



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



OBRÁBĚNÍ PLAZMOU

Ing. Jan Raška

PWR Composite s.r.o.

Materiál vznikl za podpory projektu Technika pro budoucnost
CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002338

Ostrava, 2019

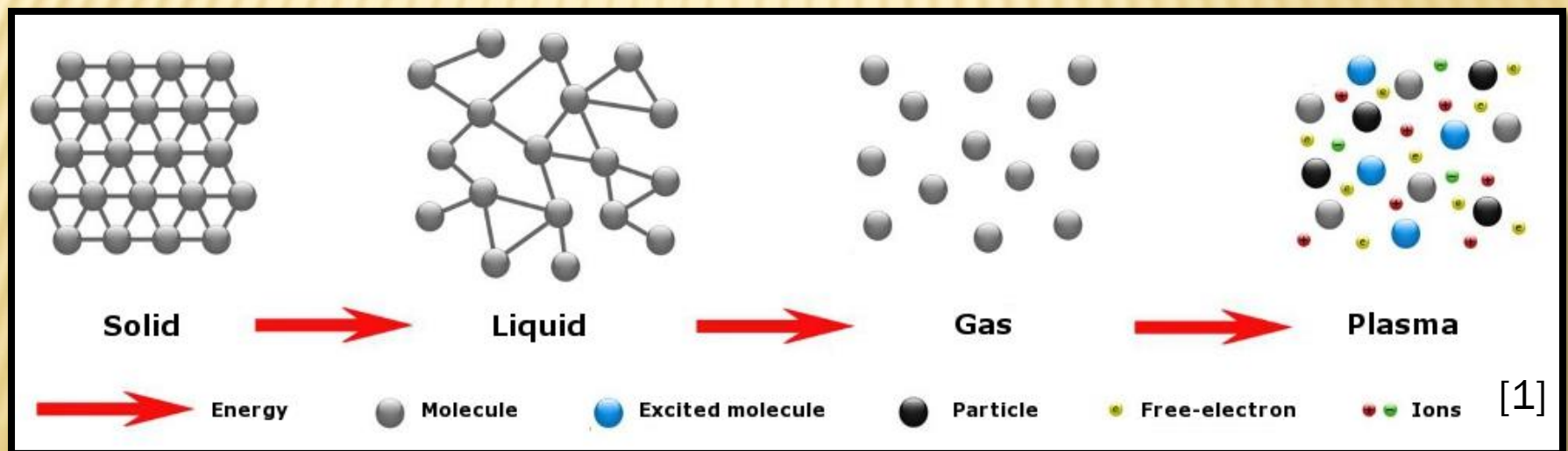
OBSAH

- ✗ Co je to plazma, jaké má vlastnosti
- ✗ Plazmový paprsek a jeho využití
- ✗ Obecný popis řezání
- ✗ Veličiny související s plazmovým řezáním
- ✗ Výhody
- ✗ Nevýhody



PLAZMA JAKO POJEM

- Ionizovaný plyn, složený z iontů, elektronů vybuzených a neutrálních atomů a molekul
- Plazma je tepelné, vysoce žhavé, elektricky vodivé prostředí
- Pro generování se používají zejména tyto plyny: Argon, Vodík, Kyslík, Dusík, Vzduch, Vodní pára



PLAZMA KOLEM NÁS

- ✖ Je to nejrozšířenější forma látky, tvoří až 99,9% pozorované atomární formy vesmíru [2].
- ✖ Pozorujeme ji v těchto jevech – blesk, polární záře, výboj v zářivkách, v elektrickém oblouku [2].
- ✖ Je součástí konvenčních hvězd, mlhovin, ionosféry, slunečního větru, atd.
- ✖ Generujeme ji ve speciálních zařízeních zvaných plazmové (plazmatické) hořáky.



ROZDĚLENÍ PLAZMY

✗ Podle ionizace [2]:

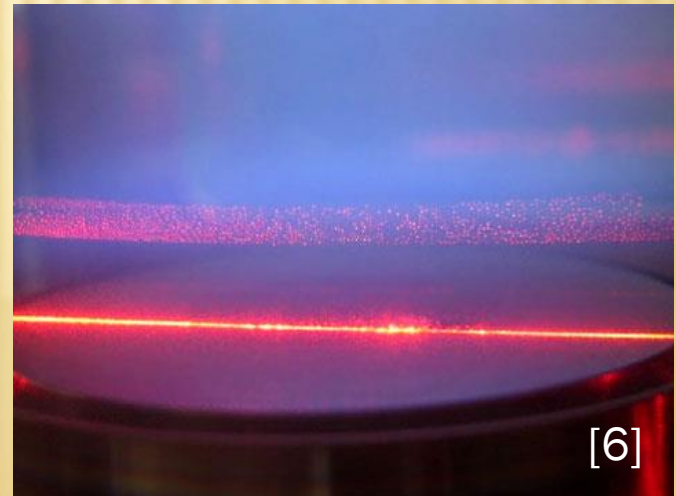
Slabě ionizovaná plazma – malá koncentrace

Silně ionizovaná plazma – velká koncentrace

✗ Podle energie [2]:

Nízkoteplotní plazma - do 100 eV

Vysokoteplotní plazma – více než 100 eV



PLAZMOVÝ PAPRSEK A JEHO VYUŽITÍ

- ✖ Zařízení pro nekonvenční způsob zpracování materiálů je založeno na principu úběru materiálu paprskem koncentrované energie [7].
- ✖ Lze řezat všechny druhy vodivých materiálů.
- ✖ Pro řezání nevodivých materiálů musí být použit hořák generující vytékající plazma [8].
- ✖ Kvalitní řezy lze zaručit pro tloušťky materiálu v rozsahu: 1 mm – 45 mm

TYPY PLAZMOVÝCH HOŘÁKŮ

× S transferovým obloukem [7]:

- + Elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a obráběným materiálem. Tento hořák se používá pro opracování elektricky vodivých materiálů.

× S netransferovým obloukem [7]:

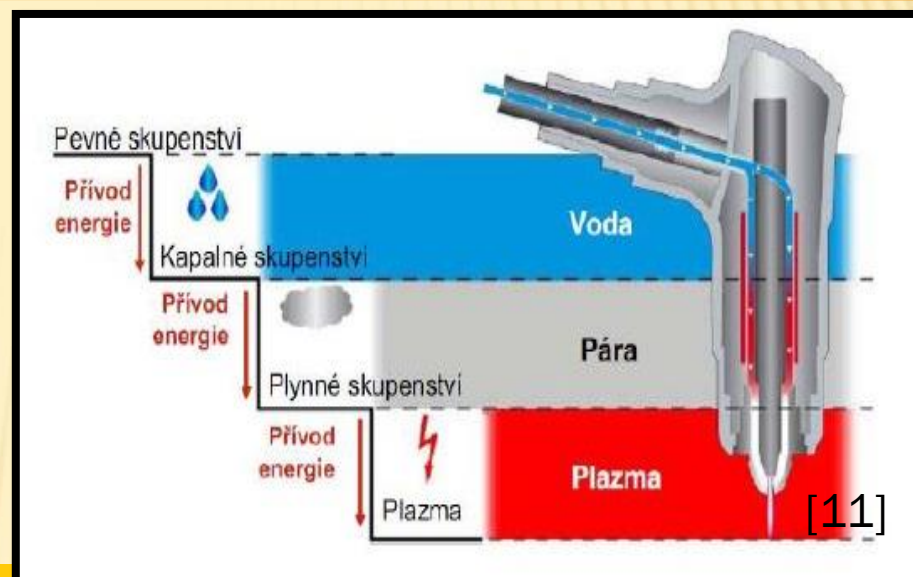
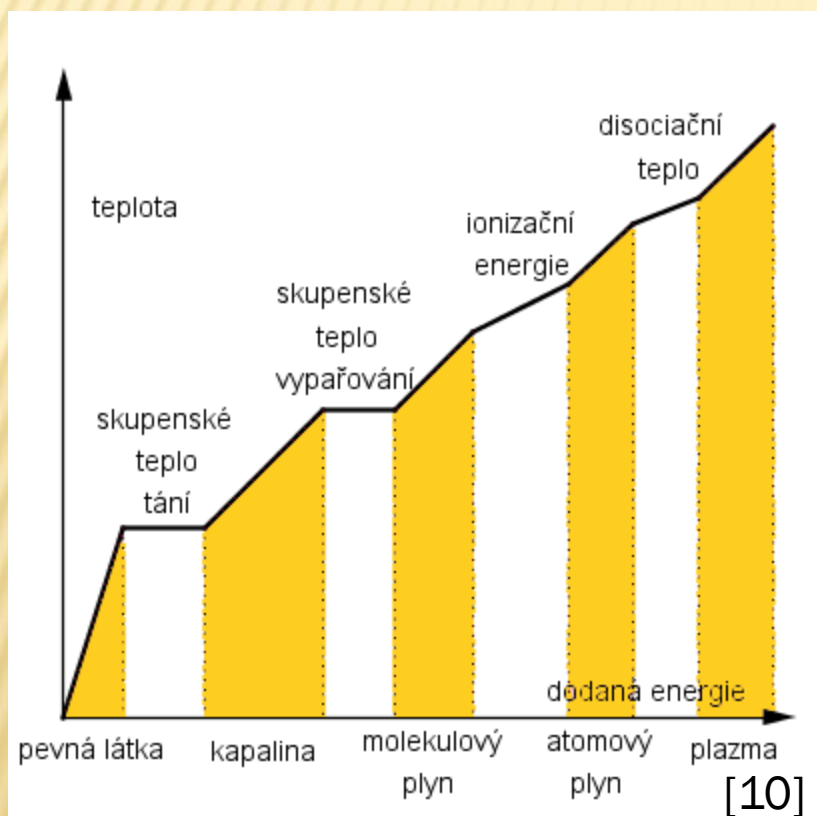
- + Elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a výstupní tryskou, která tvoří anodu. Mezi ně je vháněn plyn, který je ionizován. Tento typ hořáku se používá pro opracování elektricky nevodivých materiálů (keramika, horniny) a k nanášení povlaků.

OBECNÝ POPIS ŘEZÁNÍ PLAZMOU

- ✖ Vysokorychlostní a vysokoteplotní plyn proudí kolem netavící se wolframové elektrody (katoda), která s anodou (materiál) vytváří elektrický oblouk. Oblouk ionizuje plyn, který se tímto zahřívá a přechází v plazmu. Zkoncentrováním proudu plazmy se dosahuje vysoké hustoty energie a vysokých teplot ($16 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^3 \text{ K}$) [7].
- ✖ Zdroj stejnosměrného proudu elektrického proudu má výkon $0,5 - 250 \text{ kW}$.

- ✗ Plyn je ionizován pouze částečně.
- ✗ Úplná ionizace nastává až při teplotách nad 10^5 K, proto zbylý neionizovaný plyn vytváří chladnější vrstvu, která stabilizuje paprsek.
- ✗ Interakcí plazmového proudu s řezaným materiálem dochází k jeho natavení a následnému procesu tepelného dělení.
- ✗ Výstupní rychlost plazmy může dosáhnout hodnot 1500 až 2300 m.s⁻¹ [9].

✗ Pomocné diagramy, grafy a tabulky



Plyn	Teplota varu (°C)	Rel. hustota (vzduch = 1)	Ionizační energie (eV)
Vodík	-252,9	0,06	13,59
Argon	-185,9	1,38	15,76
Helium	-268,9	0,14	24,56
Dusík	-195,8	0,91	14,55

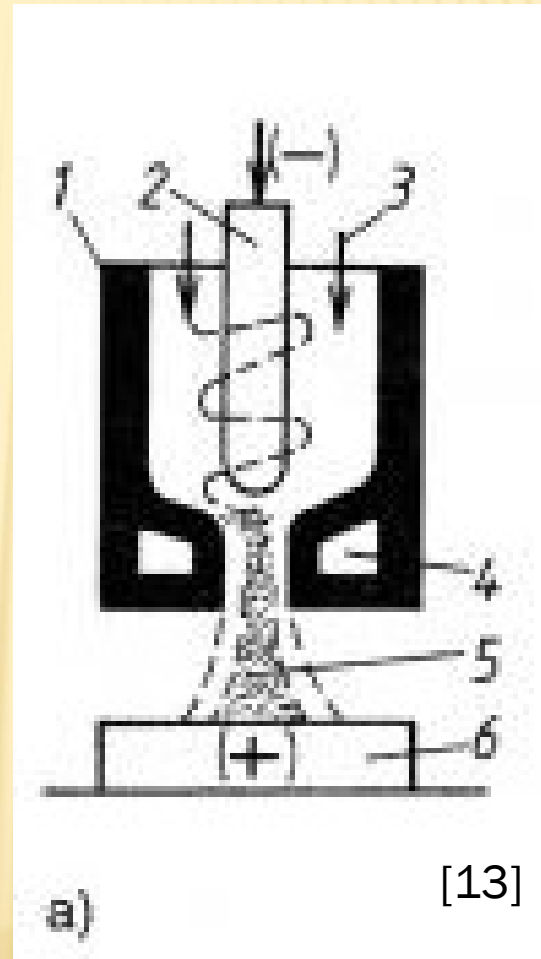
[12]

PŘÍKLADY APLIKACE PLYNŮ PRO ŘEZÁNÍ

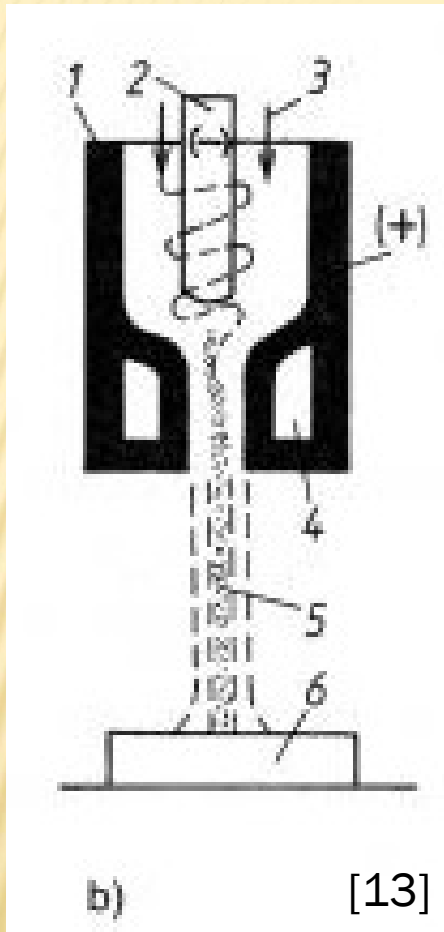
Dělený materiál	Plazmový plyn	Ochranný plyn
Konstrukční ocel	O ₂ Ar N ₂	Vzduch O ₂ O ₂ + N ₂ O ₂ + H ₂
Nerezavějící a vysoce legovaná ocel	N ₂ Ar + H ₂	N ₂ Ar O ₂
Neželezné kovy	Vzduch N ₂ O ₂ Ar + H ₂	Vzduch H ₂ O ₂ + N ₂
Kompozitní materiály	Vzduch O ₂ Ar + N ₂ Ar + H ₂	O ₂ + N ₂ O ₂ + H ₂

HOŘÁK S TRANSFEROVÝM OBLOUKEM

- 1) Těleso hořáku
- 2) Katoda
- 3) Přívod plynu
- 4) Chlazení hořáku
- 5) Paprsek plazmatu
- 6) Obrobek



HOŘÁK S NETRANSFEROVÝM OBLOUKEM

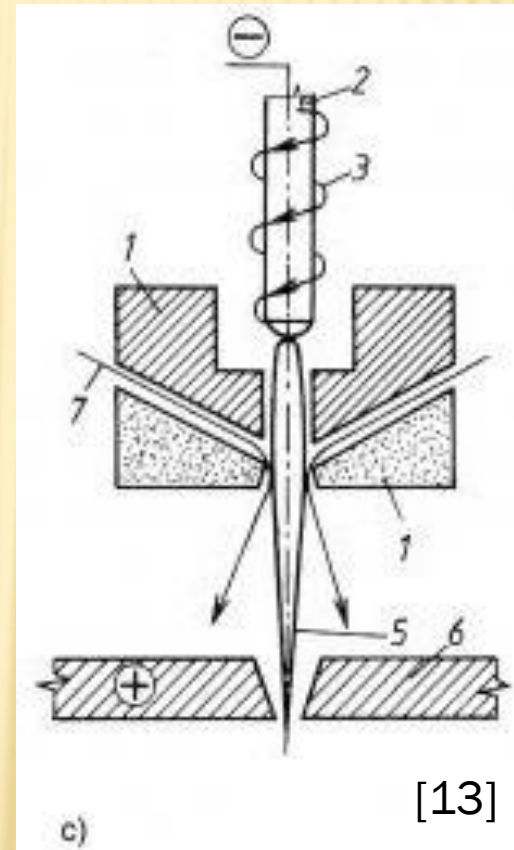


- 1) Těleso hořáku
- 2) Katoda
- 3) Přívod plynu
- 4) Chlazení hořáku
- 5) Paprsek plazmatu
- 6) Obrobek

<https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>

HOŘÁK S VODNÍ STABILIZACÍ

- 1) Těleso hořáku
- 2) Katoda
- 3) Přívod plynu
- 5) Paprsek plazmy
- 6) Obrobek
- 7) Přívod vody



<https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>

FYZIKÁLNÍ VELIČINY

✖ Debyeova stínicí délka [2]:

- + Vložíme-li do plazmy nepohyblivý náboj, jsou jím částice s nesouhlasným nábojem přitahovány a se souhlasným odpuzovány. Plazma se tedy polarizuje a elektrické pole vloženého náboje se odstíní. Odstíněním klesne potenciál elektrického pole v plazmatu oproti potenciálu elektrického pole ve vakuu na $1/e$ v dané vzdálenosti h

$$h = \sqrt{\frac{\epsilon_o k}{e^2 n_o} \frac{T_+ T_-}{(T_+ + T_-)}}$$

$$h = \sqrt{\frac{\varepsilon_o k}{e^2 n_o} \frac{T_+ T_-}{(T_+ + T_-)}}$$

- ε_o - permitivita vakua
- k - Boltzmannova konstanta
- n_o - koncentrace nabitých částic
- e - elementární náboj
- T_+ - teplota kladných iontů
- T_- - teplota záporných iontů

✗ Plazmová frekvence [14]:

- + Určuje vlastnosti plazmy
- + Plazmová frekvence vzniká při poruše plazmy vnější silou, vzniknou tlumené harmonické kmity s úhlovou frekvencí elektronů odpovídající kruhovému pohybu kolem nehybných iontů

✗ Plazmová frekvence:

- e – elementární náboj
- m – hmotnost elektronu
- ϵ_0 – permitivita vakua
- n – koncentrace nosičů náboje

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}}$$

✗ Pohybová rovnice plazmy:

$$Q \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \frac{1}{c} j \times B + \mu \nabla^2 v + (\mu + \mu') \nabla(\nabla \cdot v) + \rho g + \sigma E$$

Q - Hustota (součet hustoty iontů, elektronové hustoty, hustoty neutrálních atomů)

$\frac{dv}{dt}$ - Lagrangeova derivace (skutečná změna rychlosti elementu plazmy při pohybu z místa na místo)

✗ Pohybová rovnice plazmy:

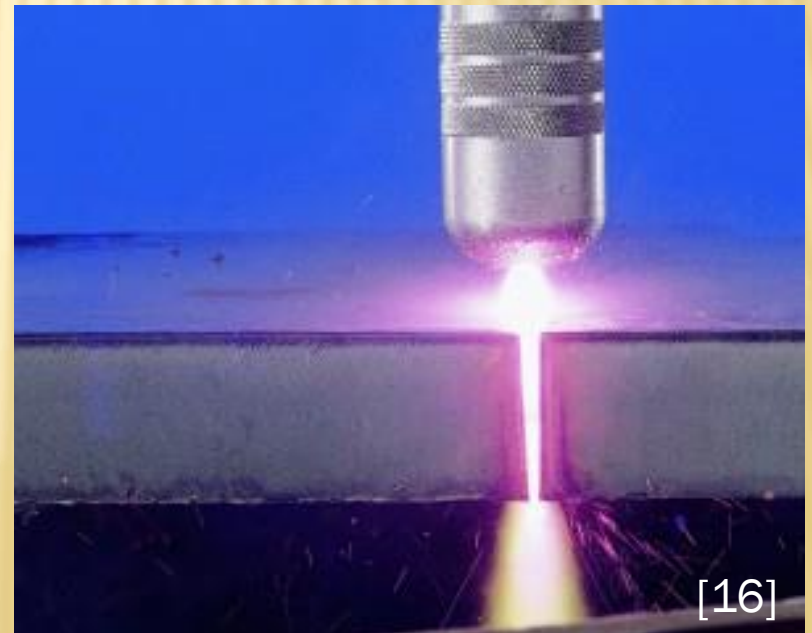
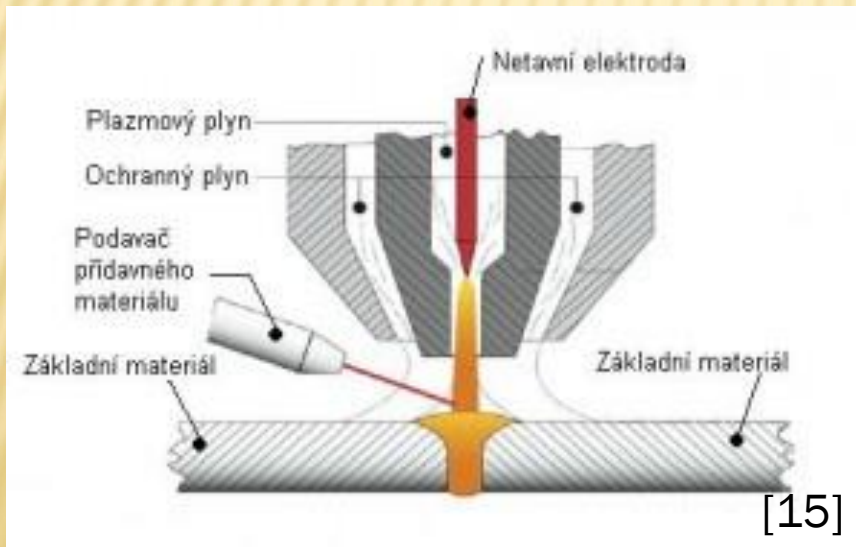
$-\nabla p$ - Gradient celkového tlaku (tlak iontů, neutrálních částic, elektronový tlak)

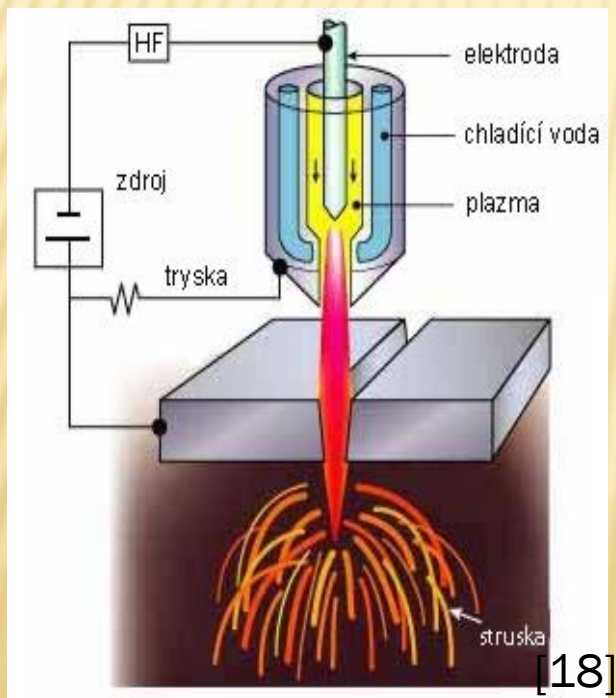
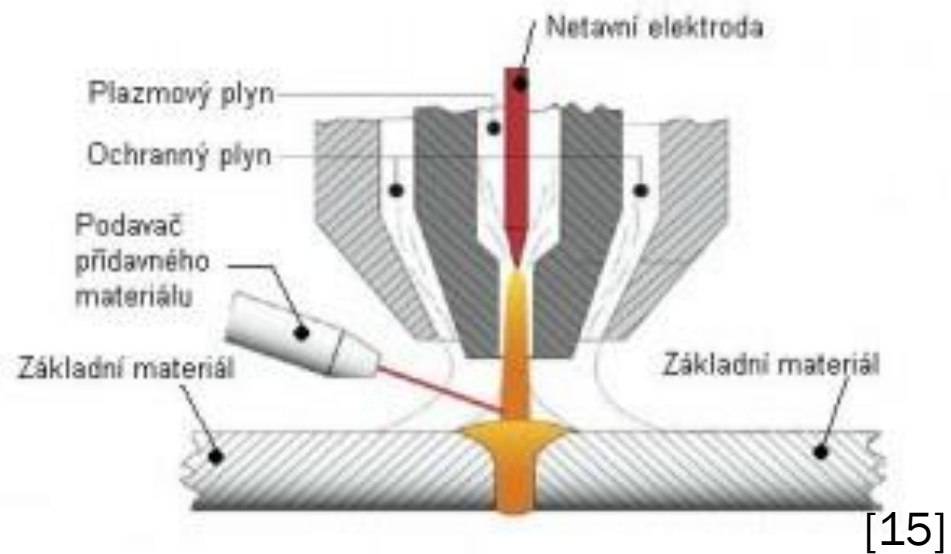
$\frac{1}{c} j \times B$ - Hydro-magnetický účinek (j – elektrický proud; B – magnetické pole; c – rychlost světla)

$\mu \nabla^2 v + (\mu + \mu') \nabla(\nabla \cdot v)$ - Vnitřní tření (viskozita) plazmy (v – rychlost; ∇ – nabra operátor; μ – permeabilita)

ρg - Setrvačná síla

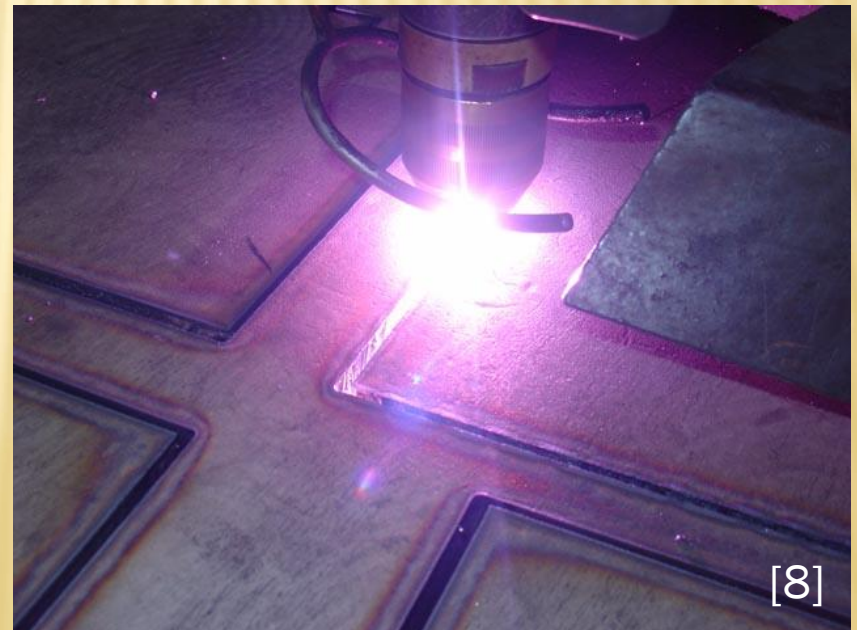
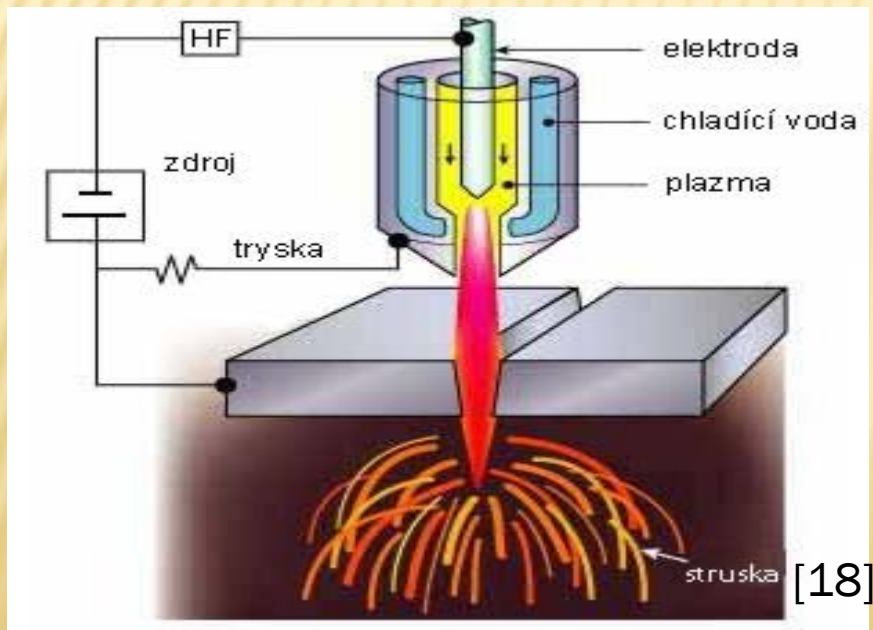
σE - Elektrický náboj v 1 cm^3 plazmy





PŘÍKLADY TEPLOT PAPERSKŮ

- dusíková plazma N_2 – 7 000 °K
- vodíková plazma H_2 – 8 000 °K
- argonová plazma Ar – 15 000 °K
- heliová plazma He – 20 000 °K
- plazma stabilizovaná vodou – až 35 000 °K

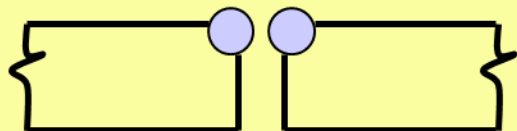




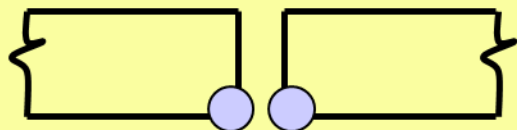
Druh vady



Natavená horní hrana řezu



Ztuhlé kapky na horní hraně řezu



Proteklý kov



Zkosení plochy řezu



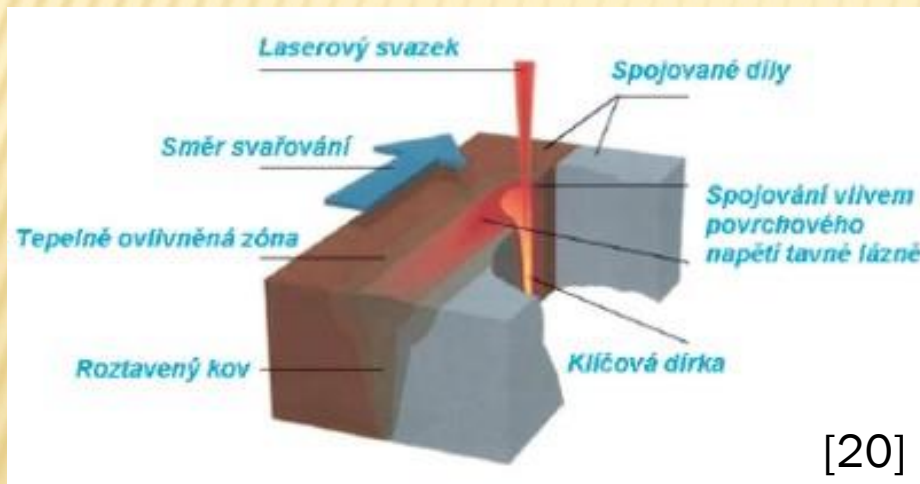
Vzdutí plochy řezu

VADY ŘEZU A JEJICH OBVYKLÉ PŘÍČINY

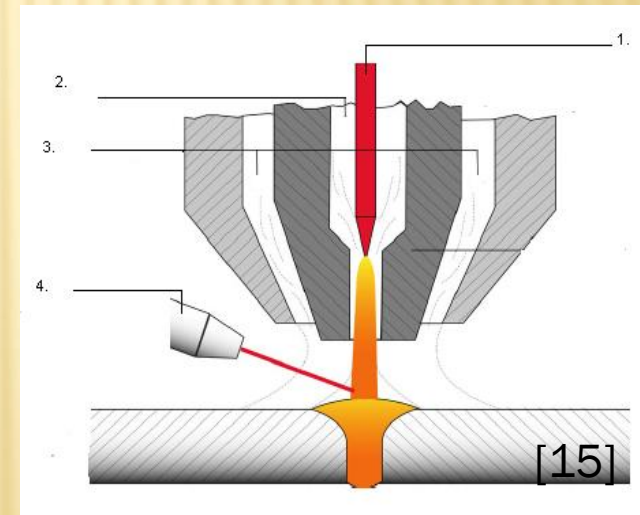
- ✗ Nepřiměřená rychlost řezání
- ✗ Nepřiměřená vzdálenost hořáku
- ✗ Příliš vysoká nebo nedostatečný výkon hořáku
- ✗ Jiné chyby

SPAŘOVÁNÍ PLAZMATEM

- ✖ Plazmové svařování patří mezi svařování v ochranné atmosféře. Oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem nejčastěji v ochranné atmosféře inertního plynu. Ve srovnání s laserovým paprskem má plazmový oblouk nižší koncentraci energie, avšak nesrovnatelně vyšší energetickou účinnost a nižší celkové provozní náklady. Spotřeba přídavného materiálu se při svařování plazmatem snižuje až na 1/10.



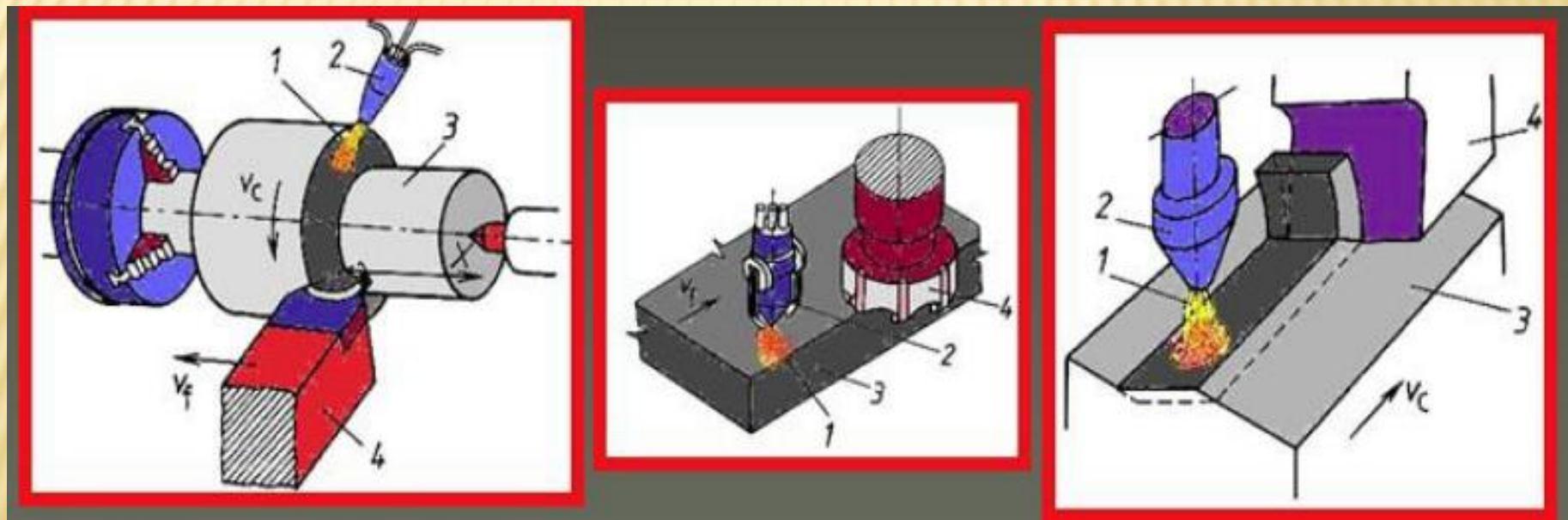
Výhody svařování plazmou: vysoká rychlost a kvalita svařování, úspora přídavného materiálu, zachování příznivých mechanických hodnot základního materiálu, hluboký průvar, ekonomický přínos



1. Wolframová elektroda
2. Plazmový plyn (argon)
3. Ochranný plyn (argon + dusík)
4. Přídavný materiál (trubička, drát, prášek)

PŘEDEHŘEV MATERIÁLU PŘED BŘITEM ŘEZNÉHO NÁSTROJE

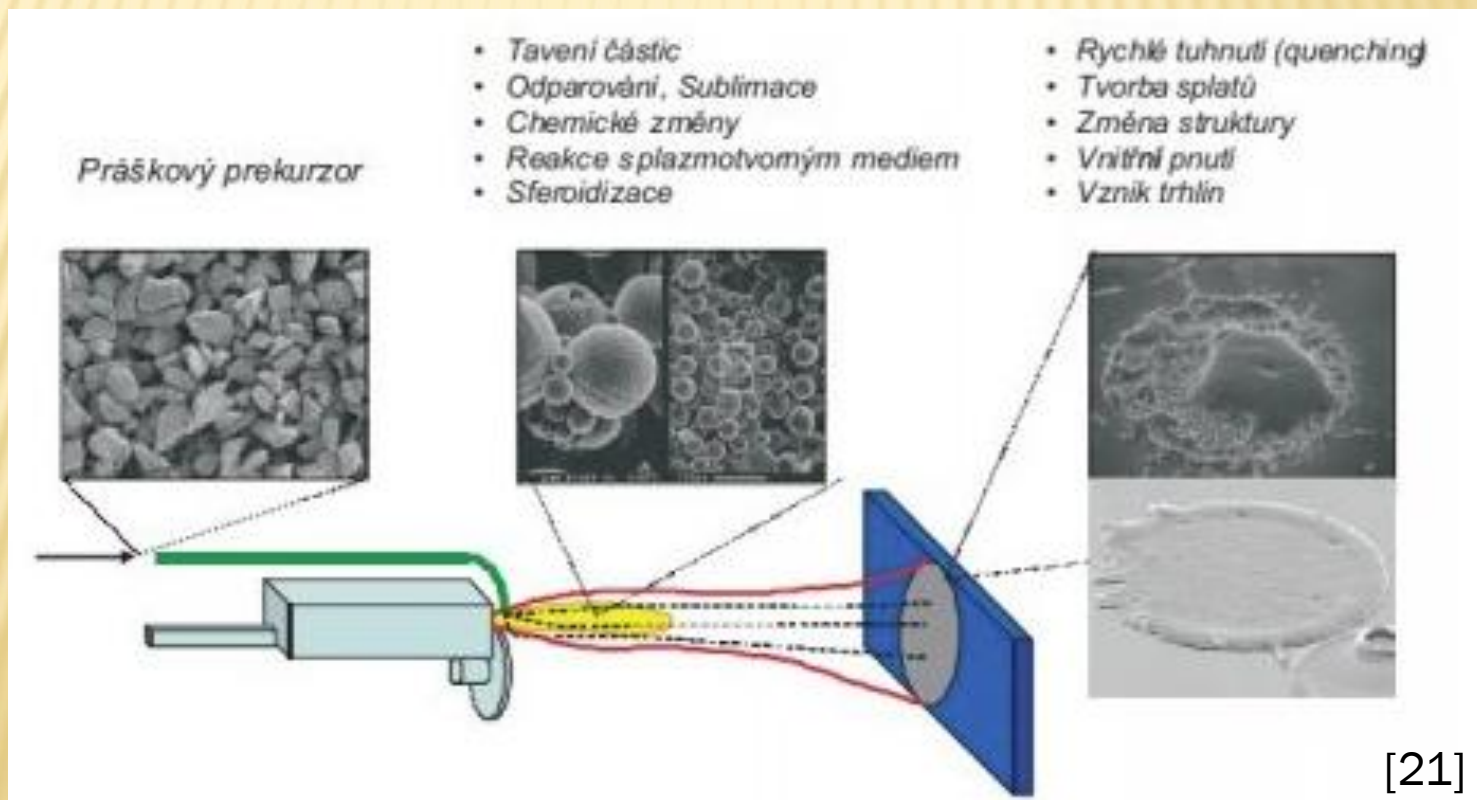
U ohřáté části materiálu změní mechanické a fyzikální vlastnosti (sníží pevnost a tvrdost materiálu) a obrábění probíhá snadněji, neboť řezné síly jsou malé. Tak se zvýší trvanlivost břitu až o 400 %. Používá pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů nebo pro obrábění extrémně dlouhých výrobků.



Obrábění s předeheřevem materiálu před břitem řezného nástroje:
a) soustružení, b) hoblování, c) frézování (1 – paprsek plazmatu, 2 – plazmový hořák, 3 – obrobek, 4 – nástroj)

NANÁŠENÍ POVLAKŮ

Zařízení umožňují nanášet železné i neželezné kovy (např. slitiny kovů, karbidy, chrom, nikl), keramické materiály, sklo a plasty. Nanášený materiál se nanáší díky adhezi nebo difuzi. Složení nanášeného materiálu se volí podle funkce dané součásti. Vytvářejí se povlaky odolné proti otěru, korozi, tepelným rázům, elektricky nevodivé, odolné proti vysokým teplotám nebo proti působení chemických látek.



VÝHODY [7]

- ✗ Vyšší rychlost než u řezání kyslíkem pro malé a střední tloušťky materiálu
- ✗ Snížení tepelně ovlivněné oblasti proti řezání kyslíkem
- ✗ Možnost řezání všech kovových materiálů hlavně vysokolegovaných ocelí a hliníku vertikálně i úkošem.
- ✗ Snadná automatizace a mechanizace
- ✗ Kvalita povrchu řezaných materiálů má minimální vliv na proces řezání
- ✗ Minimální ztrátový čas
- ✗ Dosažení vysoké kvality řezání pro střední tloušťky materiálu (10 – 40mm)

NEVÝHODY [7]

- ✗ Úhel řezné hrany je větší než u řezání kyslíkem
- ✗ Horní hrana plechu je zaoblená více než u kyslíkového řezání
- ✗ Velký vývin škodlivých plynů
- ✗ Vysoká hladina hluku 80 – 100 dB
- ✗ Vysoké pořizovací náklady
- ✗ Kvalitně dělitelné pouze elektricky vodivé materiály
- ✗ Tepelné ovlivnění materiálu v okolí řezu

ZDROJE

- ✖ [1] <https://m.blog.naver.com/milly13/221502041447>
- ✖ [2] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Plazma>
- ✖ [3] <https://www.thinglink.com/scene/1018631817349038082>
- ✖ [4] <https://alfajertv.com/cocktail/misc/482051.html>
- ✖ [5] <https://www.nwo.nl/en/news/new-planning-veni-rounds-announced-uniformity-across-all-domains>
- ✖ [6] https://projects.mpe.mpg.de/theory/plasma-crystal/PKE/Hintergrund_e.html
- ✖ [7] https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29211
- ✖ [8] <https://www.nessap.com/plazma>
- ✖ [9] https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17741
- ✖ [10] https://theses.cz/id/wo7100/Jan_Pokorny_BP.pdf
- ✖ [11] <https://docplayer.cz/6540326-Plazmovy-rezaci-system-transcut-300.html>
- ✖ [12] <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/navarovani-plazmatem-ochranne-povlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu.html>
- ✖ [13] <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>

ZDROJE

- ✖ [14] https://cs.wikipedia.org/wiki/Plazmov%C3%A1_frekvence
- ✖ [15] https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31988/1/bp_stehlik_adam.pdf
- ✖ [16] <https://www.machinery.co.uk/machinery-products/esab-bevel-cutting-developments-for-suprarex-hdx-plasma-cutters-direct-multi-axis-smart-bevel-technology>
- ✖ [17] <https://bravolostice.cz/en/material-division/plasma-shape-material-division>
- ✖ [18] <https://www.machinemfg.com/plasma-cutter-not-arcng/>
- ✖ [19] <http://lubos.trminek.cz/index.php/autodilna/30-plazmova-rezacka-benroyal-stahlwerk-cut40>
- ✖ [20] <https://adoc.pub/technicko-ekonomicke-zhodnoceni-kysliku-nebo-dusiku-jako-ezn.html>
- ✖ [21] <https://slideplayer.cz/slide/2961248/>