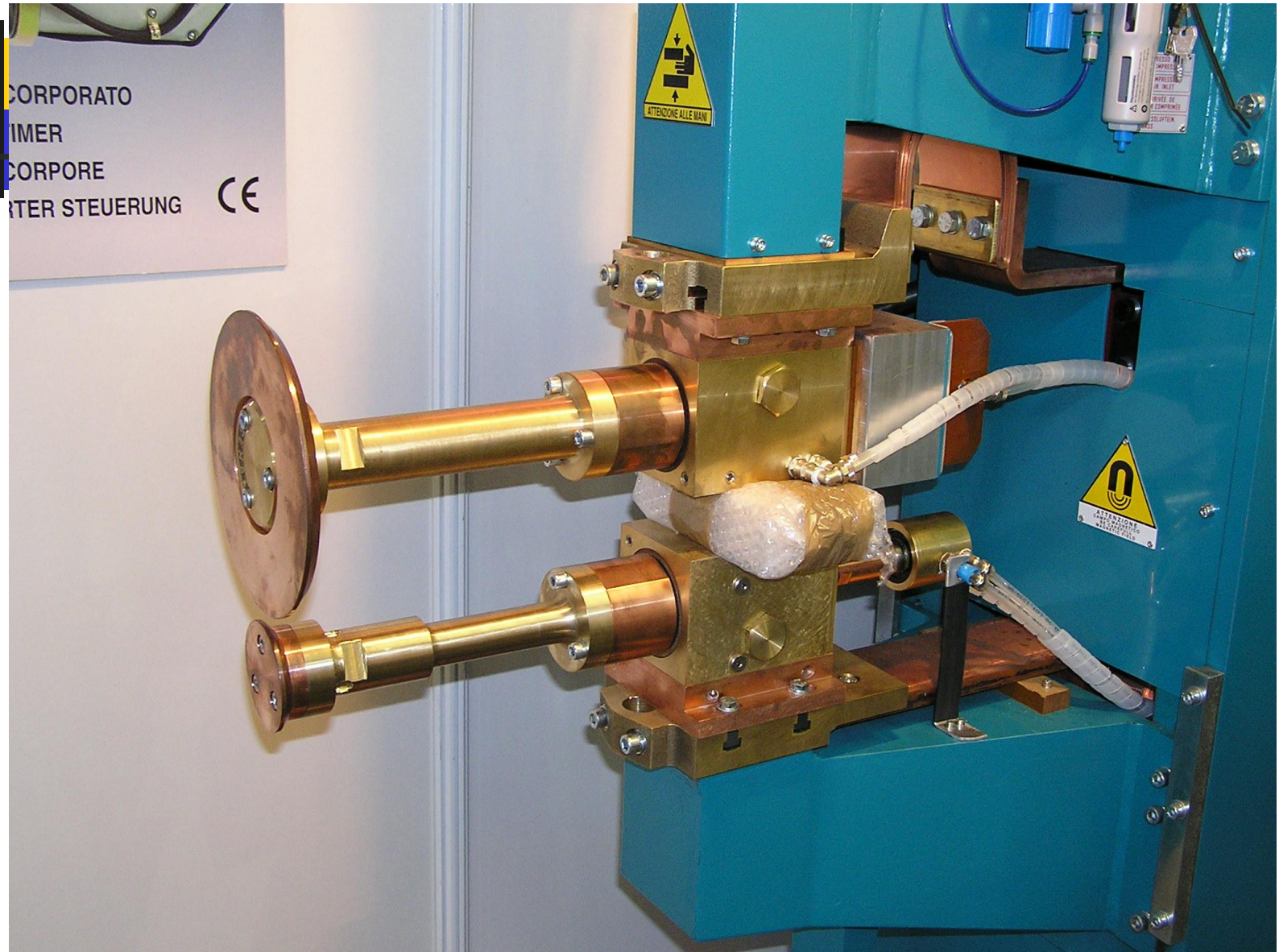












CORPORATO  
TIMER  
CORPORE  
TER STEUERUNG





# TŘECÍ SVAŘOVÁNÍ

---

- Základní princip svařování třením je založen na vzájemném pohybu dvou součástí při působení přítláčné síly. Nejčastěji se svařují rotační součásti, kdy jeden souose vystředěný díl svařované součásti rotuje a druhý stojí, nebo vykonává opačný pohyb. Používá se i přímočarý vzájemný pohyb.
- Na jeden z dílů působí přítláčná 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.

# 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.



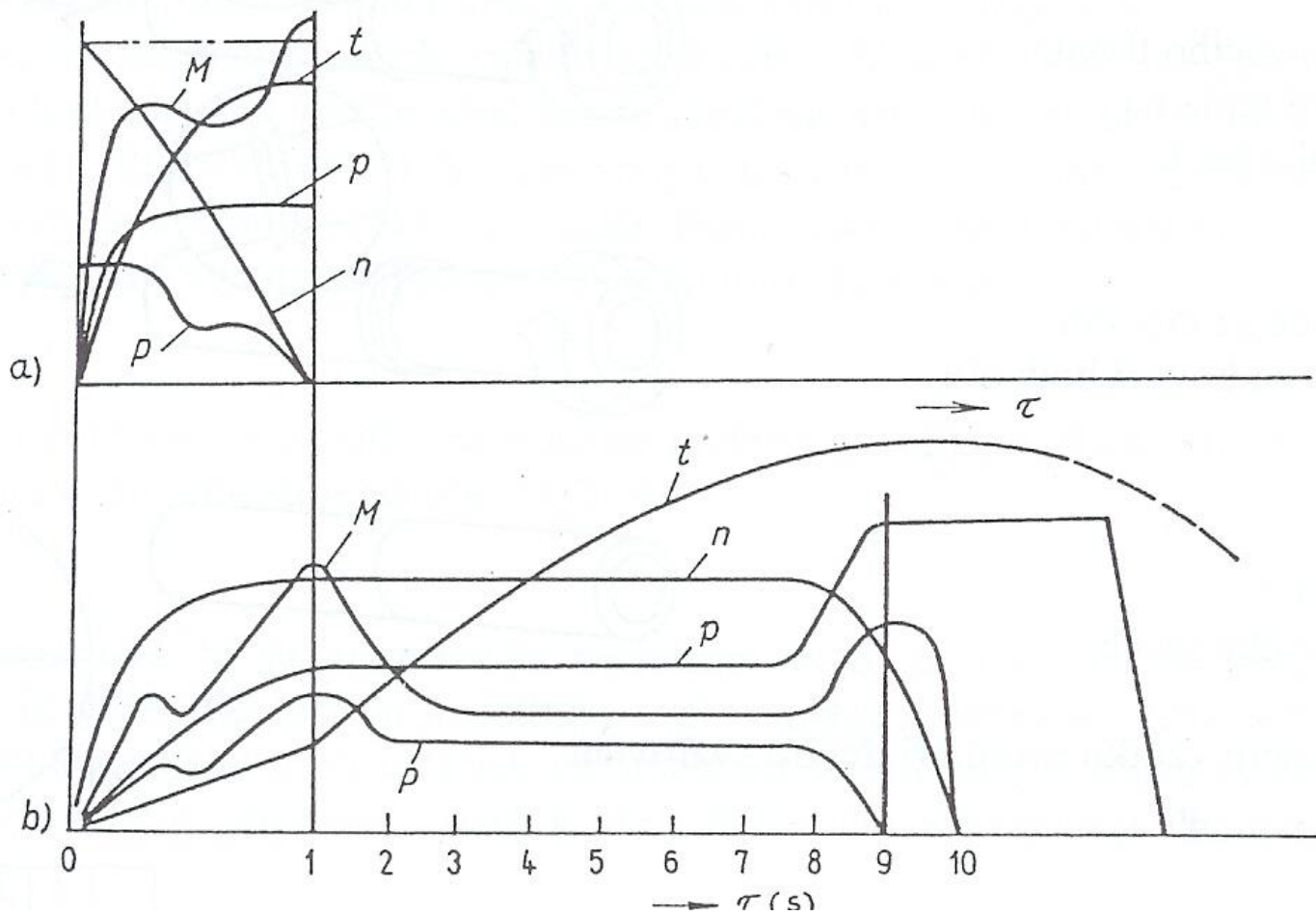
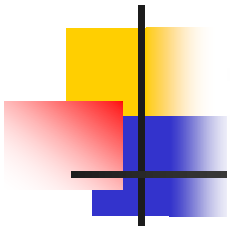
---

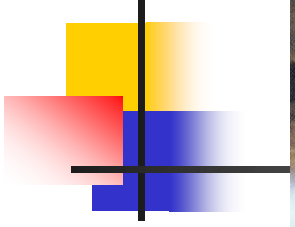
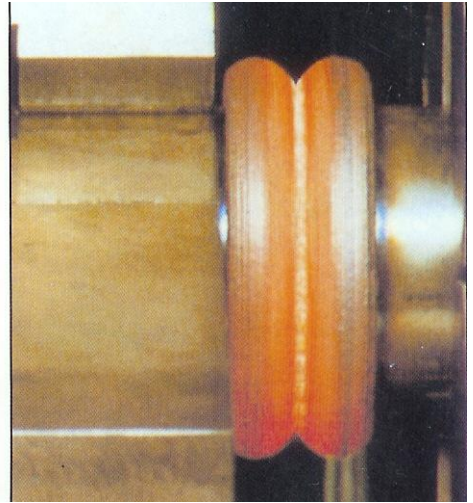
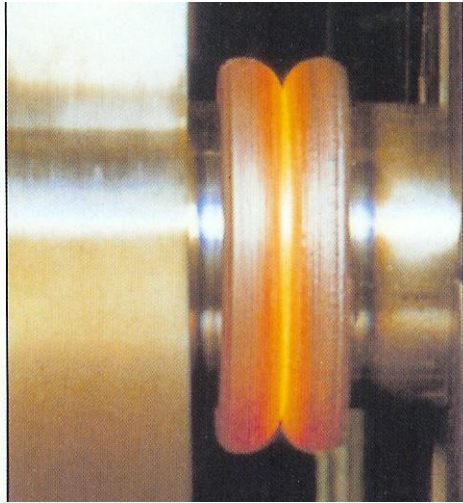
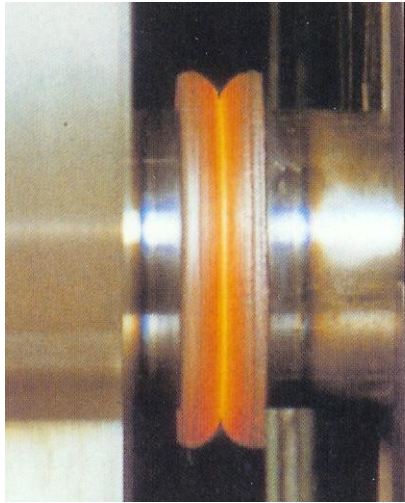
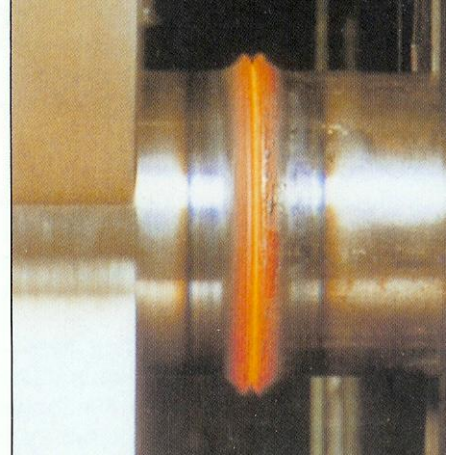
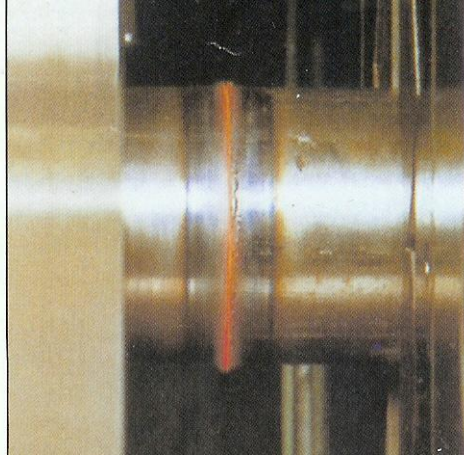
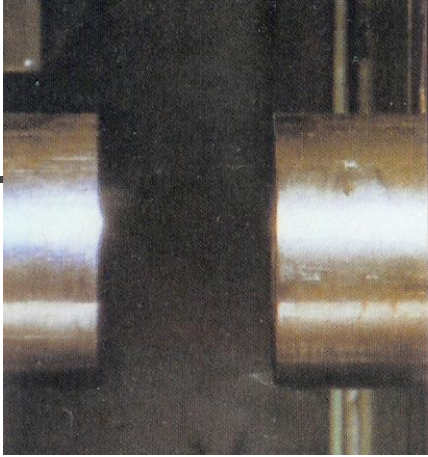
V současnosti jsou známy dva základní způsoby rotačního svařování třením:

- svařování s přímým pohonem – konvenční
- 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.





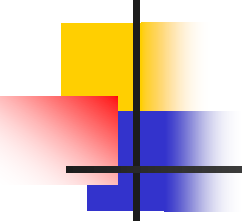




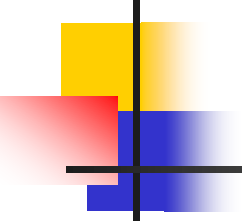
# Konvenční svařování

---

- **Parametry svařování :**
- 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 (500 – 15000 min<sup>-1</sup>) lze určit ze vztahů:
- **ocel**  $n.d = ( 1,2 - 6,0 ) m.s-1$
- **měď**  $n.d = ( 4,0 - 4,5 ) m.s-1$
- **titan**  $n.d = ( 8,0 - 10,0 ) m.s-1$

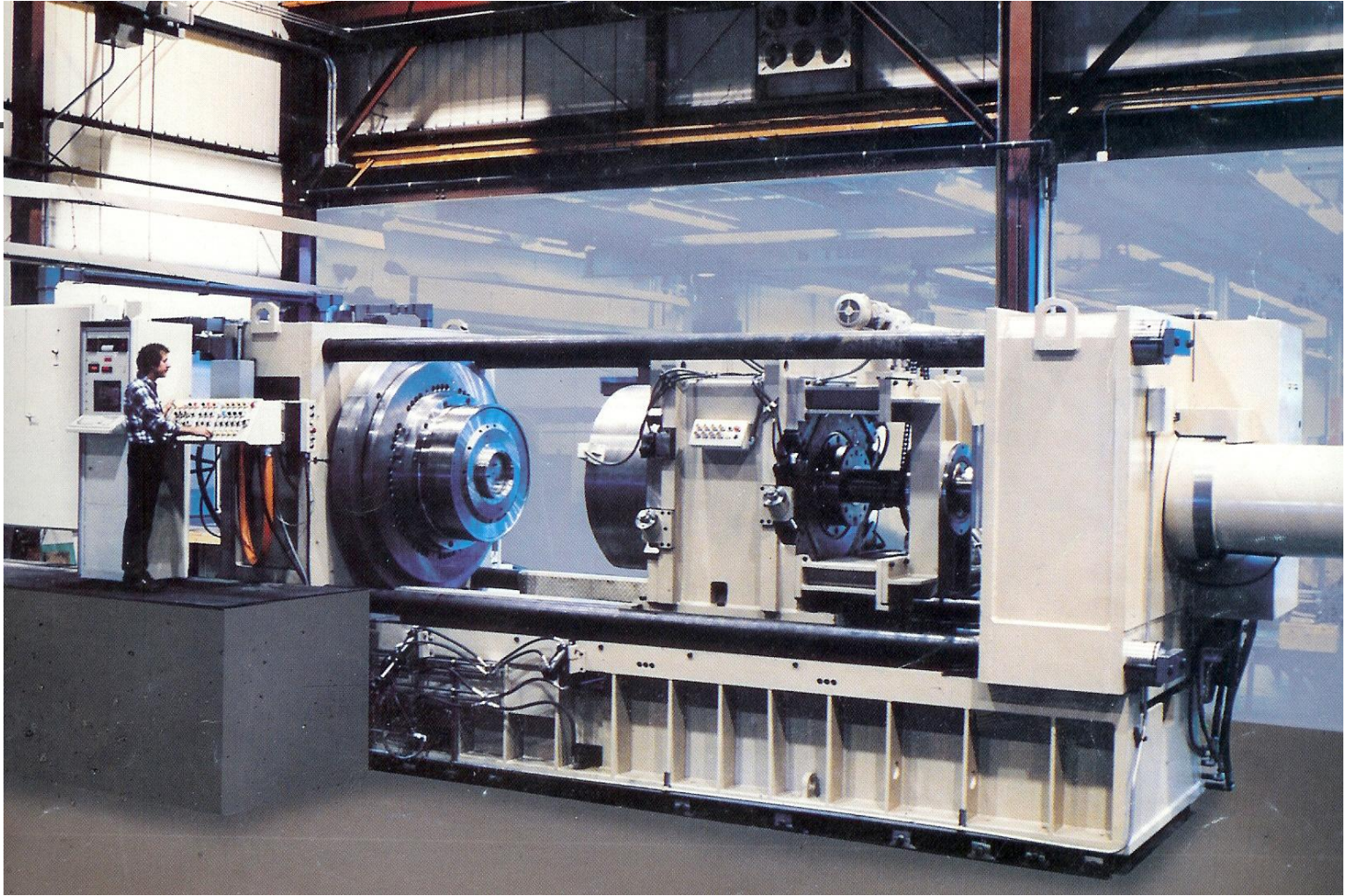
- 
- Měrný tlak má u konvenčního svařování dvě hodnoty: **Třecí tlak** je konstantní v průběhu rotace součásti a zajišťuje ohřev svařované plochy, tvorbu výronku, čistící procesy. Jeho nízká hodnota prodlužuje dobu svařování a vysoká hodnota třecího tlaku vytlačuje plastický kov z místa svaru a hrozí 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
  - čas kovací v intervalu 1 – 3 s.

# Setrvačnickové 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 v rozmezí od 500 do 40 000  $\text{min}^{-1}$ .



# 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.

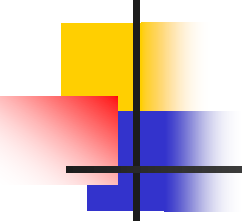


# Svařování třením

Příklady svařenců

- Příklady svařovaných součástí
- Heterogenní svarové spoje.



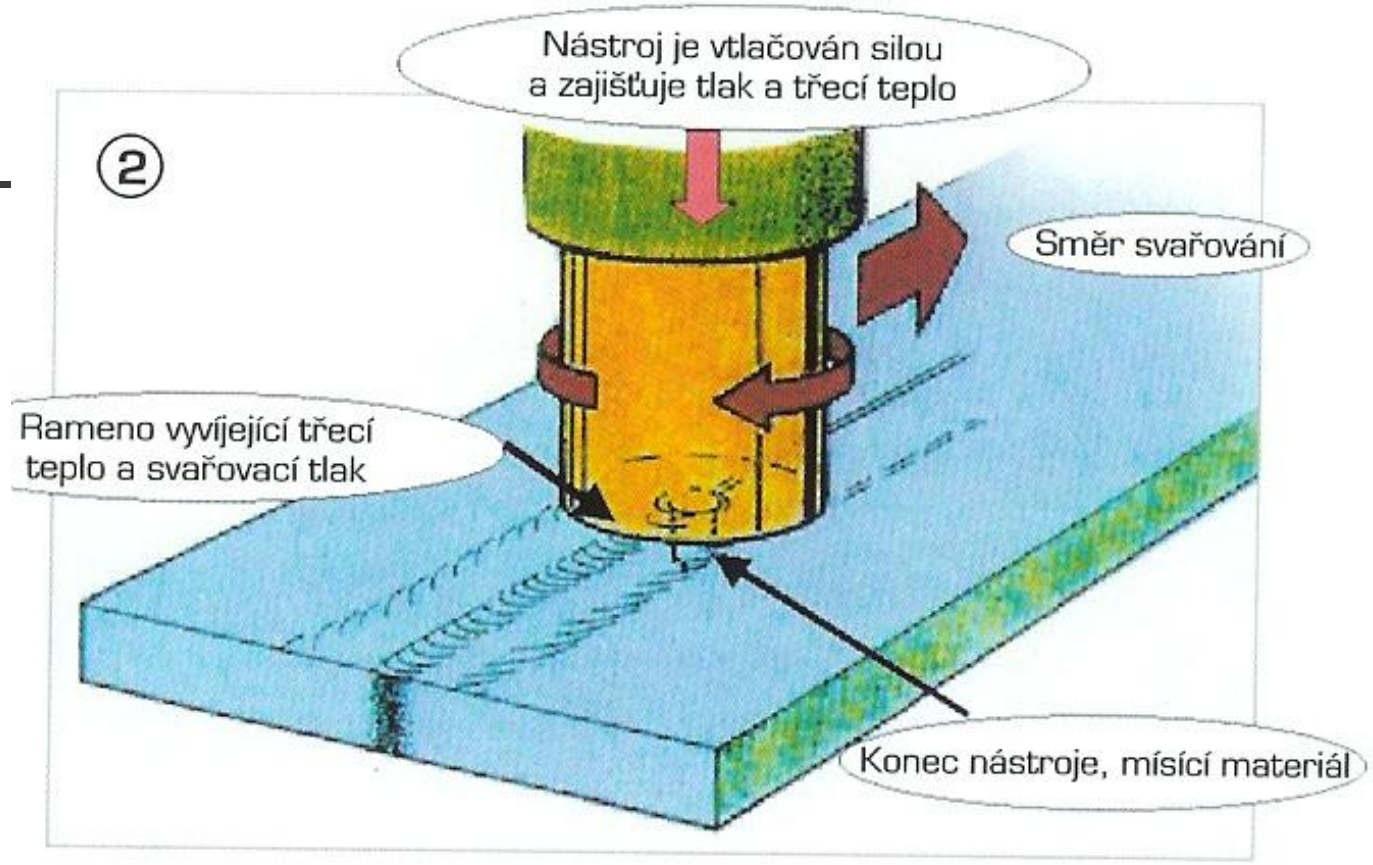
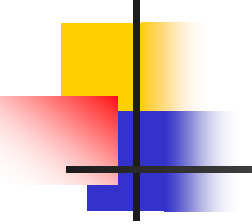
- 
- 
- Aplikací třecího svařování je velmi mnoho např. v automobilovém průmyslu – kardanové hřídele, řídicí tyče, pastorky, ventily spalovacích motorů, hnací hřídele, tlumičů, hřídelí turbodmychadel, vačkových hřídelí, komplety náprav atd. V oblasti těžebního průmyslu svařování vrtných tyčí, uzavíracích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



# Třecí svařování promísením rotujícím nástrojem FSW – Fiction Stir Welding

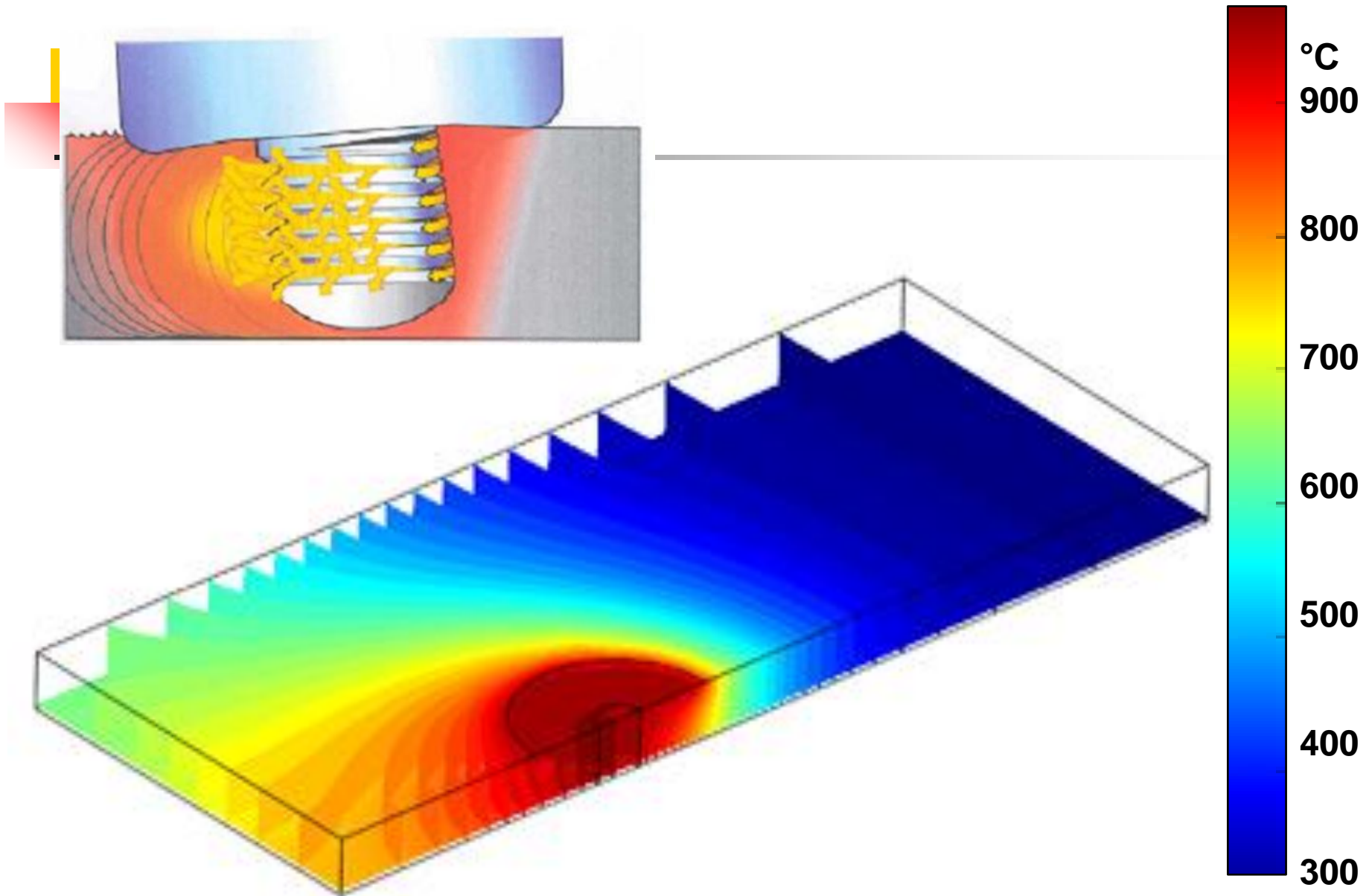
---

- Princip metody je založený na vtlačování rotujícího nástroje do svarové mezery tupého spoje a byl vyvinutý již v roce 1991 firmou TWI v Anglii . V místě kontaktu trnu se svařovaným materiálem dochází k ohřevu kovu a vytvoření vysoce plastické oblasti kde dochází k vzájemnému promísení kovu. Plastický materiál je velkou kovací silou vytlačován na zadní stranu trnu, kde dochází k vytvoření svarového spoje.





# Tepelné poměry při svařování třením oceli



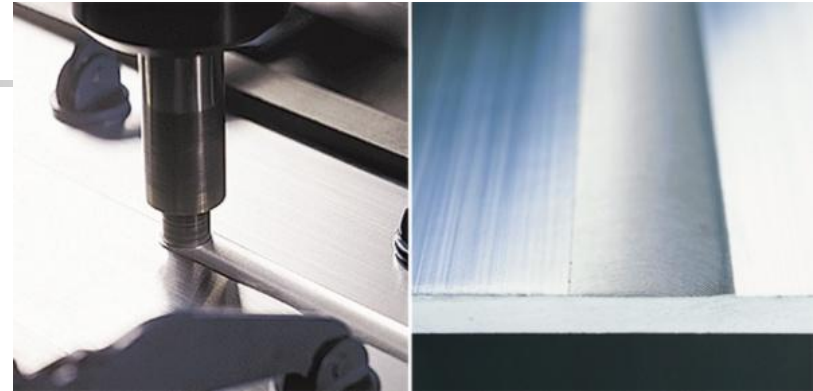
# Tvary funkční části třecích prvků



# Friction Stir Welding

metoda budoucnosti?

- Metoda uvedená v roce 1991 (TWI)
- Přes 500 světových patentů
- Aplikace
  - letectví
  - kosmonautika



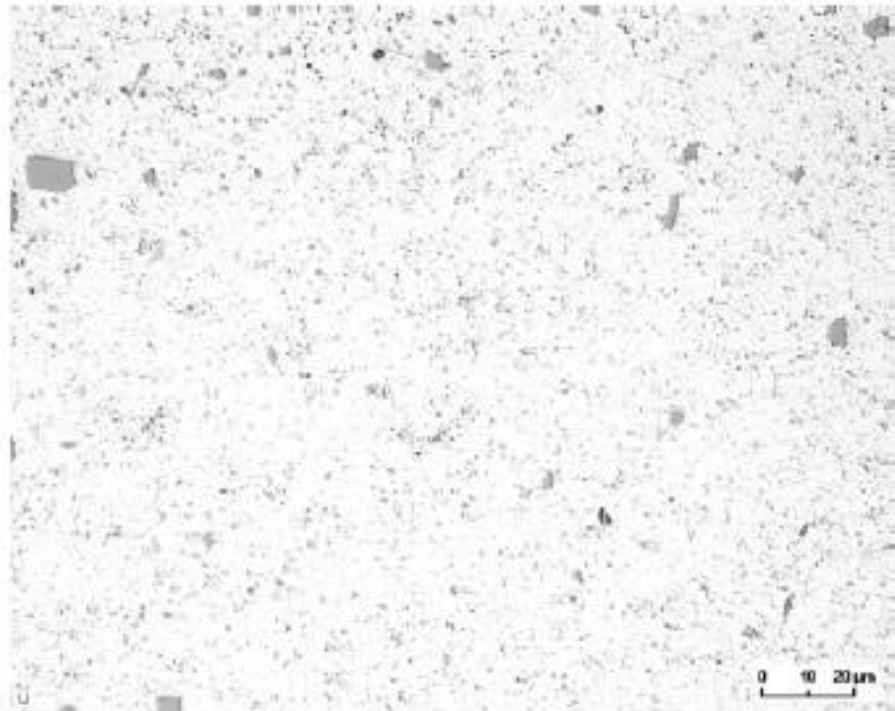




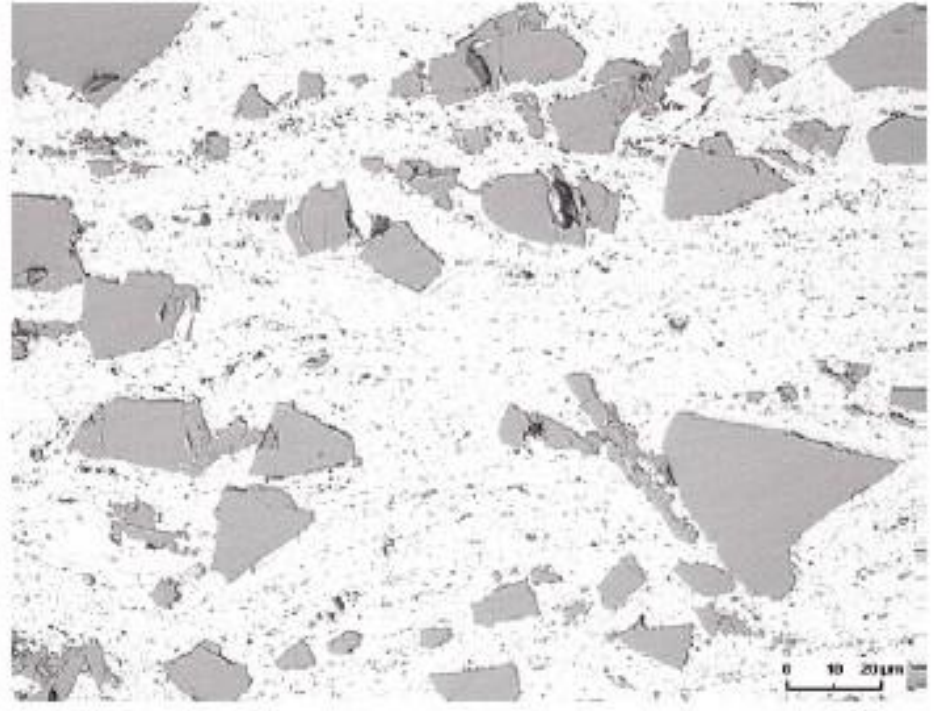
Svařování friction stir welding je ve světě stále více používána pro svařování vytvrditelných Al a Mg slitin. Minimální tepelné ovlivnění nesnižuje pevnost materiálu v TOO. Hlavní aplikace – letectví, kosmonautika, stavba lodí, nákladních automobilů a vagonů.



# Svarový kov – vytvrzený Al



Svarový kov



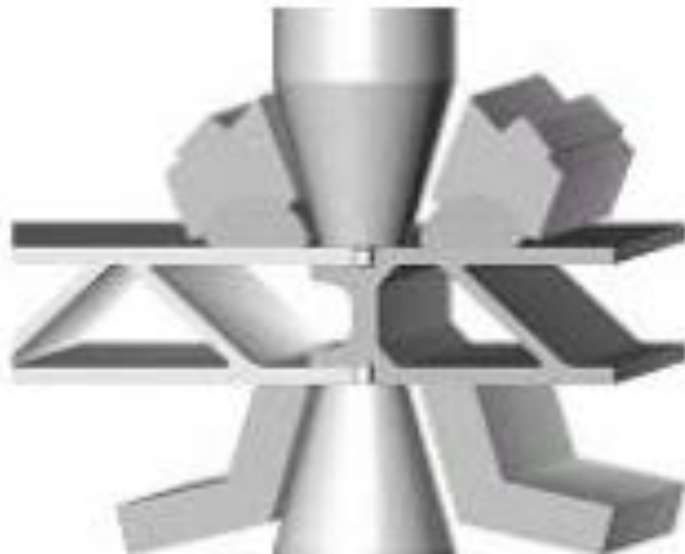
Základní materiál

# Svarový faktor

## pevnost svarového kovu

Materiál	$R_{e0,2}$	$R_m$	A	Faktor svaru $R_{m_{FSW}}/R_{m_{ZM}}$
5083 – O (ZM)	148	298	23,5	N/A
5083 – O (FSW)	141	298	23,0	1,00
5083 – H321 (ZM)	249	336	16,5	N/A
5083 – H321 (FSW)	153	305	22,5	0,91
6082 – T6 (ZM)	286	301	10,4	N/A
6082 – T6 (FSW)	160	254	4,85	0,83
6082 – T6 (FSW) umělé stárnutí	274	300	6,4	1,00
7108 – T79	295	370	14	N/A
7108 – T79 (FSW)	210	320	12	0,86
7108 – T79 (FSW) přirozené stárnutí	245	350	11	0,95

# Svařování hliníkových profilů pro dopravní techniku

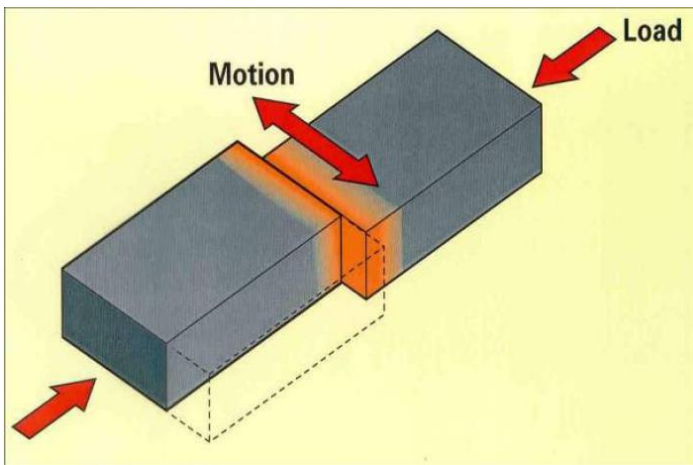


# Linear friction welding

## historie a princip metody

### Linear Friction Welding (LFW)

- Svařování třením stejných nebo rozdílných kovů
- Principem je metody velmi blízko svařováním třením za rotace ale zde je pohyb přímočarý
- První pokusy představeny na TWI Ltd v 1980s
- Jediná současná komerční aplikace se omezuje na přivařování lopatek turbin k oběžnému kolu

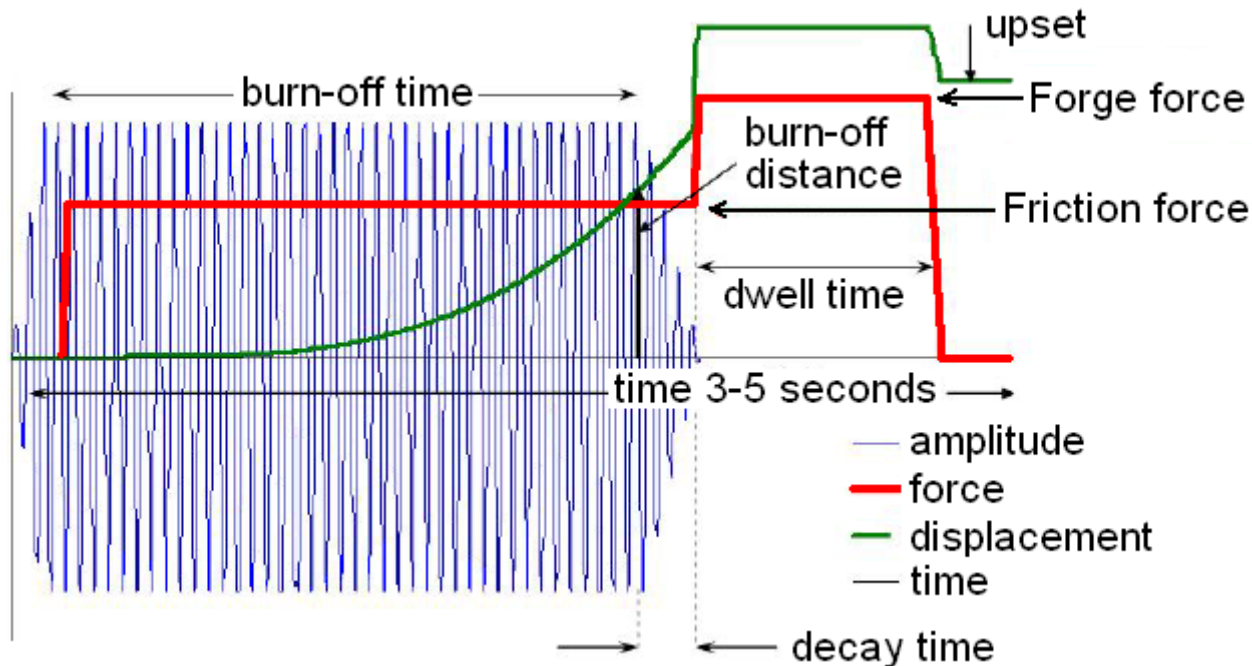




# Linear friction welding

## Základní parametry procesu

- Frekvence oscilace *20-120 Hz*
- Frekvence amplitudy *1-3.5 mm*
- Přítlak *50-300 N/mm<sup>2</sup>*
- Dokování (posun)
  - Prodleva *0-2 s*
  - Dokovací napětí *50-350 N/mm<sup>2</sup>*

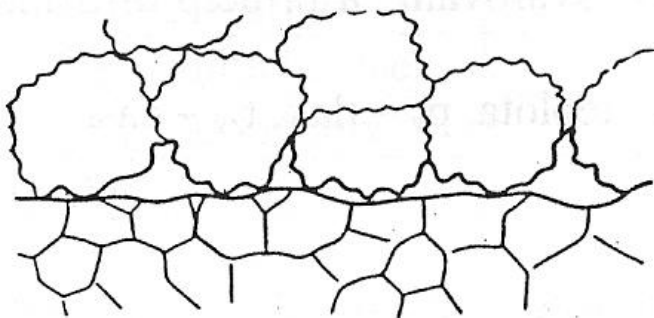




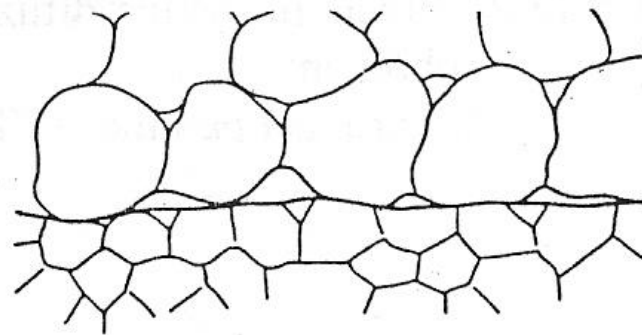
# DIFUZNÍ SVAŘOVÁNÍ

---

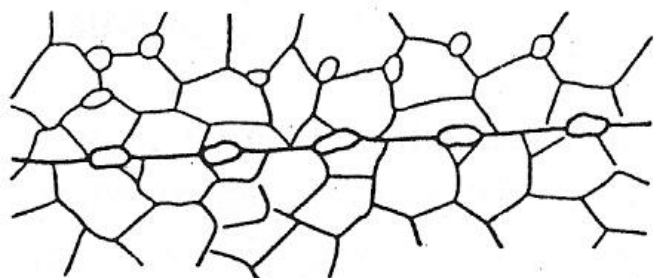
- Vlastní spojení kovů při tomto způsobu svařování vzniká za působení teploty a odpovídajícího měrného tlaku na kontaktních plochách. Spoj je tvořen přiblížením kontaktních ploch v důsledku lokální plastické deformace, která zaručuje vzájemnou difúzi v povrchových vrstvách spojovaných materiálů.
- Proces difúzního svařování je možno rozdělit na tři stadia:
- Počáteční kontakt povrchu při kterém nastává deformace povrchových nerovností..
- Druhé stadium je charakterizováno přemístováním vakancí a dislokací při počátku vzájemné difúze atomu.
- 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.



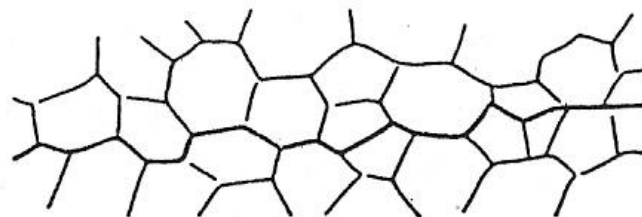
a)



b)



c)



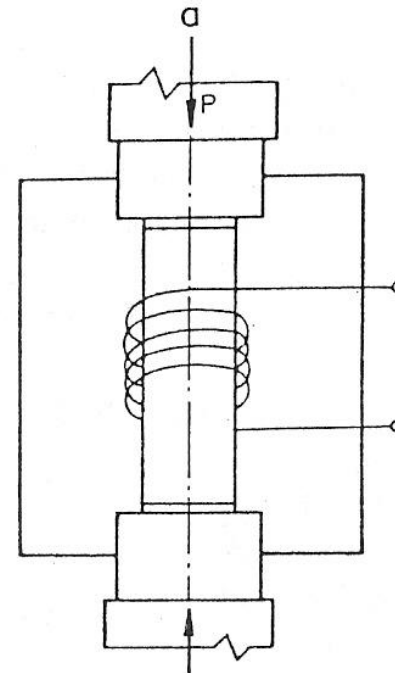
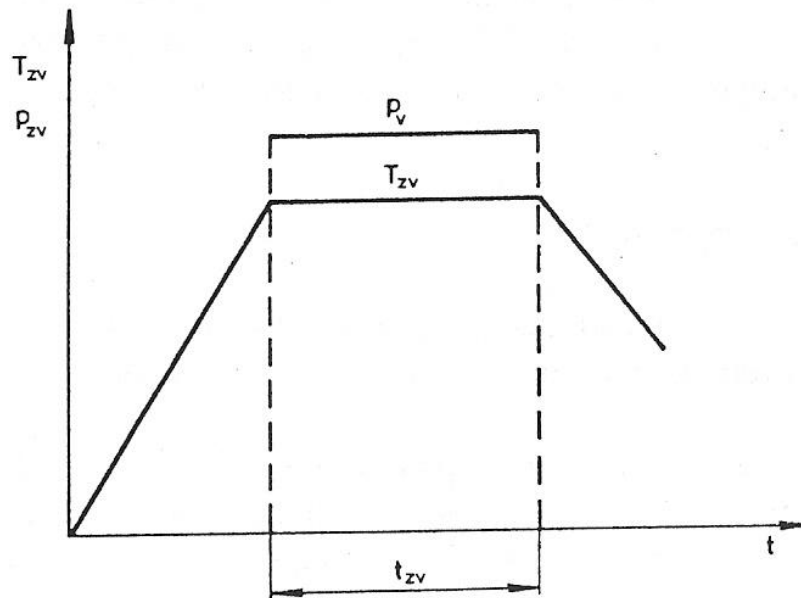
d)

### Stadia vytváření difúzního spoje

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

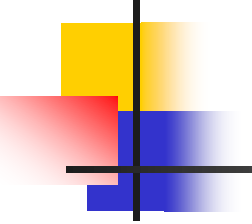
# Pracovní cyklus difúzního svařování a princip difúzního svařování s indukčním ohřevem

Svařovací parametry:  $T_{sv}$  – teplota,  $p_{sv}$  – tlak,  $t_{sv}$  – čas.





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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 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.
  - 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.

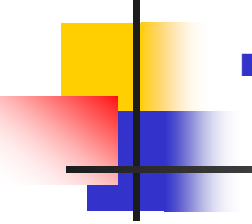


# Využití difúzního svařování

---

- 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.

# SPAŘOVÁNÍ TLAKEM ZA STUDENA

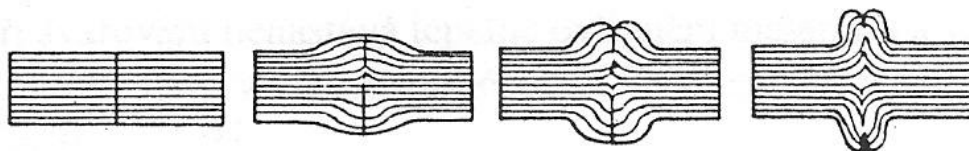
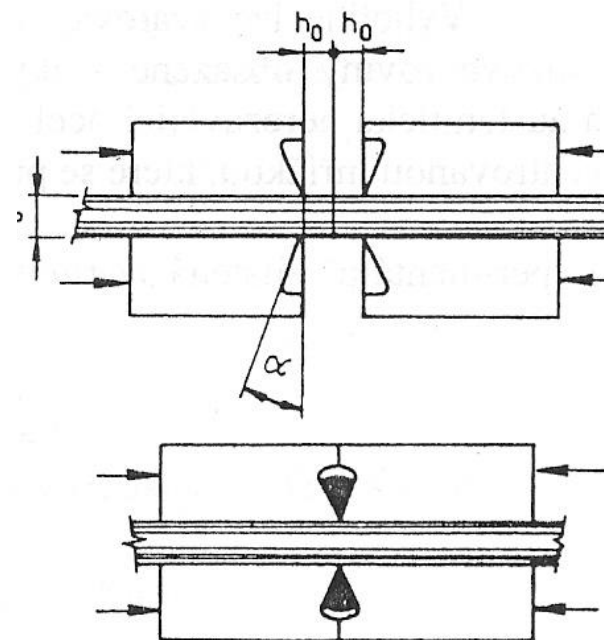
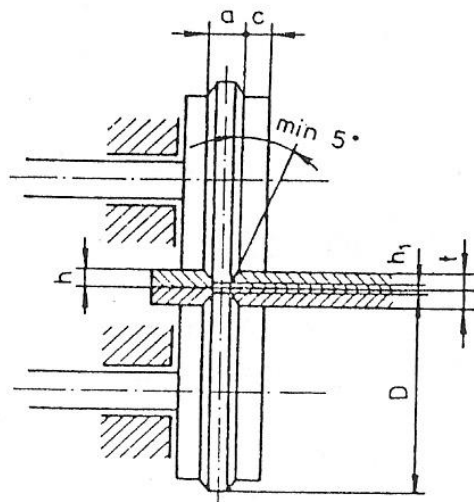
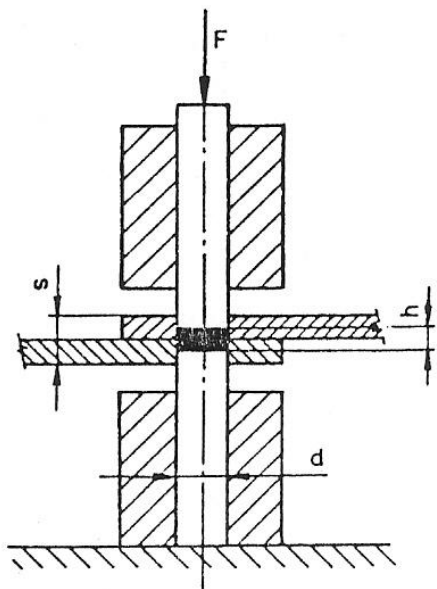
- 
- Principem svařování je přiblížení povrchů svařovaných materiálů na vzdálenost řádově parametrů mřížky, kdy dochází k interakci mezi jednotlivými atomy kovu za vzniku pevné vazby. K dosažení požadovaného přiblížení je nutná výrazná plastická deformace, která musí být minimálně 60%.

Nejdůležitější podmínky svařování jsou:

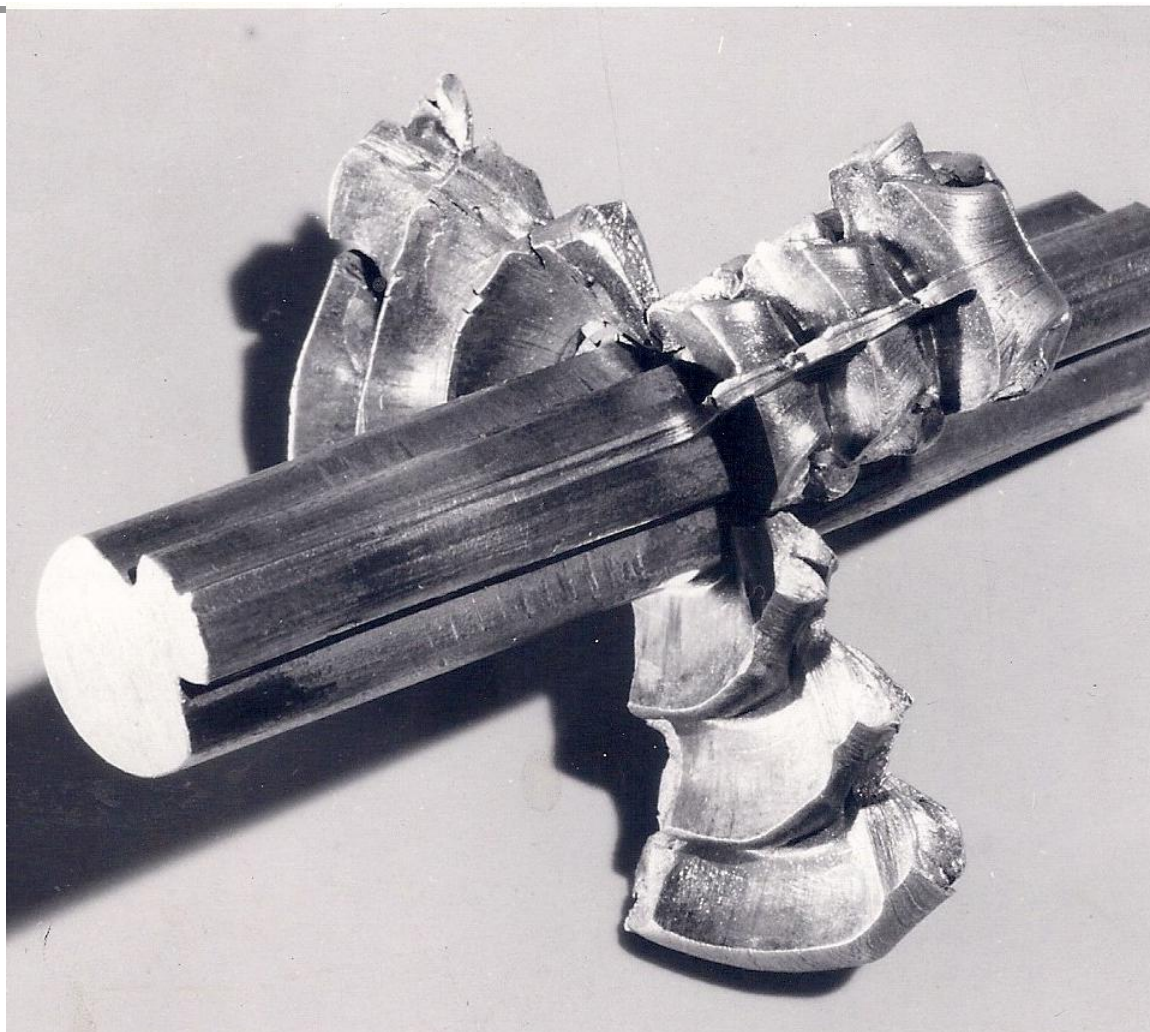
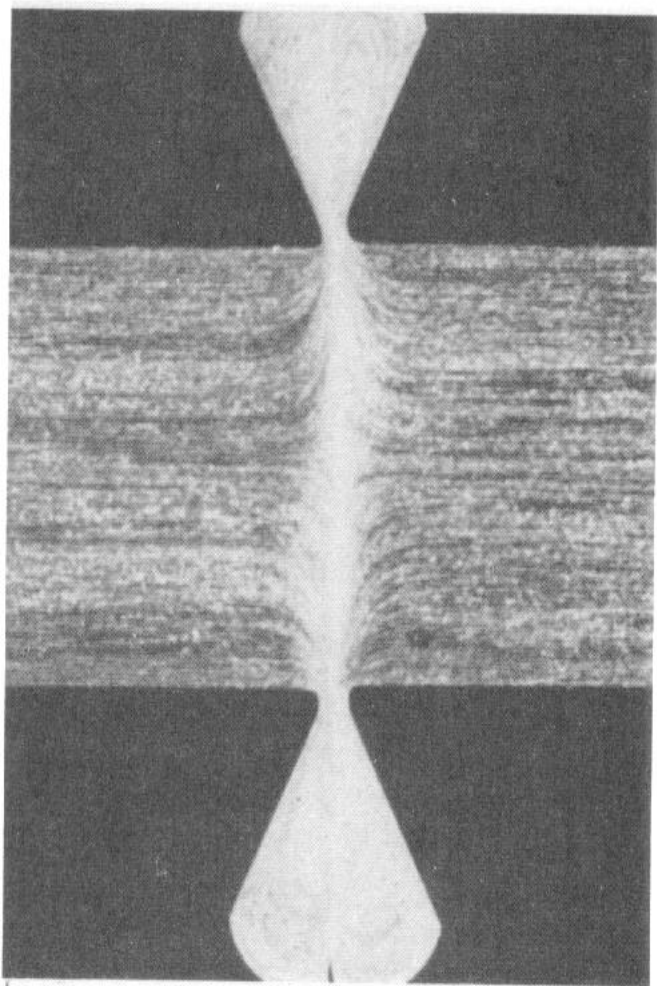
- kontinuální plastická deformace
- intenzivní tečení kovu v oblasti rozhraní
- rozrušení oxidů a jejich vytlačení ze spoje
- intenzivní pohyb dislokací s tvorbou aktivních center
- všestranný tlak v závěrečném stadiu tvorby svaru
- čistota svarových ploch

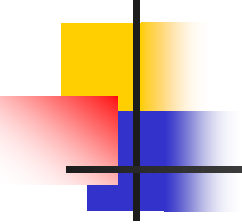


# Princip svařování na tupo, švové a přeplátováním



# Svar troleje trakčního vedení



- 
- 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.



- **Aplikace a využití svařování tlakem za studena:**

- svařování hliníkových a měděných vodičů
- svařování měděných jednožilných trolejí až do průřezu 150 mm<sup>2</sup>
- při výrobě tlumivek spojování Cu a Al
- v obalové technice – balení potravin, léčiv, radioaktivních, chemických a výbušných látek
- výroba hliníkového nádobí
- 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.

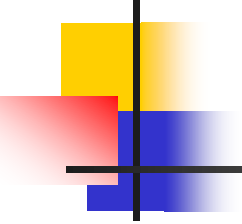




# ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

---

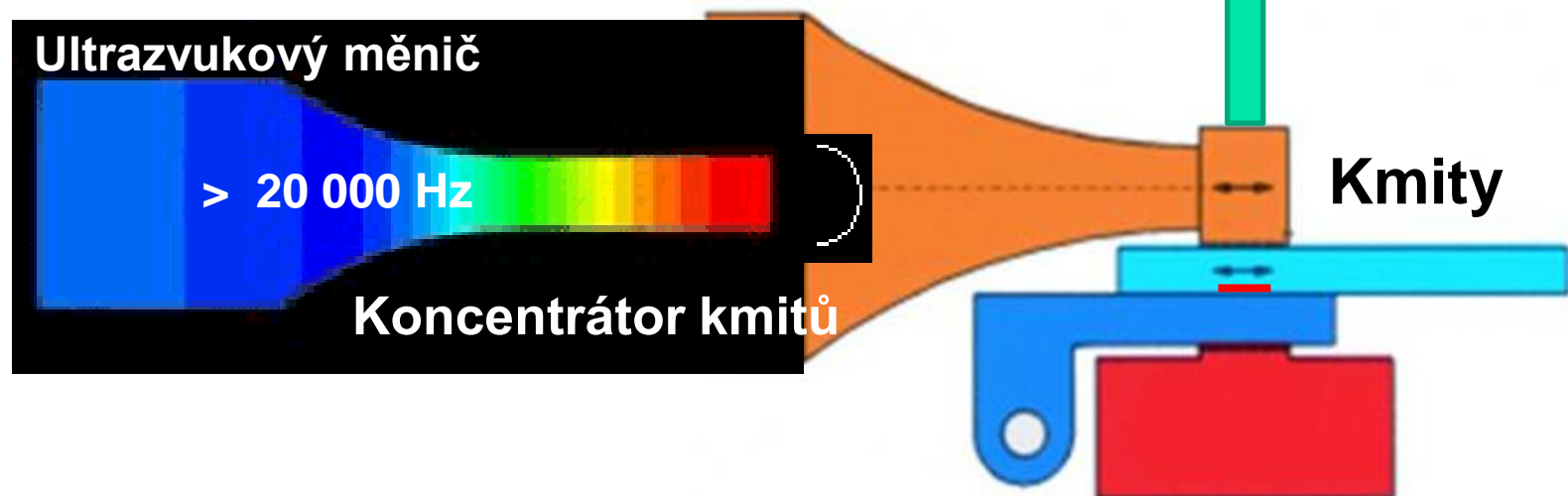
- Tento způsob svařování využívá mechanického kmitání o vysoké frekvenci – ultrazvuku, pro vytvoření svarového spoje. Zdroj kmitání se skládá z ultrazvukového měniče, jehož vinutí je napájeno elektronickým vysokofrekvenčním generátorem proudu o frekvenci 4 – 100 kHz. Vlastní kmitač se skládá z magnetostrikčního 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.

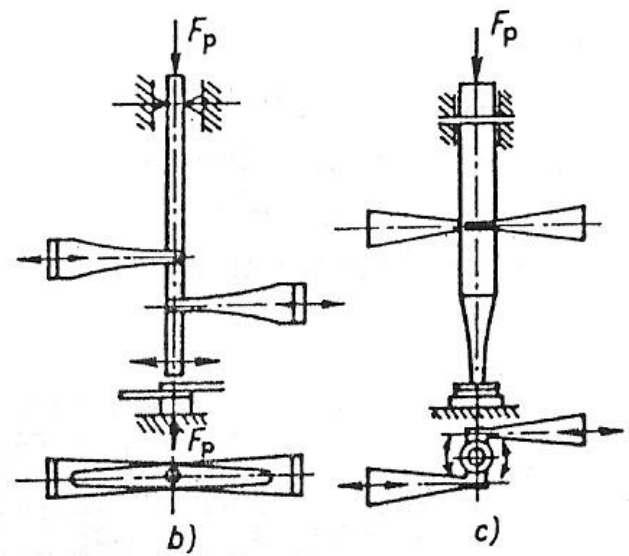
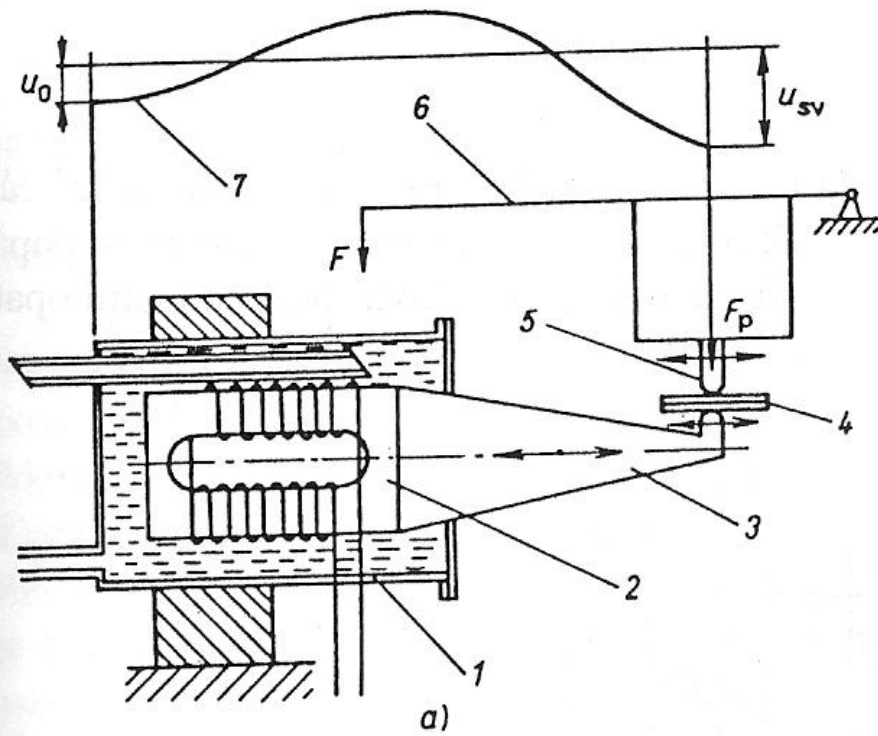
- 
- 
- Hlavní parametry svařování jsou především :
  - Amplituda výchylky sonotrody 5 - 35 [ $\mu\text{m.}$ ]
  - Přítlačná síla [N]
  - Frekvence UZ vlnění [Hz]
  - Svařovací čas [sec]
  - Frekvenci kmitů v zásadě určuje typ ultrazvukového zařízení a pohybuje se v intervalu mezi 10 až 100 kHz. Svařovací 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.

# Svařování ultrazvukem

Spoj vzniká za současného působení mechanických kmitů vyvolaných ultrazvukem a tlaku. Mechanické kmity spojovaných dílů vyvolají třením teplo, které není dostatečné pro natavení, avšak podpoří difúzi atomů.

Kmity jsou ve směru rovnoběžném se spojovanými plochami.







# Sonotrody





# 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:
- hliník 3,17 mm
- měď 2 mm
- ostatní materiály – Ni, Mo, Fe, Co, Ta atd. se svařují v rozsahu 0,5 – 0,7 mm.
- folie zlata, stříbra a platiny se dají svařovat do tl. 4. 10<sup>-3</sup> mm.



# 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.



# VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ

---

- 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.
- Sráž 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.



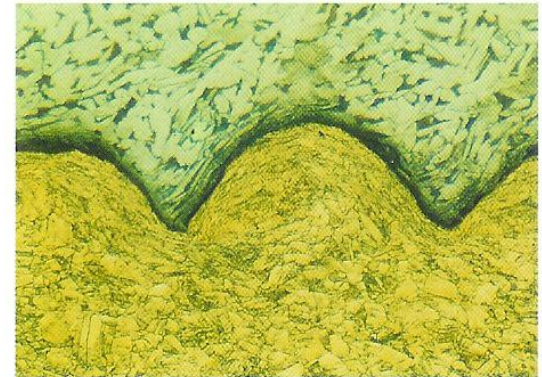
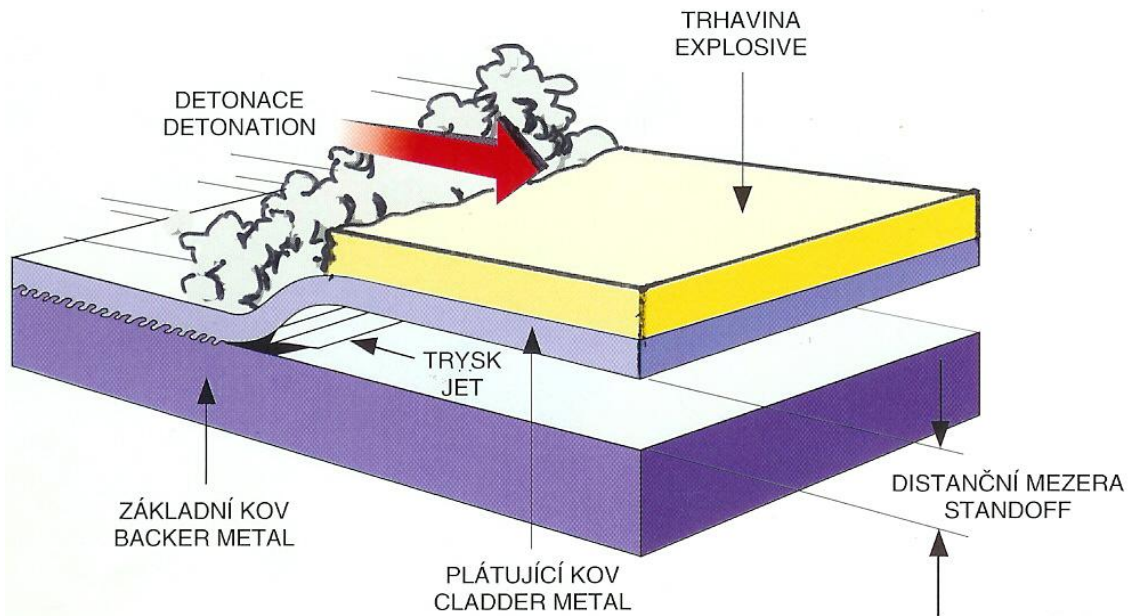
## Mechanismus vzniku spoje má tři stadia:

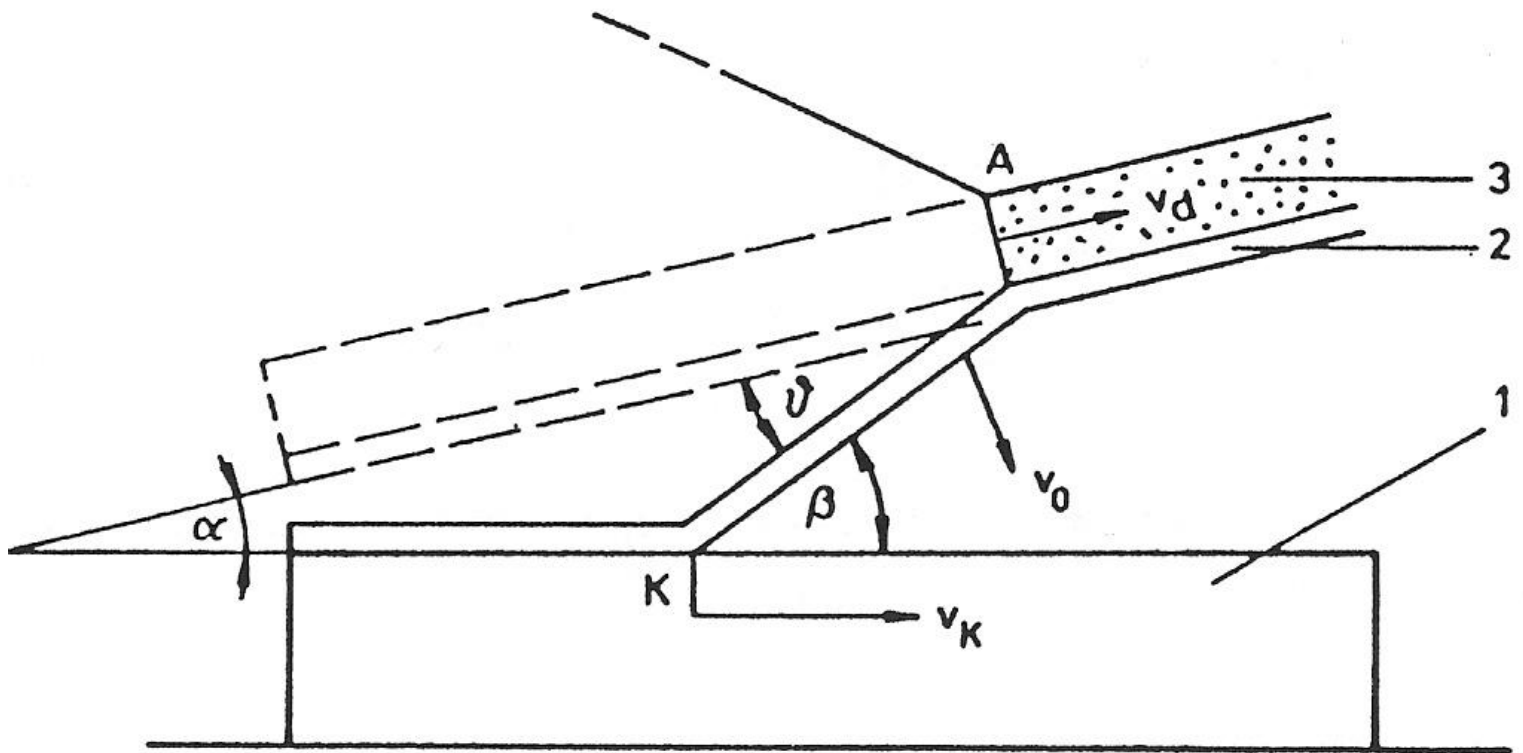
---

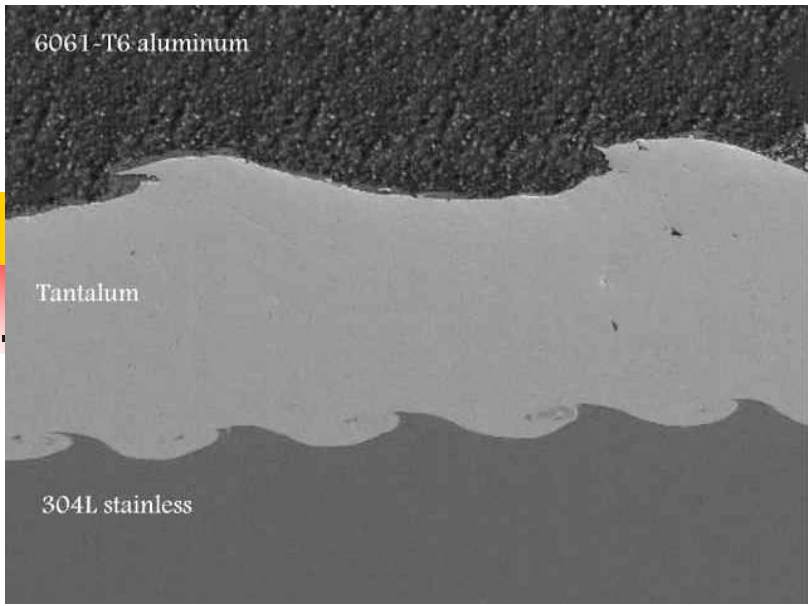
- Samočistící pochody vyvolané pohybem trysku a tvorba fyzikálního kontaktu přiblížením povrchů na malou vzdálenost.
- Aktivace povrchových vrstev za současného vytvoření vysoké hustoty aktivačních center a vzniku spoje.
- Relaxační jevy spoje po výrazné plastické deformaci. Absorbovaná kinetická energie je hlavní příčinou snížení úrovně tahových napětí avšak nadměrná plastická deformace může vést až k teplotě tavení a vzniku křehkých fází, dutin a trhlin.



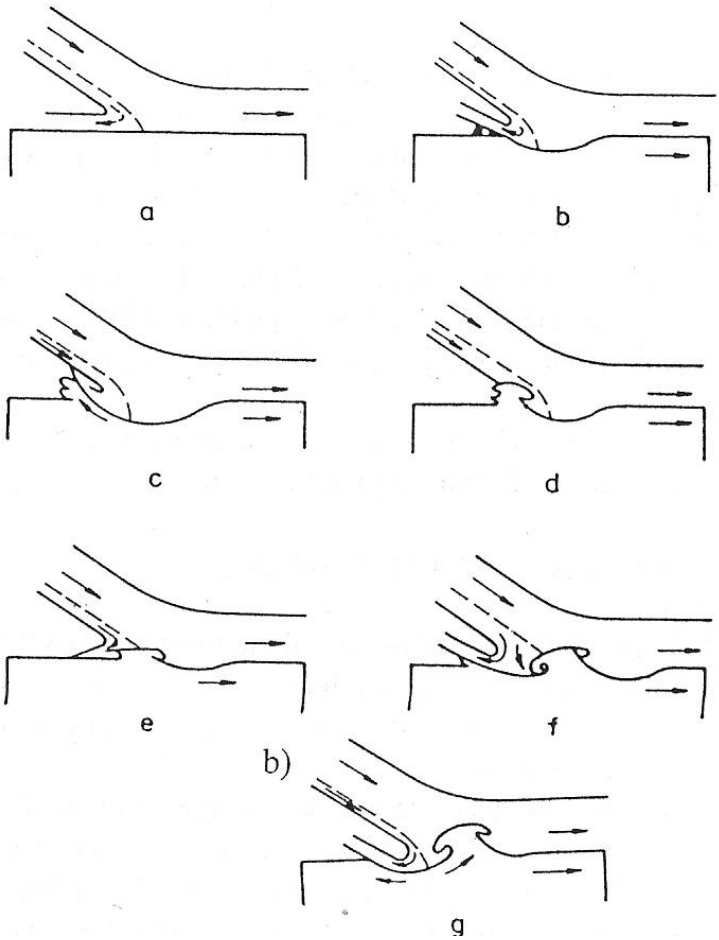
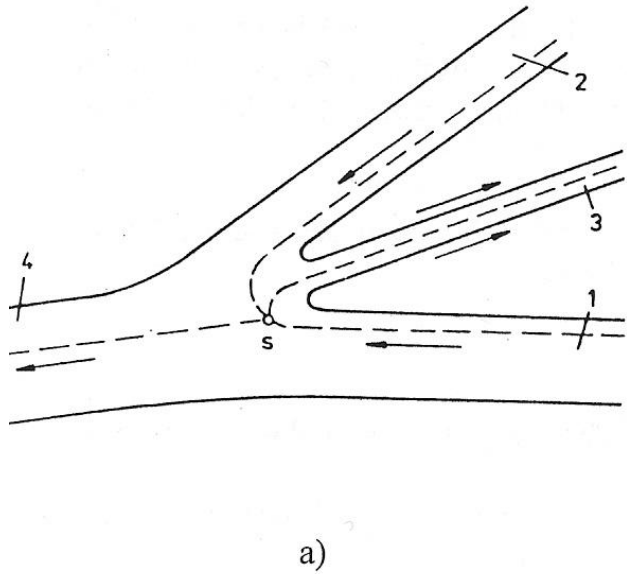
# Princip svařování výbuchem







# Vznik vlny





# Trhaviny

---

- 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<sup>-1</sup>, detonační tlaky od 1,9 do 3,5 GPa.

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

- navařování (plátování) bimetálů a vícesložkových kompozitů ze speciálních slitin,
- přístrojová a měřicí technika, plátování částí chemických, petrochemických a potravinářských zařízení nerezavějící ocelí, navařování titanu při výrobě tepelných výměníků, svařování přechodových mezikusů pro následné tavné svařování různorodých – např. ocel a hliník pro spojení ocelové vany pro elektrolyzu 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