

# **Svařování laserem a elektronovým paprskem**



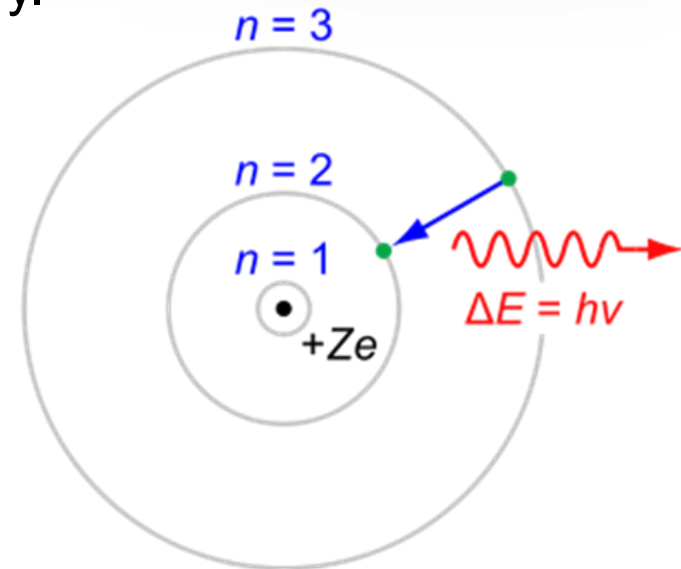
**doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Ing. Martin Švec, Ph.D.  
Ing. Šárka Bukovská**

# Svařování laserem - spontánní emise

Látka není tvořena jediným atomem. Je jich nepředstavitelně velké množství, takže při návratu vybuzených elektronů si každý atom „vybere“ některou z uvedených možností a jako celek vyzařuje vodík fotony různých vlnových délek (barev). Záření všech vyzařovaných vlnových délek tvoří **spektrum** tvořené spektrálními čarami. Ve viditelné části vodíkového spektra jsou jen 4 spektrální čáry.

Atomu se dodá  $E \rightarrow$  ta vyrazí elektron na vyšší energetickou hladinu (z  $E_1$  přejde na  $E_2$ ), elektron se na hladině  $E_2$  neudrží dlouho a zase spadne na  $E_1$  a při tom vyzáří fotony  $\rightarrow$  je to spontánní emise a pro svařování nám nestačí, je potřeba, aby se na nižší hladiny vracely najednou

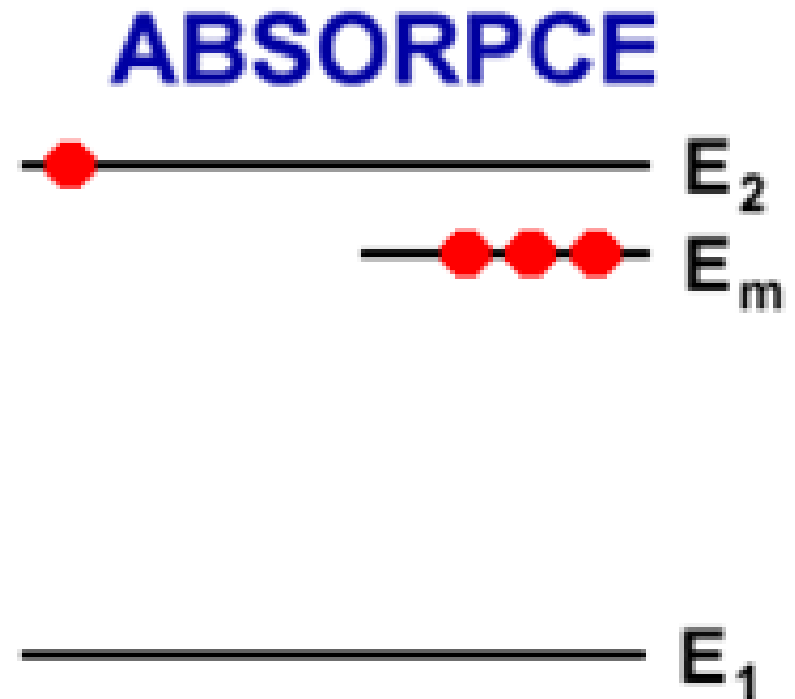
- toho lze docílit mezihladinou  $E_m$ , tedy **tří, nebo více hladinovým aktivním prostředím  $\rightarrow$  nastává hromadění atomů v excitovaném stavu na hladině  $E_m$ , po nahromadění spadnou najednou a vyzáří tak najednou velké množství energie (fotonů)**



# Svařování laserem - kvantový generátor

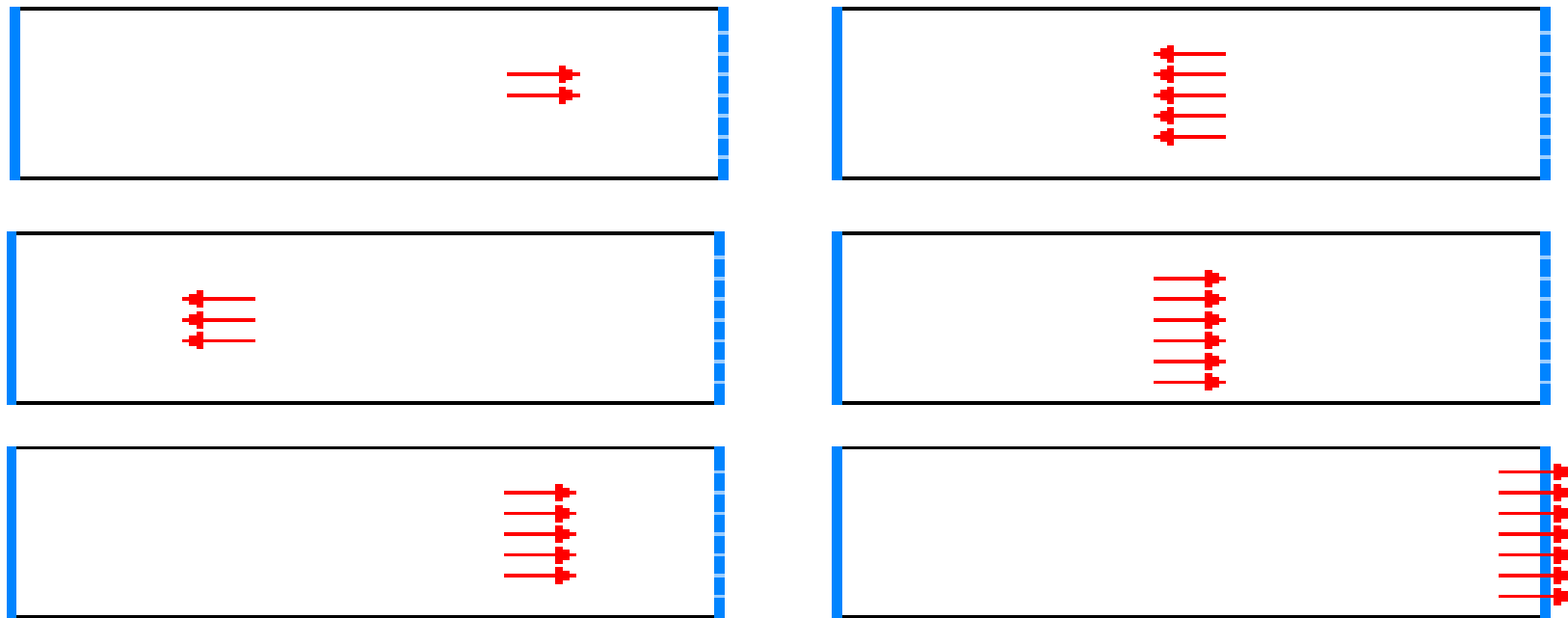
Ke konstrukci prvního laseru, bylo potřeba ještě vyřešit dva ryze technické problémy. Prvním bylo vytvoření nerovnovážného stavu - **více atomů na vyšších energetických hladinách**. Aby vše fungovalo, je třeba mít tři, **nebo více hladinové aktivní prostředí** a způsob dodání energie (čerpání). Tím je například výbojka vydávající nekoherentního (neuspořádaného) záření o určité vlnové délce. Elektron na energetické hladině  $E_1$  pohltí kvantum energie (foton) o energii  $E_{12}$ , odpovídající přechodu z energetické hladiny  $E_1$  na hladinu  $E_2$ . Doba existence elektronu na hladině  $E_2$  bude velice krátká a v čase  $t=10^{-8}$  s přejde elektron na metastabilní hladinu  $E_m$  a odtud po čase  $t=10^{-3}$  s přechází zpět na hladinu  $E_1$ , přičemž při tomto přechodu vyzáří foton s energií  $E_{m1}$ .

Přechod z hladiny  $E_1$  na hladinu  $E_2$  představuje ztráty, které způsobují ohřev aktivního prostředí. V důsledku rozdílných časů setrvání na dané energetické hladině nastává **hromadění atomů v excitovaném stavu na hladině  $E_m$** . Stimulovaná emise tak může nastat za podmínky, že počet elektronů na hladině  $E_m$  je větší než na hladině  $E_1$ . Přitom musí být dostatečnou úrovní čerpání kryty ztráty nezářivými přechody  $E_2 - E_1$  a další ztráty dané jakostí aktivního prostředí.



# Svařování laserem - optický rezonátor

Vstoupí-li do aktivního prostředí záření, jehož fotony mají frekvenci (energii) odpovídající přechodu  $E_{m1}$ , stimulují tyto fotony při setkání s excitovanými atomy přechody  $E_m - E_1$ . Přitom jsou emitovány fotony stejné energie, fáze a polarizace, jaké má stimulující záření. Znamená to, že každý excitovaný atom po setkání s fotonem stimulujícího záření vyzáří další foton shodného záření. Tento proces má charakter řetězové reakce a je dále zesilován optickým rezonátorem.



Optický rezonátor pevnolátkových laserů je vytvořen zbrošením protilehlých konců aktivního prostředí, přesně rovnoběžně a kolmo na osu tyčinky. Jeden konec je postříbřen a tvoří dokonalé zrcadlo (odrazivost až 99,9 %), druhé zrcadlo je částečně propustné.

# Druhy Laserů

Přestože všechny lasery pracují na stejném základě (stimulované emisi záření), liší se velmi výrazně svou konstrukcí i vlastnostmi. Pro jejich rozdělení do skupin můžeme zvolit různá kritéria:

## Podle aktivního prostředí:

- ✓ Pevnolátkové lasery.
- ✓ Plynové lasery.
- ✓ Kapalinové lasery.
- ✓ Polovodičové lasery.
- ✓ Plazmatické lasery.
- ✓ Vláknové lasery.
- ✓ Diskové lasery.

## Podle vlnových délek optického záření:

- ✓ Infračervené lasery.
- ✓ Lasery viditelného pásma.
- ✓ Ultrafialové lasery.
- ✓ Rentgenové lasery.

## Podle režimu práce:

- ✓ Pulzní.
- ✓ S dlouhými impulsy.
- ✓ S krátkými impulsy.
- ✓ S velmi krátkými impulsy (pikosekundové, femtosekundové).
- ✓ Kontinuální (spojitý).

## Podle typu buzení na lasery buzené:

- ✓ Opticky.
- ✓ Elektronovým svazkem.
- ✓ Tepelnými změnami.
- ✓ Chemicky.
- ✓ Rekombinací.
- ✓ Injekcí nosičů náboje.

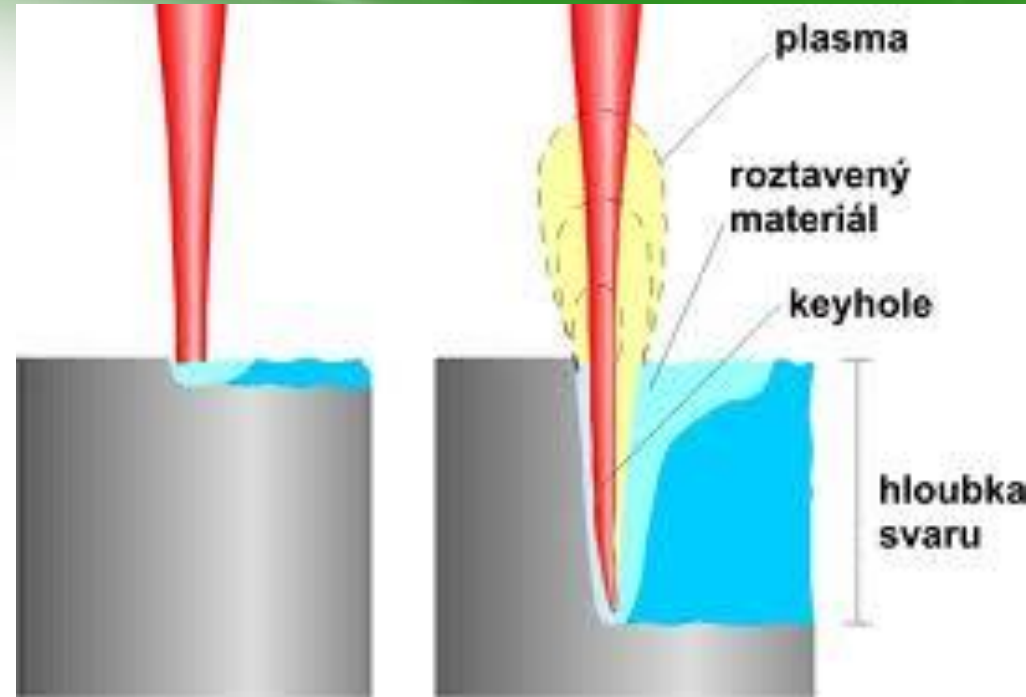
# Svařování laserem

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

Plazma se běžně vychyluje ofukováním ochranným plynem Ar, Ar+CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, (nejlepší výsledky He). Zároveň je chráněna tavná lázeň před okolní atmosférou.

Většinou se svařuje bez přídavných materiálů, ale vývoj směřuje k využití hybridních metod.

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 atd.



# Výhody a nevýhody laserového svař.

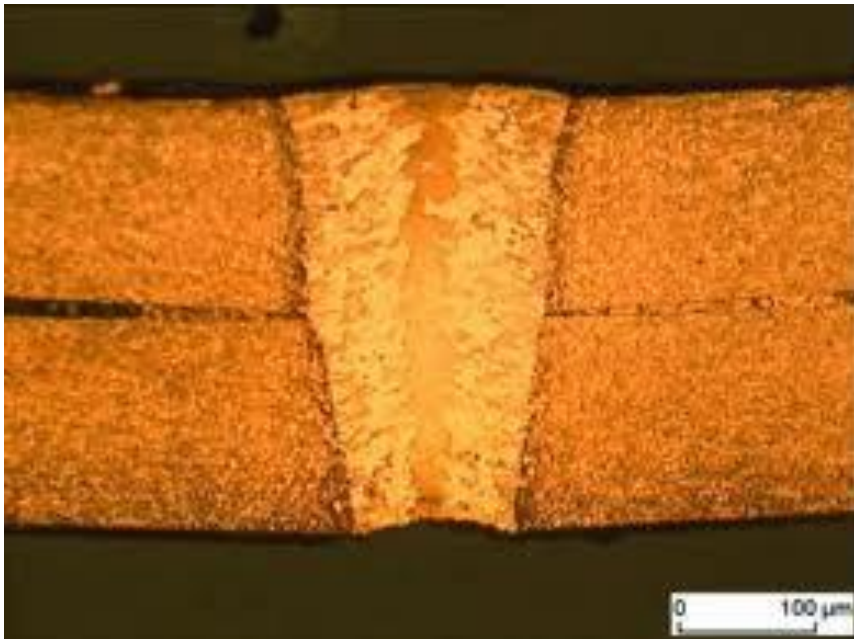
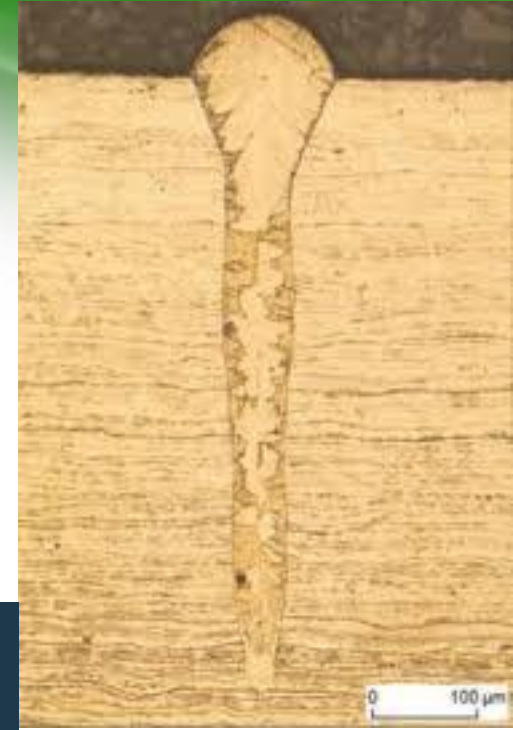
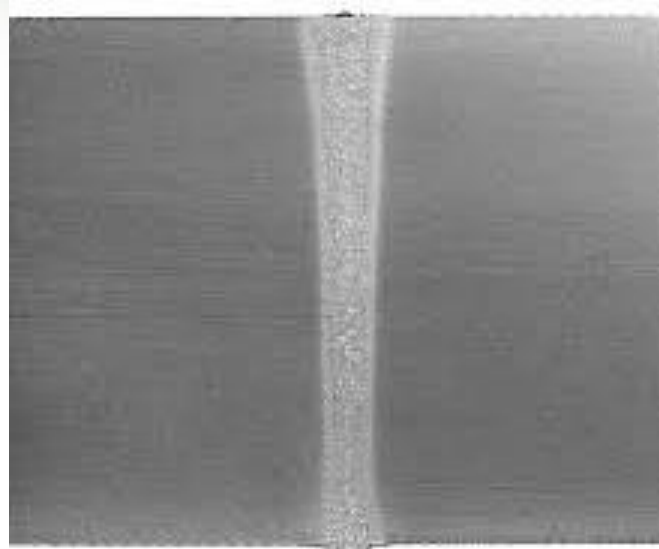
## Výhody svařování laserem

- 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 až do 15 mm.
- Možnost úpravy ohniskové vzdálenosti až na 1,6 m.
- Svařování tenkých plechů v automobilovém průmyslu bez ochranného plynu.

## Nevýhody svařování laserem

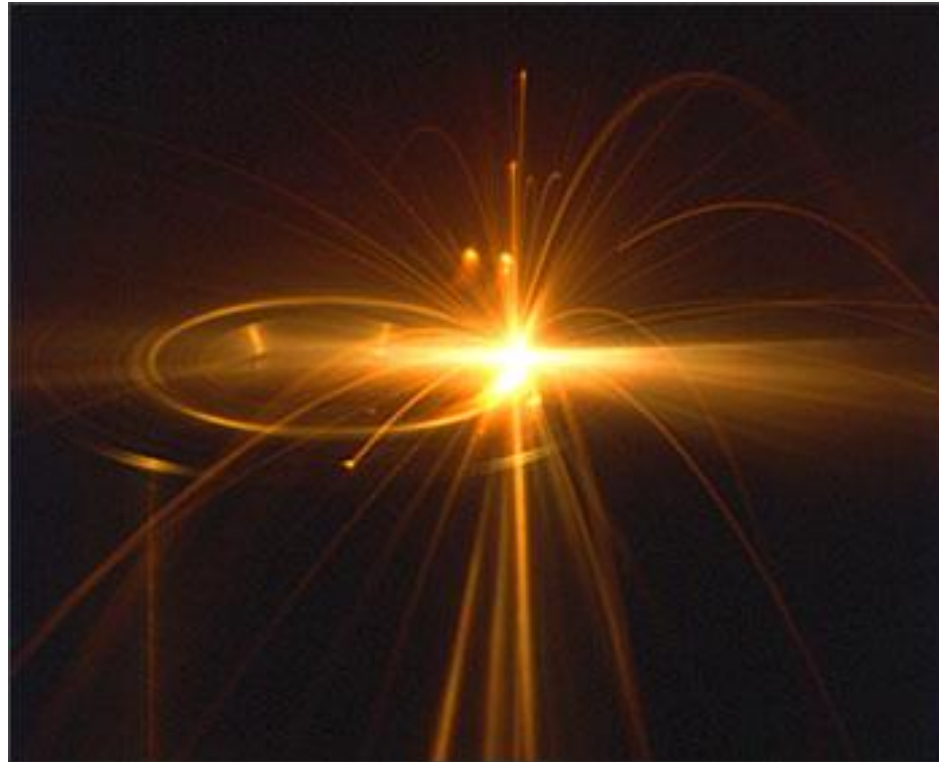
- Vyšší pořizovací cena.
- Nutnost pořízení poloautomatických zařízení, nebo robotů.
- Možnost svařování metalurgicky „čistých“ materiálů.
- Bezpečnost práce.
- Malá účinnost.

# Příklady laserových svarů





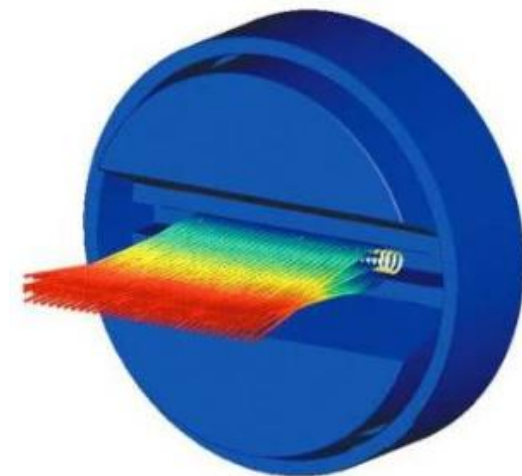
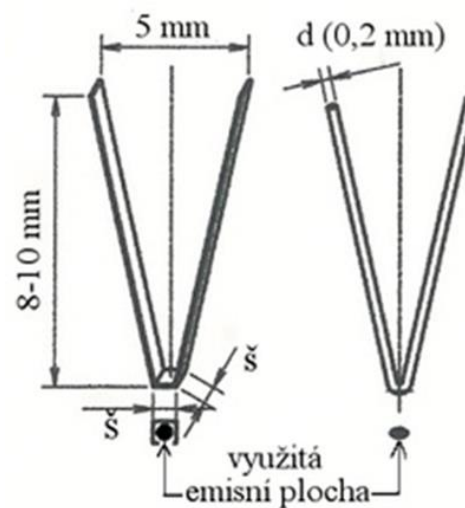
# ***Svařování elektronovým paprskem***



# Fyzikální podstata svařování EB

Svařování elektronovým paprskem je tavný způsob svařování, při kterém se tepelná energie tvoří dopadem zaostřeného (zfokusovaného) paprsku elektronů na svařovaný materiál. Emitovaným elektronům je elektrickým polem (vysokým napětím) dodána velká kinetická energie, která se jejich dopadem změní na energii tepelnou. Aby se dosáhlo vysoké tepelné účinnosti proudu elektronů, formují se elektrony při urychlování ve vakuu do velmi úzkého svazku. Takto se získá velmi koncentrovaný zdroj tepla vhodný pro svařování.

Elektron je získán jednoduchým způsobem. Dodáním určité energie je vyvolána emise elektronů z povrchu materiálů. Nejčastěji se k získání volných elektronů používají termoelektrické katody (W, Mo, Ta, Te, Nb,  $\text{LaB}_6$ ). Pro velké výkony se nejvíce používá  $\text{LaB}_6$  (hexaborid lanthanu). Používají se tzv. „vodivostní“ elektrony. Energie potřebná k překonání potenciálové bariéry na povrchu kovu je dodána ohřevem katody na teplotu přesahující  $2500^\circ\text{C}$ .

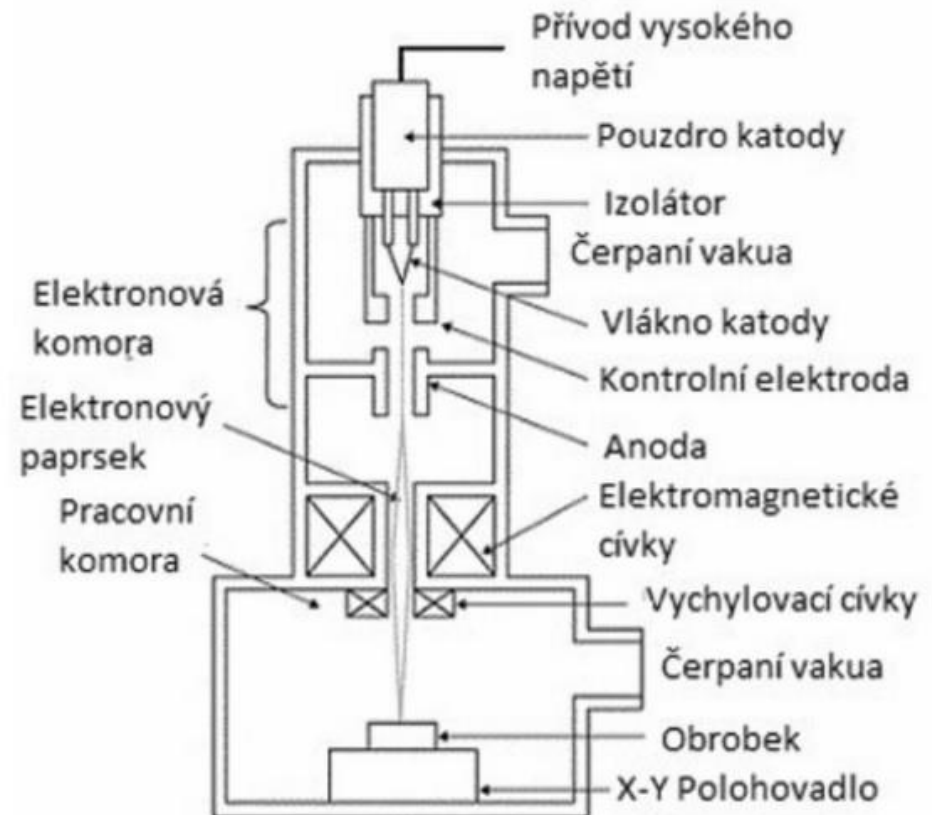


# Fyzikální podstata svařování EB

Ve vzduchu atmosférického tlaku je volná dráha elektronů velice krátká (stovky nanometrů). Zatímco v pracovní komoře postačuje tlak pod 0,1 Pa, v prostoru katody je nutné vyšší vakuum. Elektron představuje elektricky nabitou částici, mající záporný náboj  $e=1,602 \cdot 10^{-19}$  C, hmotnost  $m_e=9,109 \cdot 10^{-31}$  kg, poloměr  $r_e=2,82 \cdot 10^{-15}$  m.

$$E = e \cdot U \quad E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2 = e \cdot U \quad \rightarrow \text{změnou } U \text{ se změní energie elektronů}$$

Volné elektrony se mohou vlivem elektrického nebo magnetického pole přemísťovat a je možné jim udělit velké zrychlení (urychlovací napětí 30-150 kV). Podstata procesu svařování spočívá ve využití kinetické energie elektronů při bombardování povrchu svařovaného materiálu.



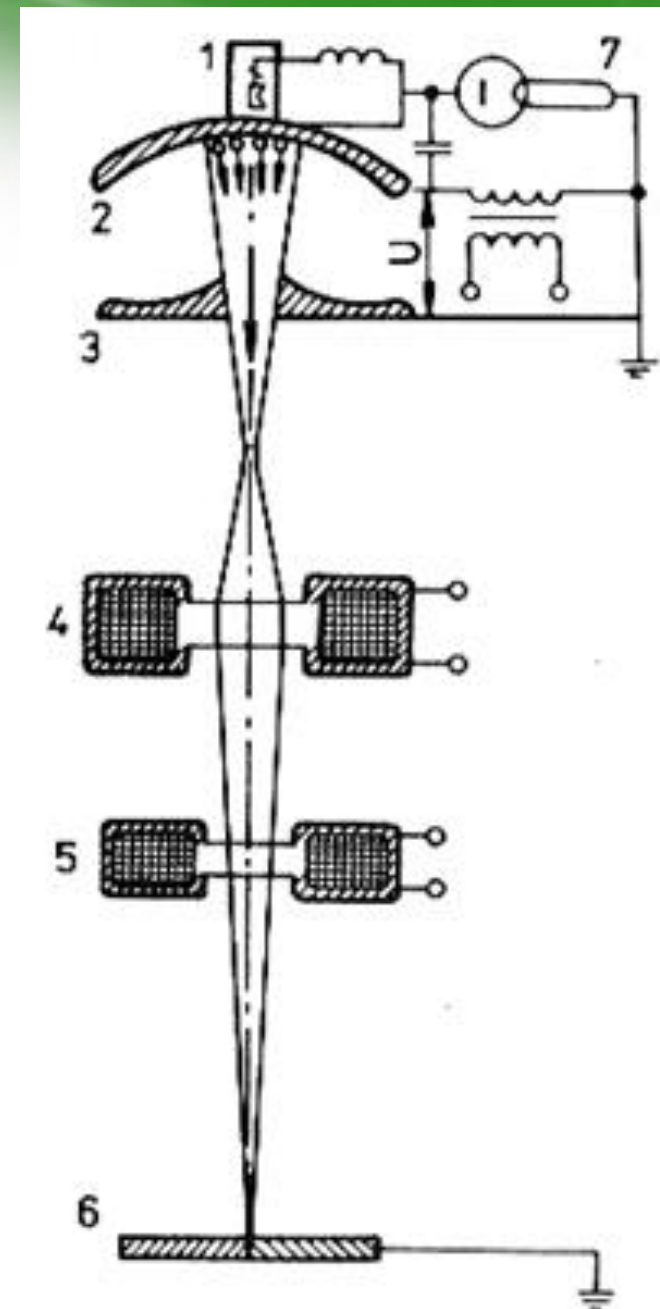
# Princip svařování EB

Elektronové dělo se skládá z katody 1, která je umístěna uvnitř Wehnelovy clony 2, která soustřeďuje svazek elektronů do otvoru anody. V určité vzdálenosti od katody je umístěná urychlující elektroda (anoda) 3 s otvorem. Elektronové dělo fokusuje elektrony do paprsku průměru rovnajícímu se průměru otvoru v anodě. Elektrony emitované katodou na cestě k anodě tak získávají značnou rychlost a energii.

Za anodou se elektrony pohybují již stejnou rychlostí. Mají stejný náboj, proto se odpuzují jeden od druhého. V důsledku toho se průměr paprsku zvětšuje a hustota energie v paprsku se zmenšuje.

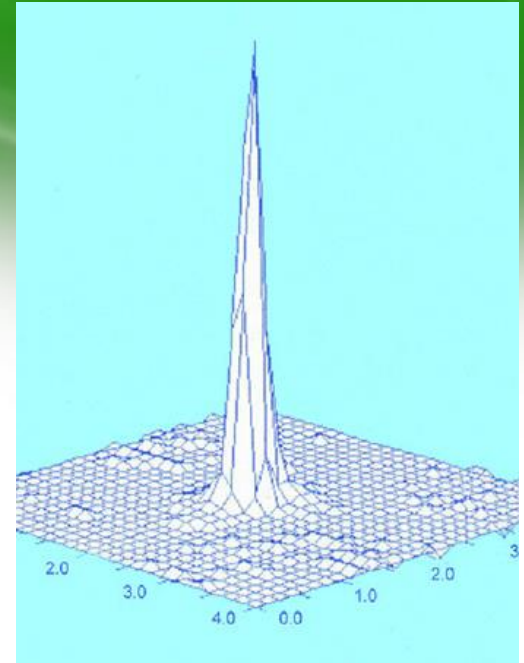
Proto jsou použity fokusační (magnetické) čočky 4 a případně také magnetický odkláněcí systém 5.

**Výkon elektronového paprsku** může dosahovat velmi vysoké hodnoty. Vzhledem k tomu je perspektivní i pro svařování materiálů tloušťky bez úpravy svarových ploch. Dá se získat elektronový paprsek s hustotou výkonu až  $5 \cdot 10^8 \text{ kW.cm}^{-1}$ .



# Princip svařování EB

Velkou výhodou svařování elektronovým paprskem při vysokých urychlovacích napětích je možnost získání **úzkého hlubokého průvaru**.

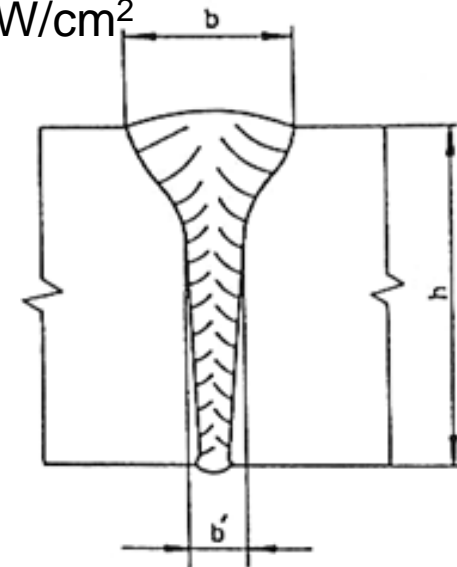


Přídavný materiál se při této technologii většinou nepoužívá, svar vznikne pouze vzájemným metalurgickým spojením obou svařovaných materiálů.

Používá se pro svařování Ti, Mg, Al (jsou reaktivní a oxidují) → tato metoda je ve vakuu



$$U_B = 60 \text{ kV}$$
$$I = 100 \text{ mA}$$
$$L = 2,2 \times 10^7$$
$$\text{W/cm}^2$$



# Svařitelnost kovů při svařování EB

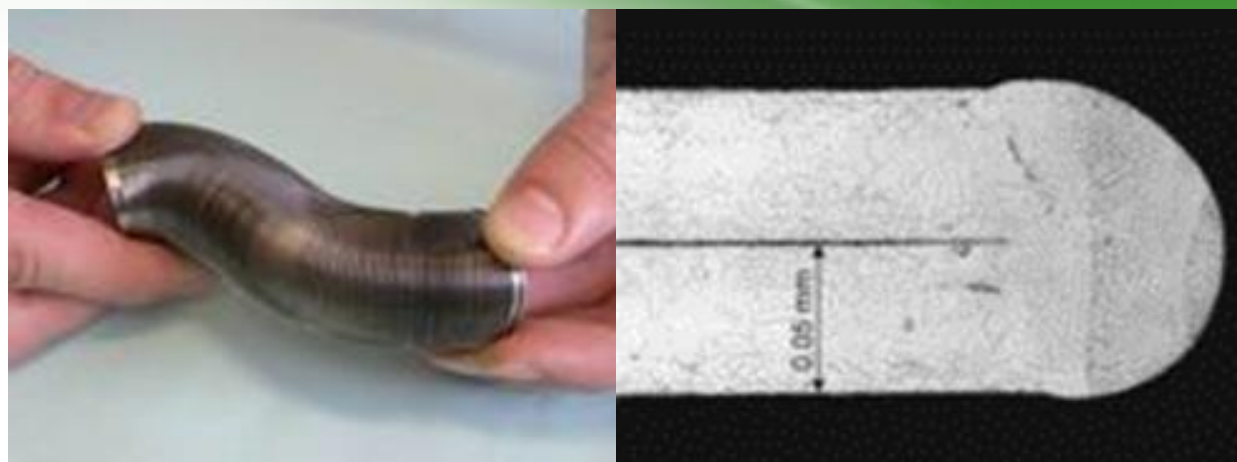
Svařování je nejrozšířenější ze všech oblastí použití elektronového svazku. Využití v mnoha významných průmyslových odvětvích, jako například v automobilovém, jaderném či leteckém průmyslu. Současně existují aplikace svarů se sub-milimetrovými až mikrometrovými rozměry.

- K dalším charakteristickým rysům elektronového svařování patří malá deformace součástí po vychladnutí a minimální převýšení svarového kovu.
- Pevnost svaru blízká pevnosti základního materiálu, velká přesnost a reprodukovatelnost, vysoká kvalita svarů, možnost spojování obtížně svařitelných kovů a heterogenních spojů.

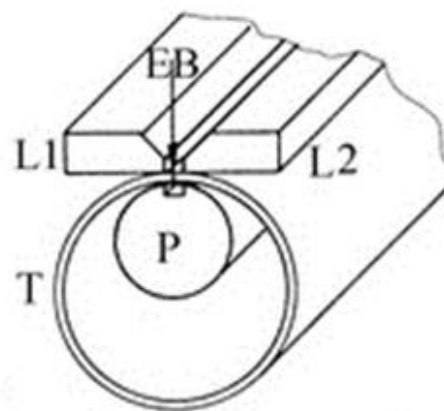
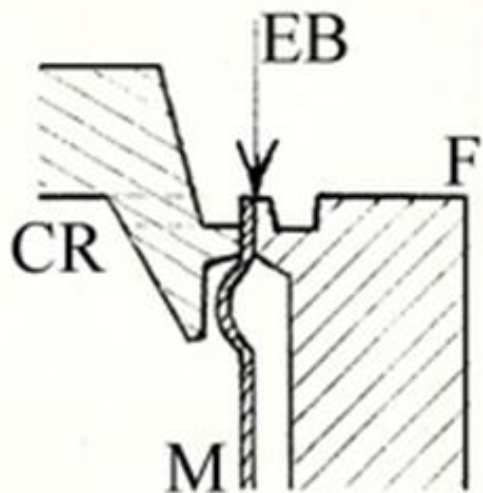


*Detail membránového vlnovce. Je svařen elektronovým svazkem z desítek nerezových mezikruží, každé o tloušťce jen 0,05 mm.*

# Svařování tenkých dílů pomocí EB



*Membránový vlnovec ze 400 membrán, metalografie svaru dvou membrán tlustých 0,05 mm.*



*Detail spoje membrány a příruby vlnovce*

*Experiment se spojováním tenkostěnných trubek: průměr 125, stěna 0,25 mm*

# Výhody a nevýhody svařování EB

## Výhody svařování svazkem elektronů:

- Velmi pěkný vzhled svaru.
- Úzká natavená a tepelně ovlivněná oblast svaru.
- Malé deformace.
- Velmi vysoká kvalita svarů, opakovatelnost.
- Dokonalá ochrana svaru před vzdušnou atmosférou a dobré rafinační účinky vakua.
- Možnost svařovat i větší tloušťky na jeden průchod elektronového paprsku, většinou bez potřeby přídavného materiálu.
- Možnost vysokého stupně automatizace svařovacího procesu.
- Možnost použití pro rozsáhlý sortiment materiálů.

## Nevýhody svařování svazkem elektronů:

- Na svařování se využije pouze malé procento celkového času.
- **Nároky na čistotu svařovaných materiálů.**
- **Potřeba vakua.**
- Nepříznivý charakter primární krystalizace svarového kovu.
- Nároky na přesnost a čistotu svarových ploch.
- Nároky na přesnost vedení paprsku.
- Poměrně vysoké investiční náklady na svařovací zařízení.