

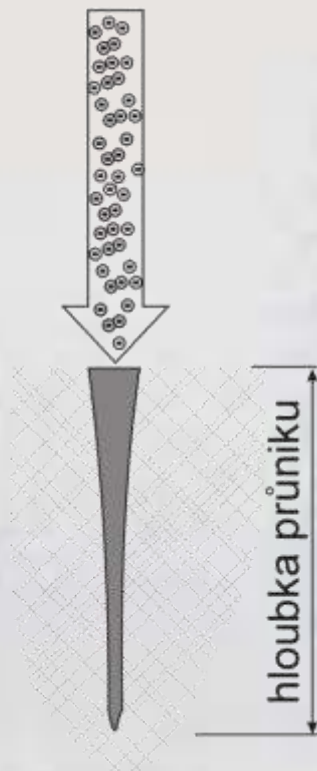
# Svařování svazkem elektronů

RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

1. Princip
2. Interakce elektronů s materiálem
3. Konstrukce elektronové svářečky
4. Svařitelnost materiálů, svařovací parametry
5. Příklady
6. Vrtání svazkem elektronů

# Princip

proud elektronů



- Proud urychlených a zaostřených elektronů dopadá na materiál
- Při dopadu díky vysoké kinetické energii elektron proniká hluboko do materiálu
- Brzděním elektronu při srážkách s částicemi materiálu se maří pohybová energie elektronu a vzniká teplo
- Hustota energie elektronového svazku je až  $10^5 - 10^9 \text{ Wcm}^{-2}$
- Kvůli volnému pohybu elektronů je nutné svařování provádět ve vakuu řádově  $10^{-4} \text{ Pa}$

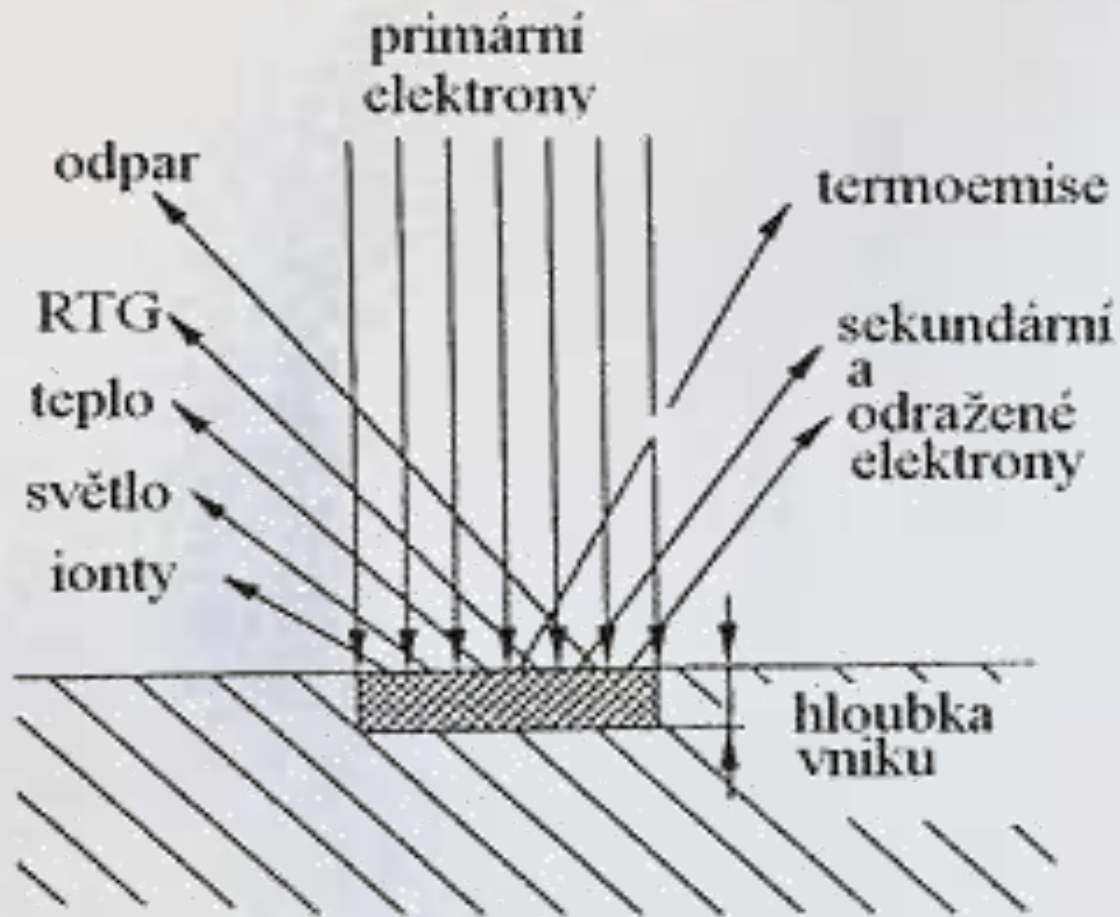
# Průnik elektronů do materiálu

- Část elektronů předá svoji kinetickou energii krystalové mřížce (většinou v několika nepružných odrazech). Pro svařování je důležité, aby toto proběhlo u co největšího počtu elektronů.
- Hloubka vniku elektronů do materiálu je dána vztahem:

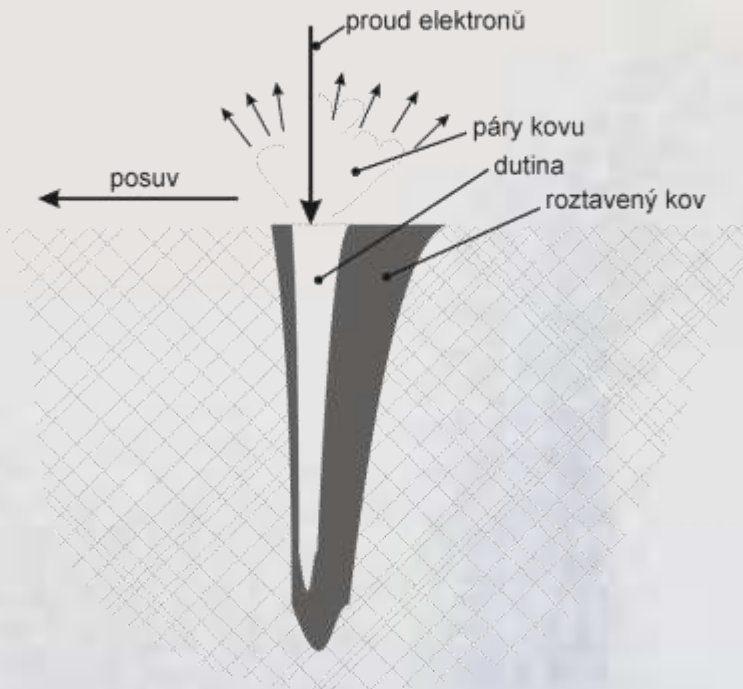
$$h = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\rho} U^2 \text{ [mm]}$$

- Část primárních elektronů se od povrchu “pružně” (zcela bez nebo jen s částečnou ztrátou energie) odrazí.
- Některé vodivostní elektrony jsou primárními elektrony vyraženy do prostoru nad povrchem (jako tzv. sekundární elektrony).
- Jako při každé změně rychlosti elektronů vzniká i zde spojité (tzv. „brzdné“ ) rentgenové záření., kromě tzv. „charakteristického záření“ na určitých vlnových délkách charakteristických pro různé materiály.
- Část energie dodaná primárními elektrony se také spotřebuje na vyzáření světlo a teplo, ionizaci.
- Tyto jevy lze považovat za ztráty. Pohybují se v intervalu 10 – 40% energie svazku

# Průnik elektronů do materiálu

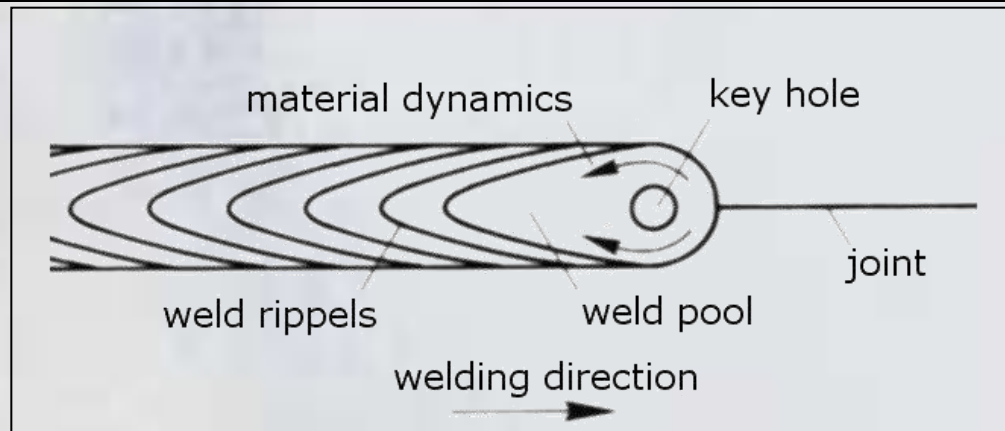
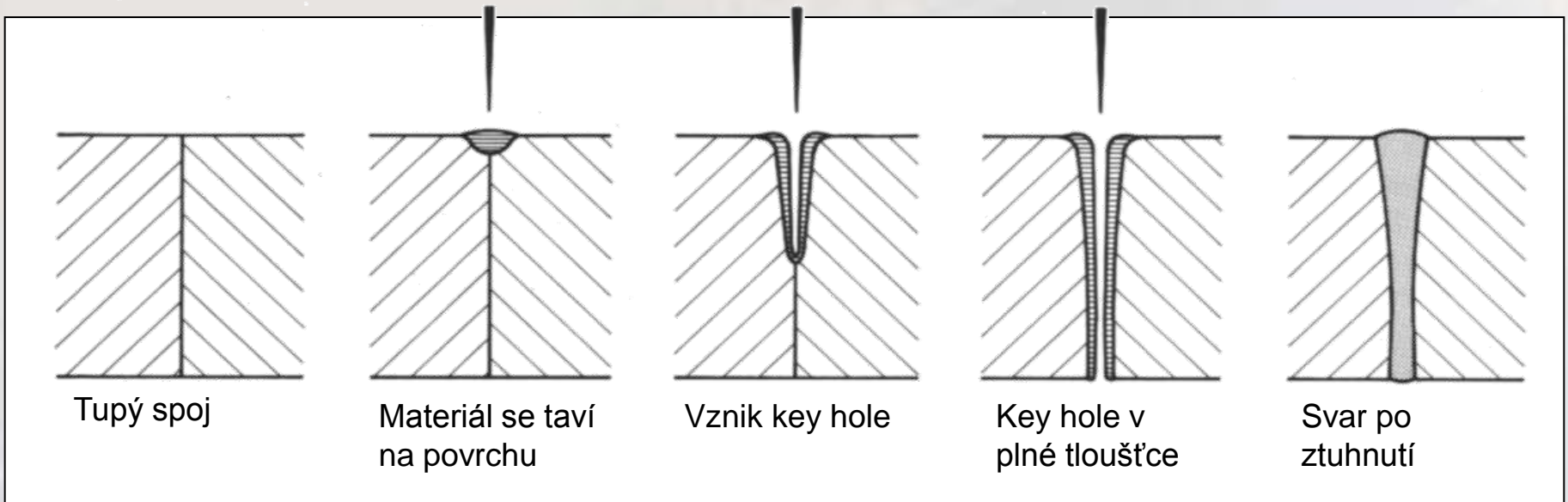


# Proces

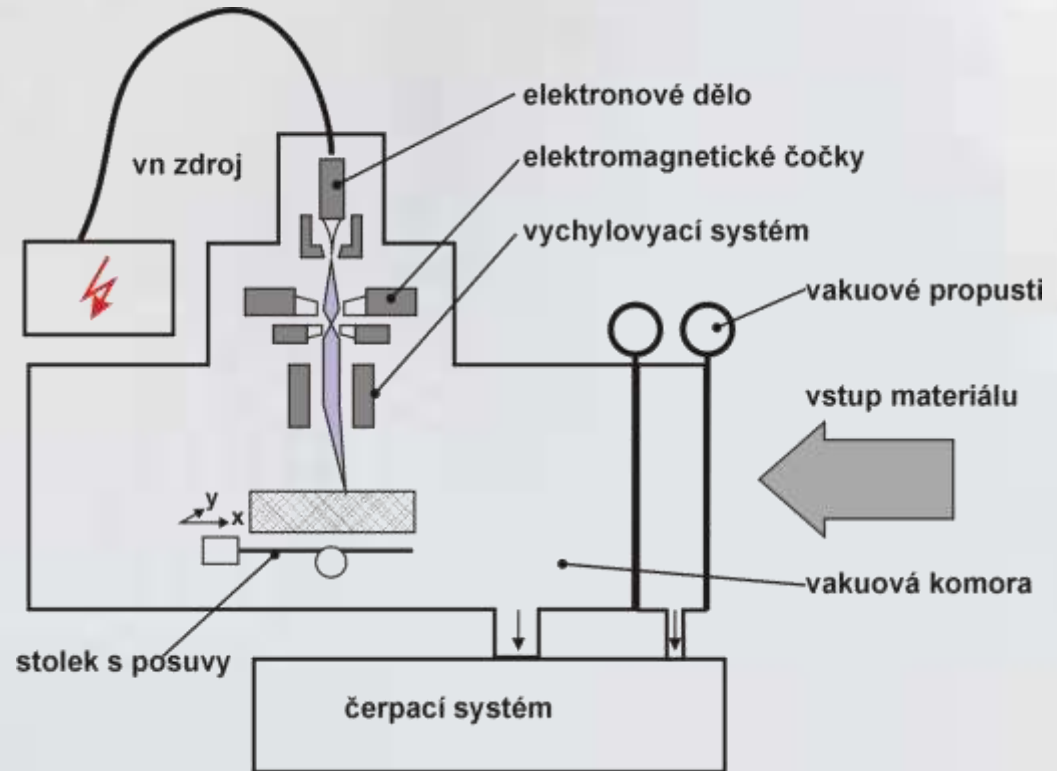
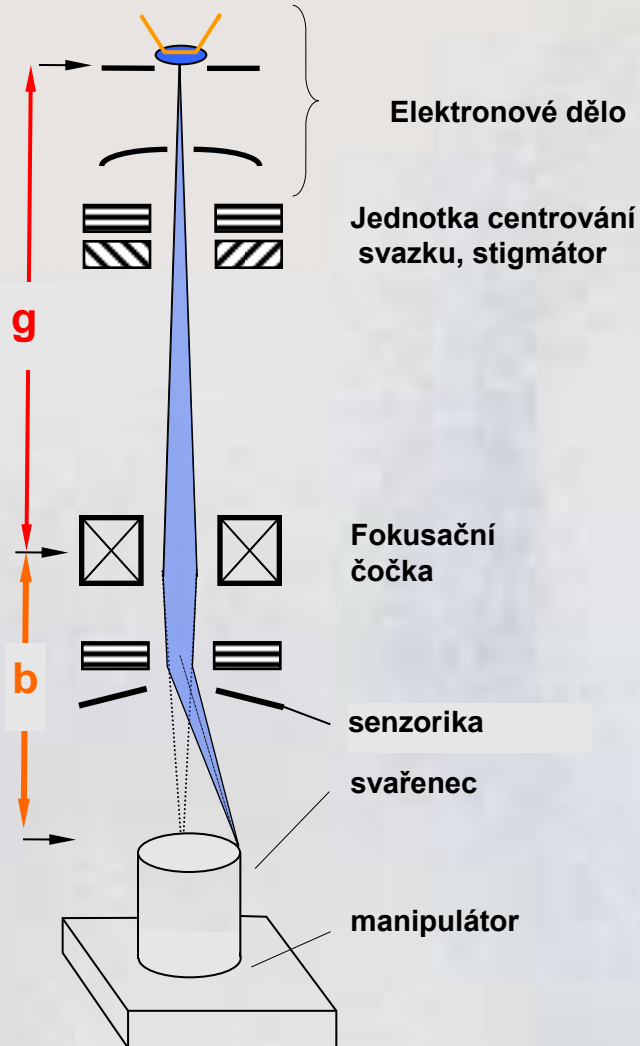


- Po dopadu elektronů se materiál taví a sublimuje
- Vzniká válcová dutina obklopená roztaveným materiálem
- Díky vakuu páry kovu rychle expandují do vakua – dutina se velmi rychle prohlubuje
- Hloubka dutiny závisí na kinetické pohybové rychlosti elektronů, rychlosti posuvu a materiálových vlastnostech

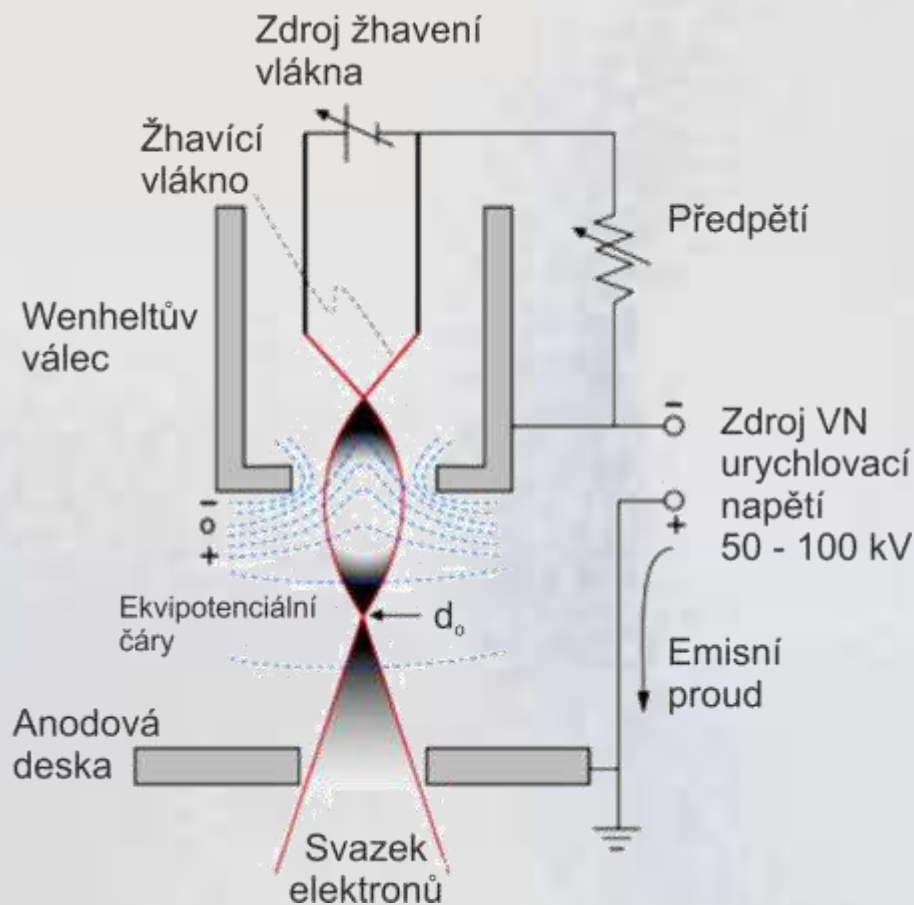
# Fáze vzniku Key hole



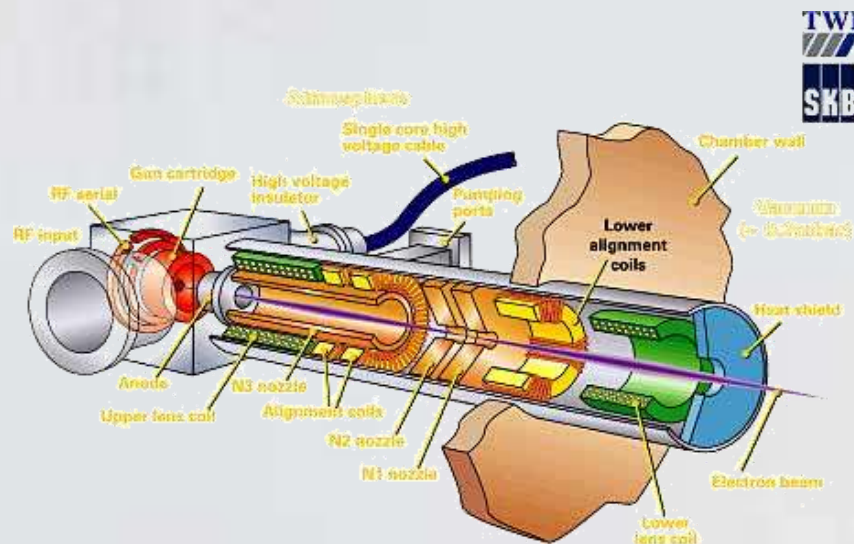
# Schéma zařízení



# Elektronové dělo



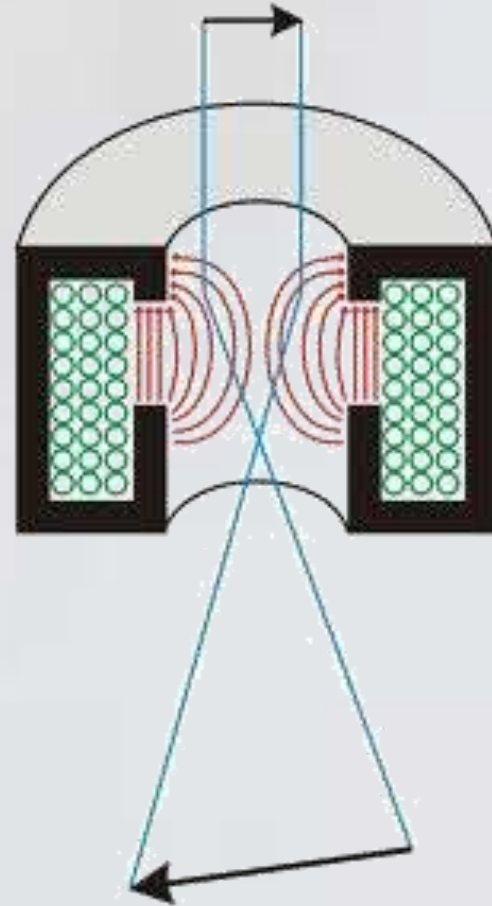
**Žhavená katoda - vlákno.**  
 Vyrobená z W drátu. Nižší životnost, velké ztráty. Pro velké výkony se používá pásek z wolframu





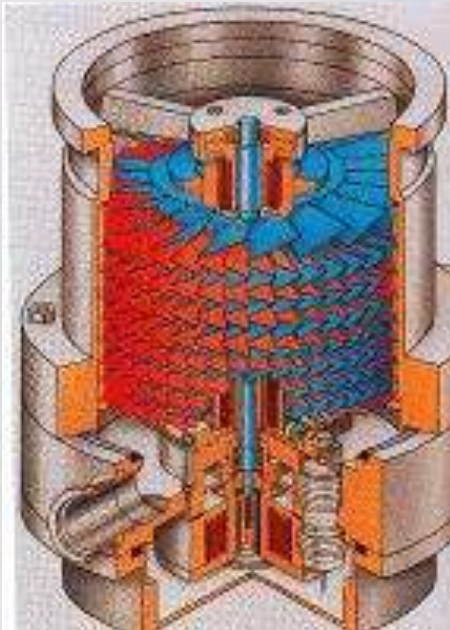
# Zaostřovací systém

- Používá se elektromagnetická čočka.
- Je tvořena cívkou s pólovými nástavci
- Tvar nástavců určuje „optické“ vlastnosti čočky.
- Z optického hlediska jen optická spojka



# Čerpací systém

- Předvakuum je vytvářeno pomocí rotačních olejových vývěv
- Hlavní čerpání je pomocí turbomolekulárních vývěv.



# Rychlost ohřevu pro různé materiály

Doby potřebné pro dílčí etapy procesu odpařování materiálu elektronovým svazkem při urychlovacím napětí 50 kV a plošné hustotě výkonu  $10^4$  W/mm<sup>2</sup>. Doba ohřevu (mikrosekund) potřebná k zahřátí povrchu:

	Al	Ag	Cu	Fe	Mg	Mo	Ni	Ti	W	Zr
k bodu tání	3,026	1,162	2,120	3,499	3,368	3,406	3,310	4,477	2,313	2,596
k bodu varu	13,66	3,184	6,165	7,603	7,743	7,827	8,261	10,60	4,751	6,898
k odpaření	70,75	15,38	30,97	40,47	35,26	40,55	41,38	56,74	28,28	12,89

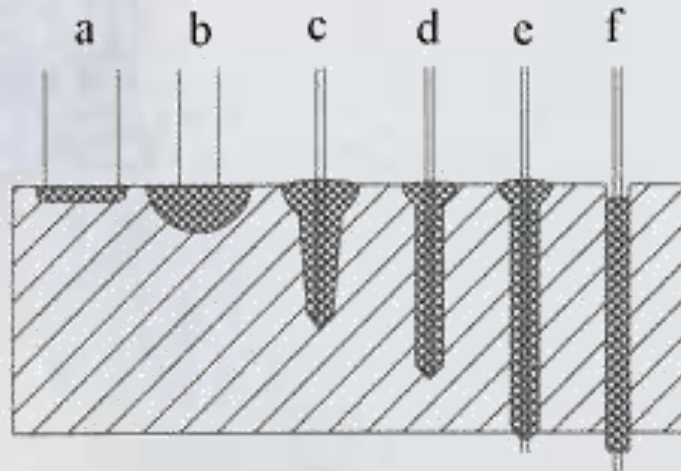
# Rychlost vniku elektronového svazku do materiálu

Při vysoké hodnotě plošné hustoty výkonu se materiál v zasažené tenké vrstvě za dobu velmi krátkou (desítky mikrosekund) přemění na páru. Jakmile k tomu dojde, změní se podmínky pro výměnu energie primárních elektronů s částicemi zasažené látky tak, že svazek předává v oblasti vyplněné párou podstatně méně energie (na jednotku objemu) která se spotřebuje na zvyšování teploty páry nad bod varu a ionizaci molekul. Při zanedbání tohoto procesu lze vypočítat rychlost vniku svazku do materiálu v  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Urychlovací napětí je 50 kV.

	Al	Ag	Cu	Fe	Mg	Mo	Ni	Ti	W	Zr
Mezní rychlost	274,8	324,9	189,1	165,0	855,5	126,9	142,5	205,6	96,16	800,4

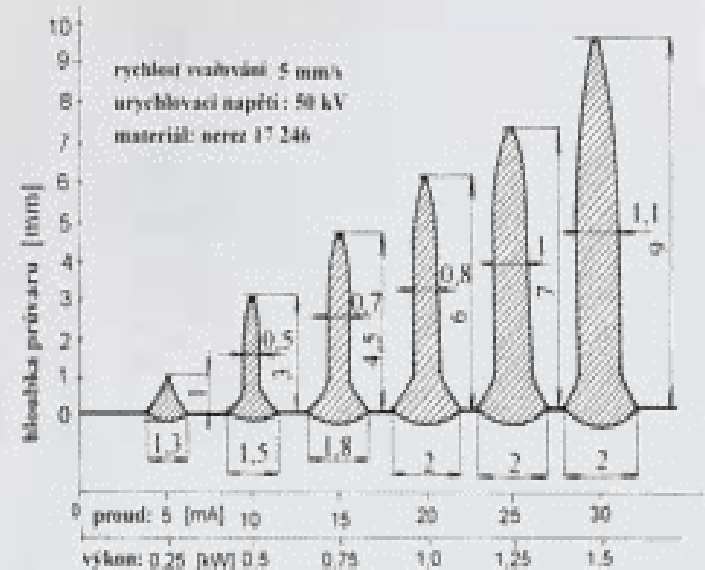
# Výsledky působení elektronového svazku na materiál

Podle daných podmínek a volby parametrů můžeme měnit výsledný účinek svazku, tj. tvar a rozměry oblasti působení svazku ovlivněné, v širokých mezích. Ovlivněná změnou struktury je především ta část, která prošla změnou skupenství. Její nejbližší okolí mohlo být přitom ovlivněno tepelně v důsledku zahřátí vedením tepla od roztavené oblasti. Ta může mít různý tvar a rozměry, v závislosti na celkovém výkonu svazku, jeho plošném rozložení, době působení a vlastnostech materiálu.



# Svařovací parametry

- **Urychlovací napětí.**  
Volíme blízké maximum zařízení ale svařovací proces tímto neřídíme. Udává se v kV.
- **Proud svazku.** Základní svařovací parametr. Příliš velký proud způsobuje rozprašování taveniny. Vhodná sensorika to dokáže řídit.

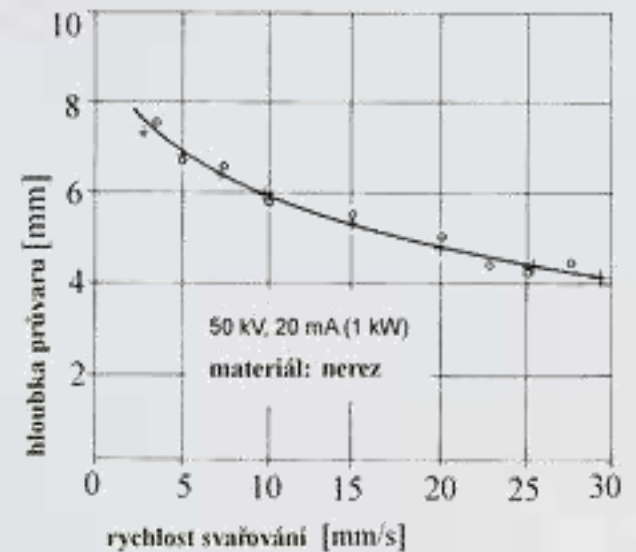


$$\text{Svařovací výkon} = U_a \times I_b$$

Příklad:  $50000 \times 0,04 = 2000 \text{ W} = 2 \text{ kW}$

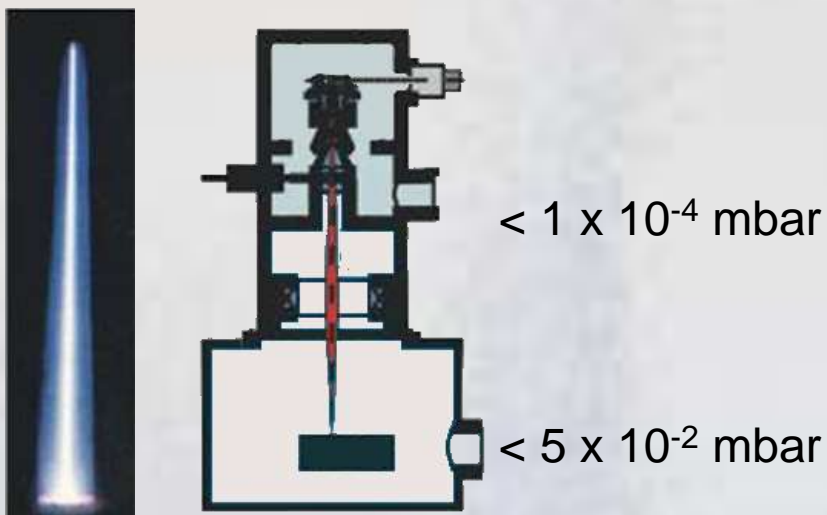
# Svařovací parametry

- **Zaostření.** Při tloušťkách do 10 mm se zaostřuje na povrch materiálu. Jinak cca do 1/3 tloušťky
- **Rychlost posuvu.** Vyšší rychlosti posuvu mohou vést ke svarovým vadám a zhrubnutí svarové housenky



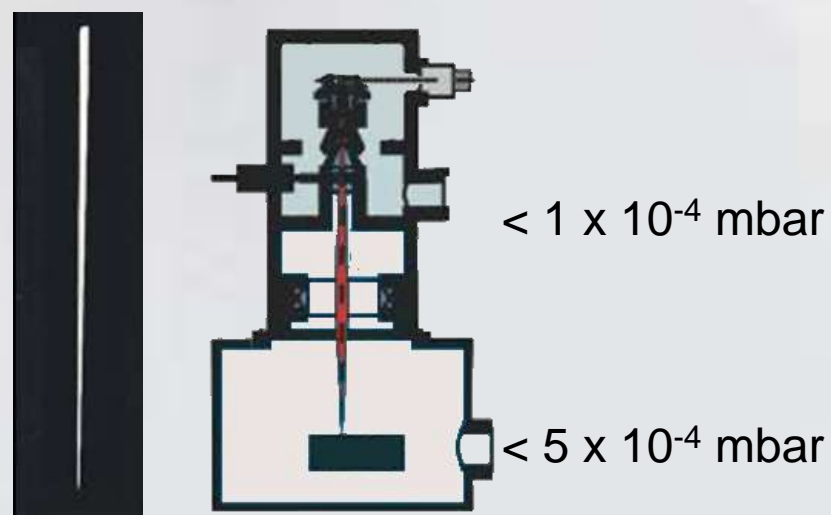
# Vliv vakua na vlastnost svazku

Zařízení se středním vakuem



Lze použít pro Cu, Al, ocel

Zařízení s vysokým vakuem



Využití pro reaktivní materiály Ti, Zr, Nb



# Svařitelnost

Hliník a slitiny	Svařitelný až na výjimky
Beryllium	Lze svařit, ale vznikají toxické produkty
Beryliová měď	Dobře svařitelná, nutná deoxidace
Litina	Nesvařitelné všechny typy
Měď	Lze svařit, může být problém s pórovitostí svaru
Zlato	Svařitelné
Hastelloy	Svařitelný
Inconel	Dobře svařitelný
Kovar	Dobře svařitelný nepokovený. Při pokovení Au nebo Ni způsobuje svarové vady
Slitiny hořčíku	Svařitelné při použití speciálních technik
Molybden	Velmi dobře svařitelný
Monel	Svařitelný, kujný svar
Nikl	Svařitelný, kujný svar
Slitiny niklu	Perfektně svařitelné
Platina	Svařitelná
Stříbro	Svařitelné
Nerezové oceli	Dobře svařitelné kromě ocelí s vyšším obsahem C
Nízkouhlíkaté oceli	Do 0,2% C svařitelné
Středně uhlíkaté oceli	V intervalu 0,2 – 0,5% C svařitelné ale s předehřevem a dohřevem
Vysoce uhlíkové	Nad 0,5% C nesvařitelné.
Tantal	Svařitelný, kujný svar
Titan	Svařitelný, kujný svar
Wolfram	Svařitelný, ale možný křehký svar
Slitiny zinku	Nesvařitelné
Zirkon	Svařitelný, kujný svar.



# Legislativa

- ČSN EN 1011-7 Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 7: Elektronové svařování

# Výhody

- Poskytuje svary s vysokou štíhlostí až 1:50
- Velmi malá tepelně ovlivněná oblast (tedy i malá smršťitelnost a deformace)
- Vakuum zabraňuje kontaminaci svaru nežádoucími plyny
- Svařovací rychlosti až 10x vyšší v porovnání s metodou TIG
- Možnost svaru průvarem – přeplátováním
- Lze svařovat i kovy běžně nesvařitelné
- Velmi snadné změny svazku elektronů – snadná regulace hloubky svaru
- Svařování bez přídavného materiálu

# Nevýhody

- Svařování ve vakuu – prodlevy kvůli čerpání a zavzdušnění komory
- Problematické svařování velkých svařenců – omezení velikostí komory a vstupní propusti
- Při urychlovacích napětích nad 15 kV vzniká RTG záření – nutnost ochrany obsluhy
- Složitější manipulace s obrobkem ve vakuu
- Problematické svařování vysoceuhlíkatých materiálů

# Srovnání

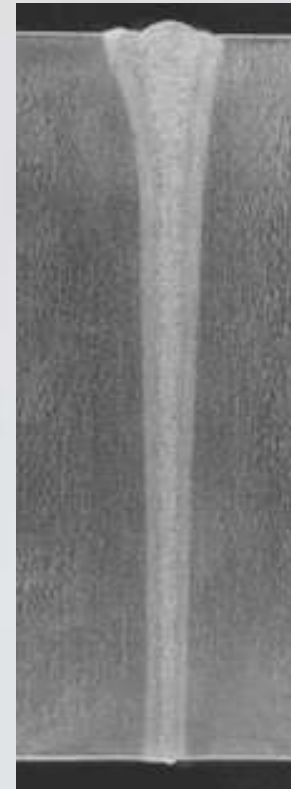
	EB	MAG
Počet svarů:	1	157
Svařovací čas na metr [min]:	8.3	314
Přídavný materiál na metr[kg]:	0	32

## Závěr:

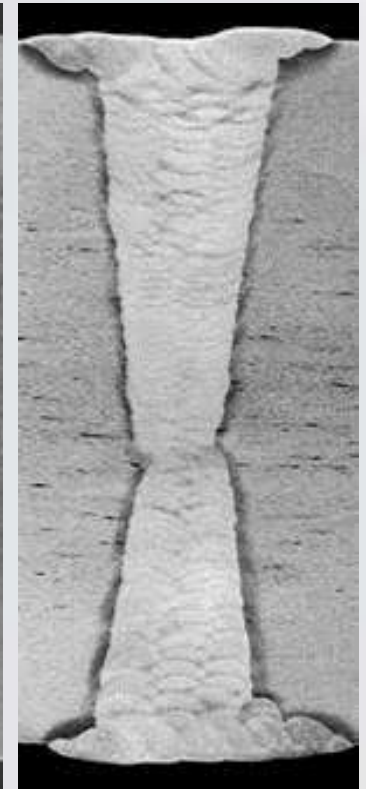
- Kratší svařovací čas, úspora materiálu...
- Štíhlejší svar...

**Jednoznačně větší efektivita pro svařování EB!**

150 mm silný svar



EB svar  
1 průchod

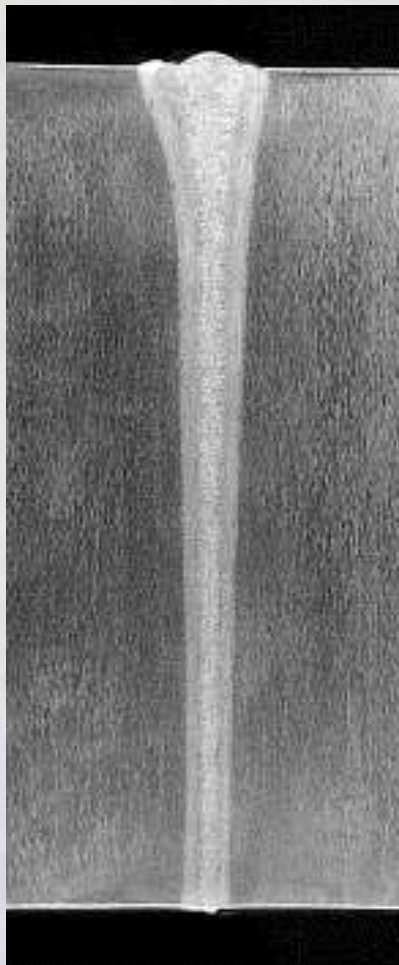


MAG svar  
157 průchodů

# Příklady



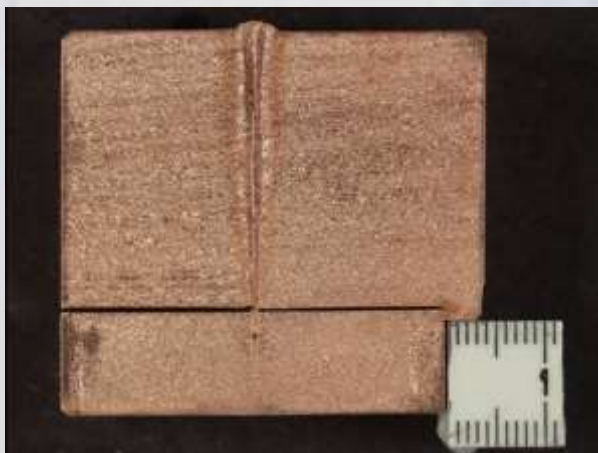
Bronz/ocel 30 mm



Svar 150 mm



Hliník 40 mm



měď 60 mm



Nerez ocel 2 mm

# Příklady



Vakuová příruba



Část převodovky



Ultravakuový díl



Vlnovec pro vakuum



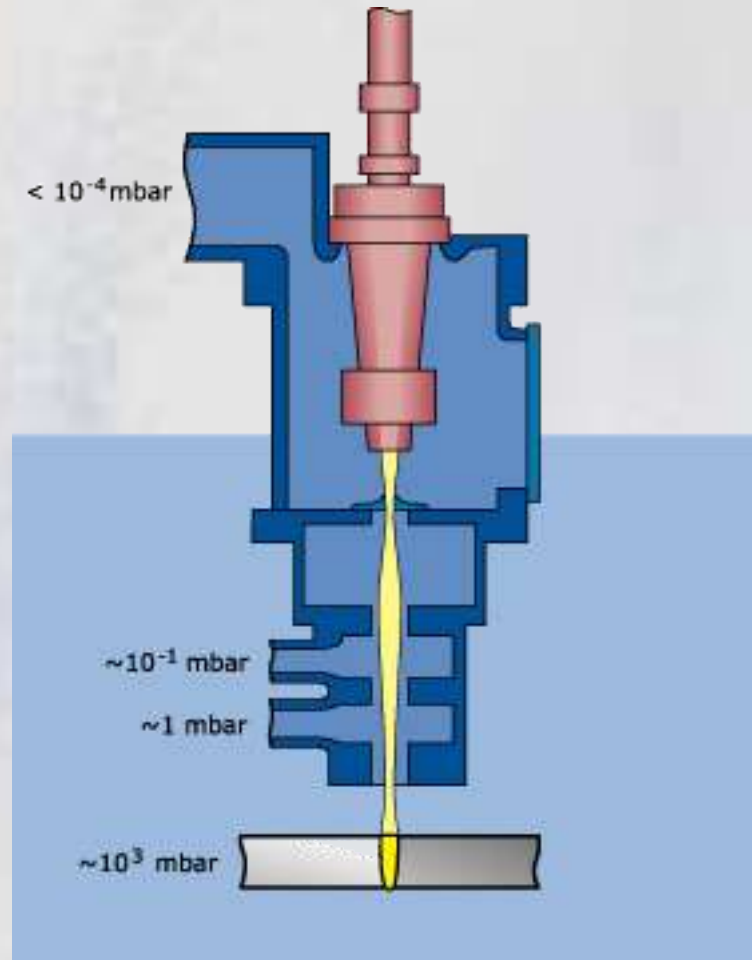
# Zařízení pro svařování EB



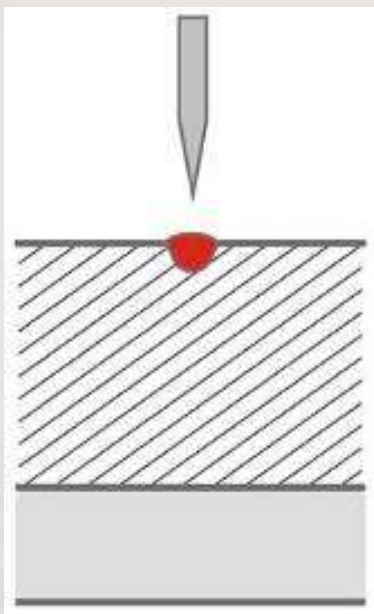
# Zařízení pro svařování EB



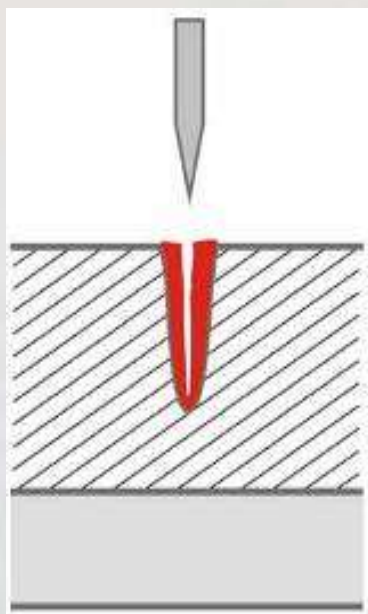
# Svařování s vyvedením svazku elektronů do vzduchu



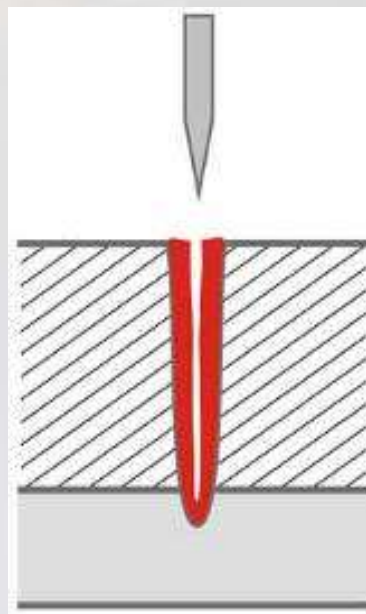
# Děrování svazkem elektronů



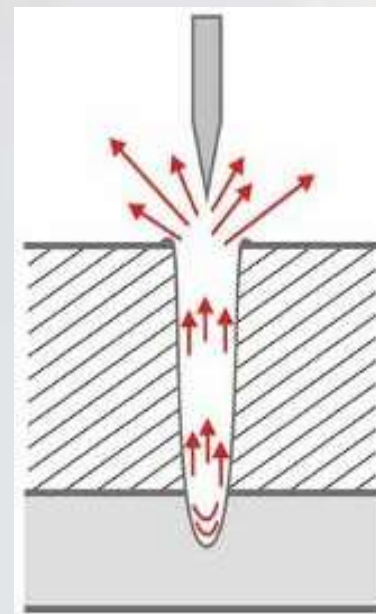
Penetrační hloubka závisí na energii elektronů (urychlovacím napětí a proudu)



Vytváří se key hole obklopená stěnou tekutého kovu



Po plné penetraci dochází k odpaření plastového materiálu. Rychle se rozpínající páry „vypláchnou“ taveninu z otvoru.



# Děrování svazkem elektronů

## Využití:

- Ekonomická technika pro vytváření velkého množství děr v kovových materiálech
- Vysoká produktivita – až 3000 otvorů za sec.
- Možnost vytvářet různé tvary otvorů od válcových po kónické a pod úhlem k povrchu, štíhlost až 1:20
- Průměr otvorů v rozsahu 0,08 – 2,0 mm
- Tloušťka materiálu do 10 mm



Spalovací komora

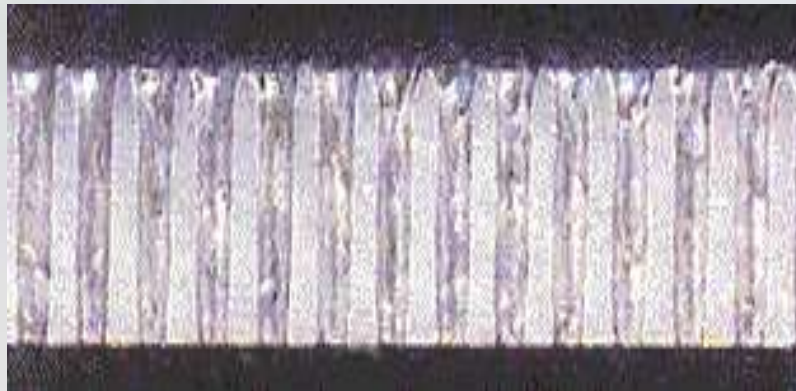


chladící otvor

# Další příklady děrování



Odstředivka pro výrobu skelného vlákna



Filtr pro papírenský průmysl

# Povrchové kalení svazkem elektronů

- Oceli s obsahem uhlíku  $> 0.18\%$
- Výhody vakua: žádné změny barvy, vodíkové křehnutí, redukce pórovitosti, odpaření nečistot
- Přesné a dynamické tvarování svazku umožňuje přizpůsobit se požadovaným zónám kalení na dílci.
- Zakalené plochy jsou dobře definovatelné – vždy jen tak, kde to potřebné
- Hloubka prokalení se pohybuje v rozmezí 0,1 – 1,7 mm

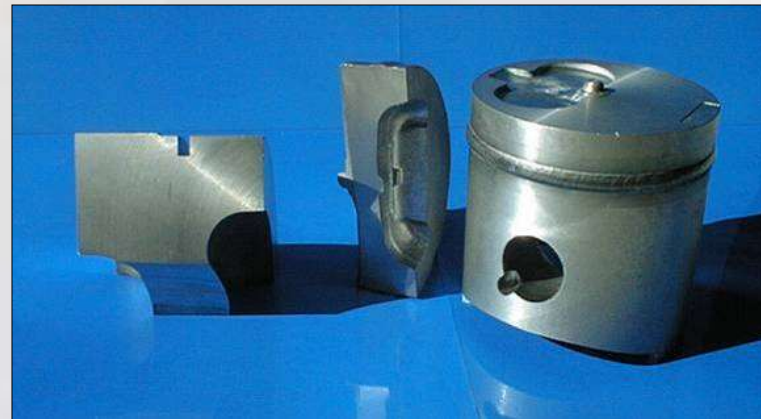
# Příklady kalení svazkem elektronů



materiál: 12 070  
Hloubka prokalení: 1,0 + 0,3 mm  
tvrdost: 58 HRC



materiál: GLS 250  
hloubka prokalení: 1,0 mm  
tvrdost: 60 HRC



materiál: AlMg  
hloubka prokalení: 1,0 + 0,3 mm  
tvrdost: 58 HRC



materiál: 19 522  
hloubka prokalení: 0,6 + 0,3mm  
tvrdost: 59 + 2 HRC