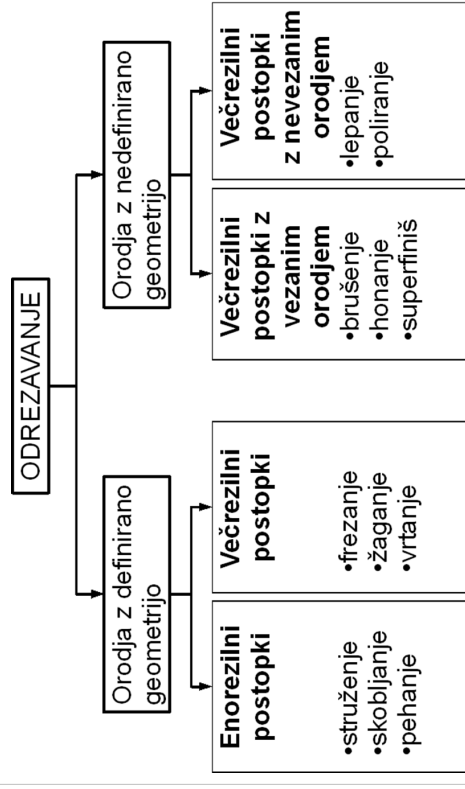


Predmet: Alternativne tehnologije 3. letnik PAP programa

Gradivo za predavanja

Ljubljana 2012

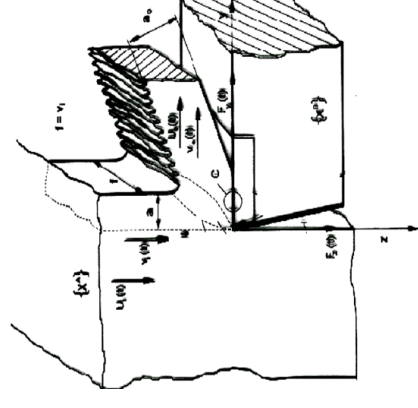
Predstavniki konvencionalnih postopkov obdelave



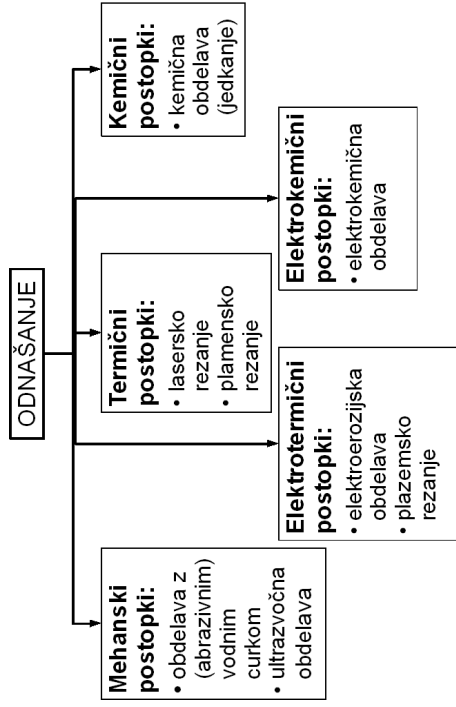
Kazalo

- Uvod
- Elektroerozijska obdelava
 - potopna elektroerozija
 - žična elektroerozija
- Vodni in abrazivni vodni curek
- Lasersko rezanje
- Plazemsko rezanje
- Plamensko rezanje
- Primerjava konturnih postopkov rezanja
- Ostali redkeje uporabljeni nekonvencionalni postopki
 - elektrokemična obdelava
 - kemična obdelava
 - ultrazvočna obdelava

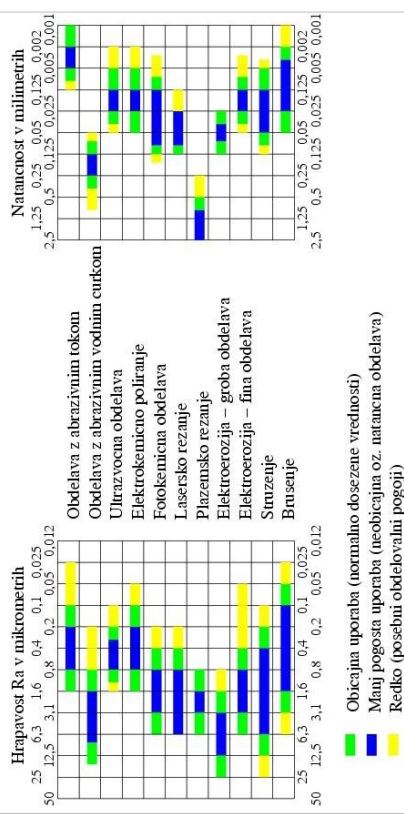
Razmere pri odrezavanju



Predstavniki nekonvencionalnih postopkov



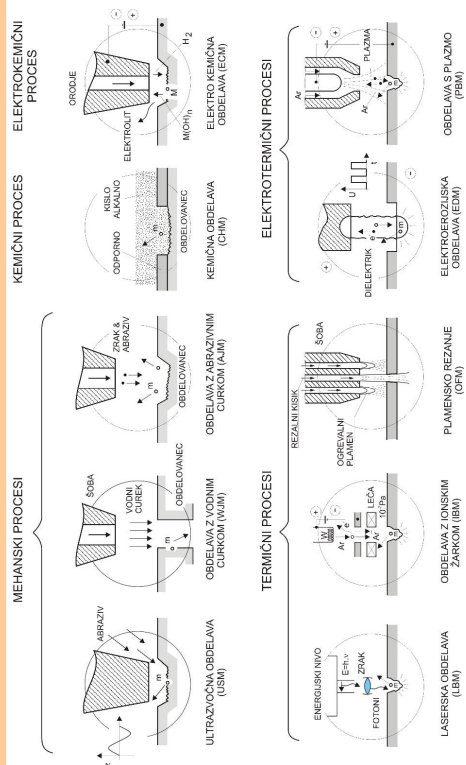
Dosežena hrapavost površine in natančnost nekaterih obdelovalnih postopkov



Konvencionalne in nekonvencionalne tehnologije

OBDELOVALNI PROCES	MAX. STOPNJA ODVZEMA (cm ³ /min)	OBČAJNA PORABA MOČI (kW/cm ² /min)	HITROST OBDELOVANJA (mm/min)	OBČAJNA GLOBINA PRODIR. NA MIN (mm)	NATANČNOST		OBČAJNA MOČ STROJA (kW)
					DOSEGLJIVA (mm)	PRIMAX. STOPNJI ODVZEMA (mm)	
Struženje	3300	0,016	76	-	0,005	0,13	22
Brišenje	820	0,46	30	-	0,0025	0,05	20
CHM	490	-	-	0,025	0,013	0,075	-
PBM	164	0,91	15	2,54	0,5	2,54	150
ECCG	33	0,091	0,08	-	0,005	0,063	3
ECM	16,4	7,28	-	12,7	0,013	0,15	150
EDM	4,9	1,82	-	12,7	0,004	0,05	11
USM	0,28	9,1	-	0,5	0,005	0,04	11
EBM	0,0082	455	60	150	0,005	0,05	7,5
LBM/LBT	0,0049	2,731	-	102	0,013	0,13	1,5

Delitev nekonvencionalnih procesov



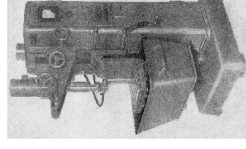
Alternativne tehnologije

Elektroerozijska obdelava

9



Trendi razvoja potopne elektroerozije



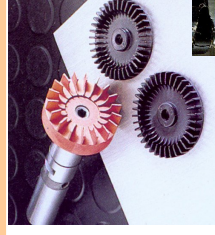
- Cena
- Adaptivno krmiljenje
- Avtonomno delo
- Enostavno programiranje
- Natančnost

11



Elektroerozijski postopki

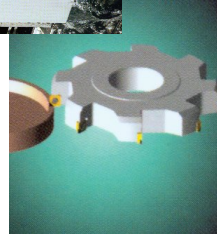
Potopna elektroerozija



Žična elektroerozija



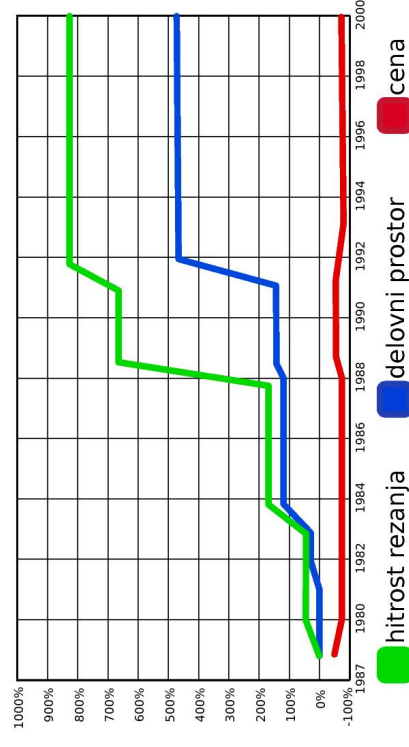
Elektroerozijsko brušenje



10



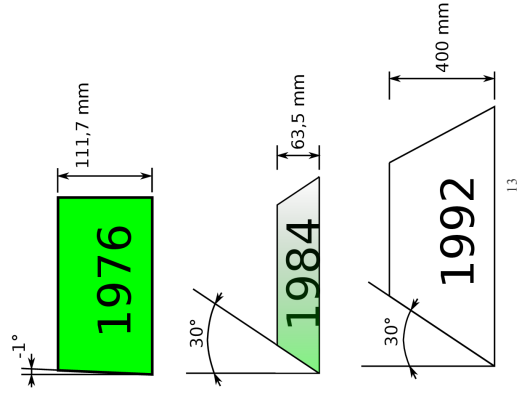
Trendi razvoja žične elektroerozije



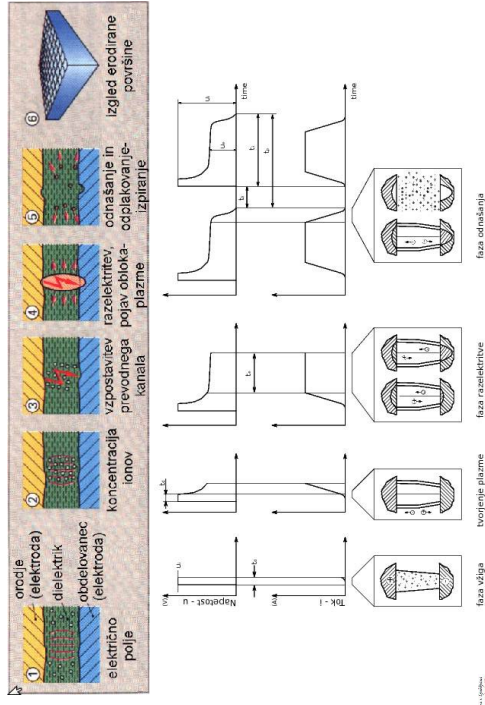
12



Trendi razvoja žične elektroerozije



Potek razelektritve



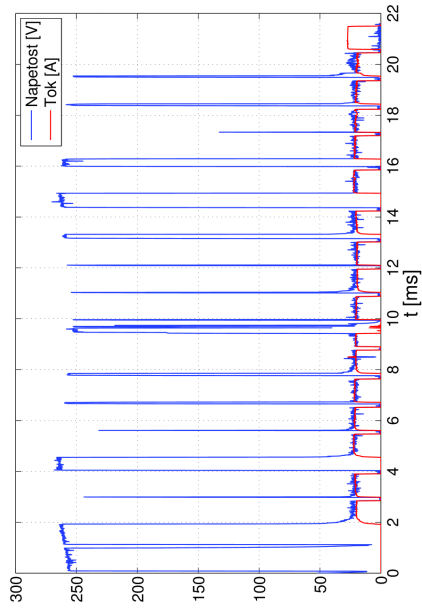
Potek razelektritve



Potek razelektritve

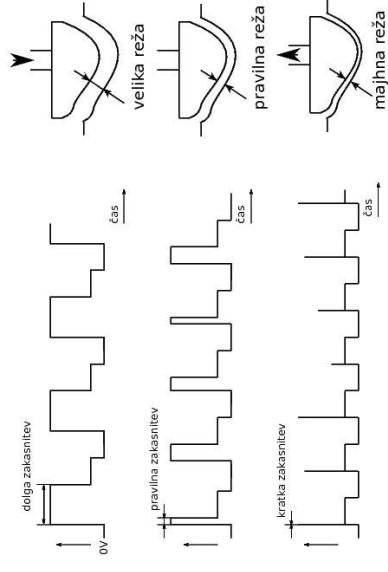


Napetostni in tokovni signal v reži



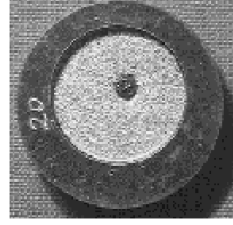
17

Krmiljenje velikosti reže



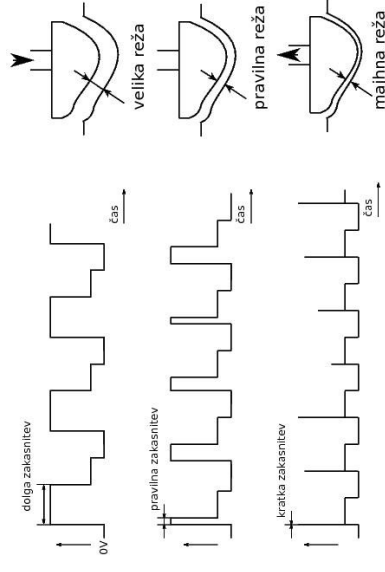
19

Poškodba površine zaradi nepravilnih razmer v reži



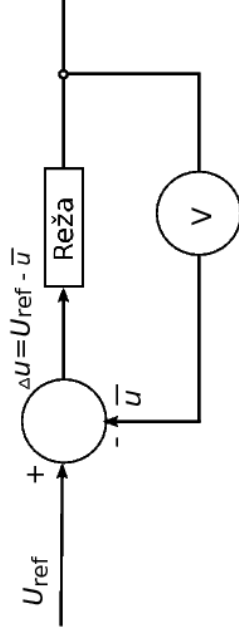
18

Krmiljenje velikosti reže



20

Krmiljenje velikosti reže



- $\bar{U} > U_{ref} \rightarrow$ zmanjšaj režo
- $\bar{U} < U_{ref} \rightarrow$ povečaj režo
- $\bar{U} = U_{ref} \rightarrow$ reža ostane nespremenjena

21

Deionizirana voda ali olje?

- Z uporabo olja se dosega:
- boljšo hrapavost površine,
 - nižjo obrabo elektrode in
 - večjo natančnost obdelave

Prednosti deionizirane vode:

- ni vnetljiva
- bolj ekološka

23

Funkcije dielektrika

- Dielektrik je električno neprevoden medij v katerem se dogajajo kontrolirane električne razelektritve.
- Dielektrik s svojo viskoznostjo zadržuje širjenje plazemskega kanala in s tem pripomore h globljim kraterjem.
- V dielektriku se raztaljen in uparjen material obdelovanca ohladi, strdi in odstranjuje iz reže ter črpa preko filtrov, ki zadržijo odstranjene delce.
- Dielektrik hladi elektrodo in obdelovanec.

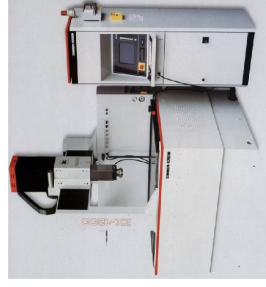
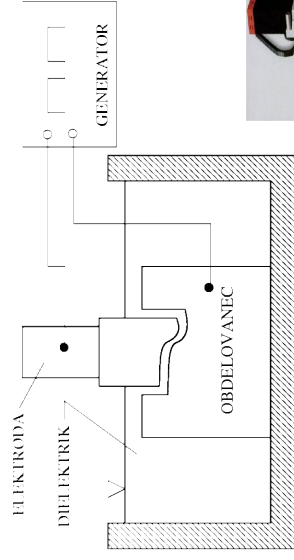
22

Kdaj je čas za menjavo olja?

- Hladno olje je motno, segreto na delovno temperaturo pa bistro, kar kaže na povečano vsebnost vlage ali večjo koncentracijo dolgih molekularnih vezi.
- Barva čistega olja (brez odvzetih delcev) se je spremenila in postala podobna barvi lakov.
- Povečala se je viskoznost olja.
- Vonj olja je postal bolj intenziven.
- Zmanjšala se je produktivnost obdelave.
- Zmanjšala se je stabilnost obdelave.
- Poslabšala se je hrapavost izdelane površine.

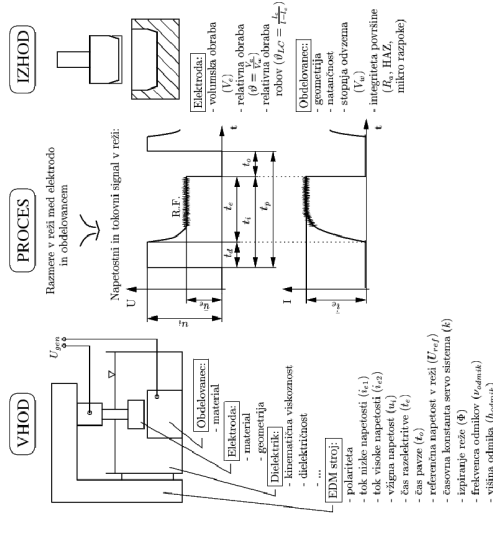
24

Potopna elektroerozija



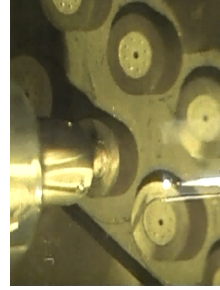
25

Parametri potopne elektroerozije



27

Primeri obdelave



26

Obdelovalni parametri

- Hitrost odnašanja
 - električne velikine
 - velikost reže
 - stabilnost procesa
- Stabilnost procesa
 - velikost reže
 - ploskovna gostota toka
 - onesnaženost reže
- Izpiranje reže
 - oblika elektrode
 - velikost reže
 - tlak dielektrika
 - višina odmika elektrode
 - frekvenca odmikov

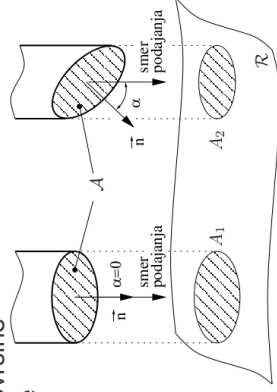
Obdelovalni parameter	Obdelava	
	groba	fina
u_t [V]	200	300
i_e [A]	50	1
t_p [μs]	600	10
E [J]	0,8	0,0003

28

Izbira obdelovalnih parametrov

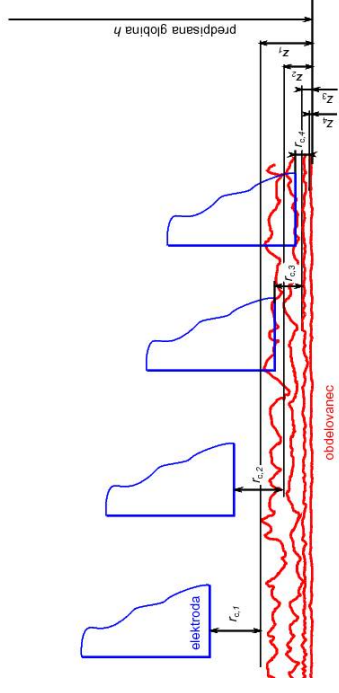
- Material obdelovanca in elektrode

- baker – jeklo
 - grafit – jeklo
 - baker – barvne kovine
- Nadalje izbiramo glede na
 - velikost erodirne površine
 - način izpiranja reže
 - obrabo elektrode



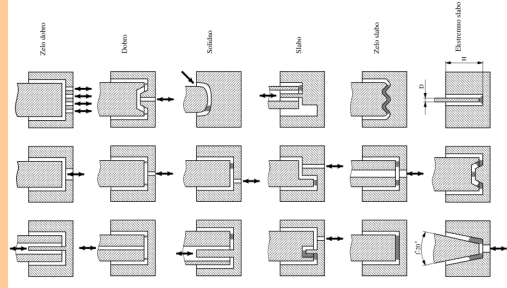
29

Prehod od grobe k fini obdelavi



31

Stopnje zahtevnosti izpiranja reže



30

Tehnološka tabela

Ingersoll 80P, elektroda: ECu, obdelovanec: jeklo	1	2	3	4	5	6
Vžigna napetost	180	180	180	140	140	140
Razelektřitveni tok	0,8	1,4	2	3	4	11
Čas impulza	56	66	91	135	270	350
Čas pavze	25	31	28	50	71	130
Velikost reže	7,3	7,3	7,3	7,0	6,9	6,5
Servo ojačanje	8,1	8,1	8,1	7,0	7,9	7,5
Čas odmika	0,05	0,05	0,05	0,05	-	-
Višina odmika	0,05	0,05	0,05	0,05	-	-
Stopnja odvzema materiala	V_w [mm ³ · min ⁻¹]	0,29	0,55	0,81	2,83	9,26
Volumska obraba elektrode	V_c [mm ³ · min ⁻¹]	0,012	0,013	0,022	0,016	0,016
Relativna obraba robov elektrode	θ_{LC} [-]	0,10	0,08	0,08	0,09	0,10
Srednja višina odstopanja neravnin	R_a [μm]	1,7	1,9	2,9	4,4	6,5
Srednja višina neravnin	R_z [μm]	11,7	14,2	18,2	25,3	33,9
Največja višina neravnin	$R_{z,max}$ [μm]	14,9	16,3	22,3	30,9	43,1
Globina bele plasti	HAZ [μm]	4,5	7,5	9,5	12,8	16,2
Dodatek za nadaljnjo obdelavo	z [mm]	0,019	0,02	0,03	0,04	0,06
Bočna reza	$2 \cdot s$ [mm]	0,03	0,07	0,07	0,16	0,22

32

Elektrode

Material

Material	Tališče [°C]	Toplotna prevodnost [W/mK]	Gostota [kg/m ³]
Baker	1085	400	8930
Grafit	3350	<140	<2000

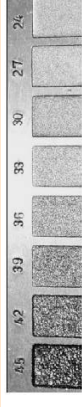
Izdelava

- frezanje
- struženje
- žična elektroerozija
- potopna elektroerozija

33



Integriteta površine

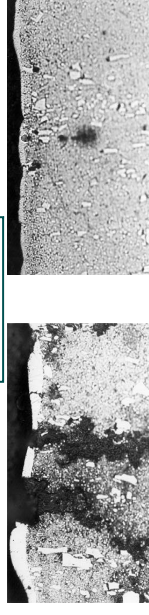


Groba obdelava

500x povečava



Fina obdelava



slabo

dobro

35

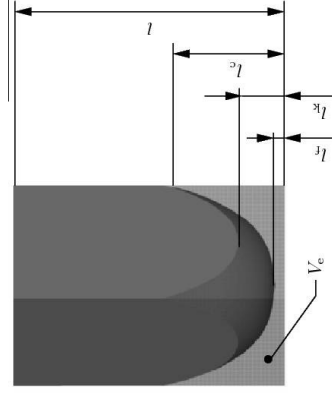


Kriterij	Baker	Grafit	Opomba
Velikost elektrode	< 10.000 mm ²	> 10.000 mm ²	Gostota bakra je 5 krat večja od gostote grafitu. Velika bakrena elektroda je problematična zaradi velikih pospeškov, ki so prisotni med obdelavo.
Natančnost izdelave	ujemi H7/h6, toleranca oblike < 7 μm	manjša natančnost v primerjavi z bakreno elektrodo	Problem grafitu je velikost zrn, ki med obdelavo izpadajo (ne prihaja do rezanja zrn) in je zaradi tega omejena natančnost izdelave.
Kvaliteta obdelane površine	R _a < 1,1 μm, VDI < 20	R _a < 1,1 μm, VDI < 20	Velikost grafitnih zrn določa hrapavost površine. Bolj finozrnati grafiti kot EDM 3 niso cenovno ugodni.
Zahtevnost izpiranja reže	Konvekse in konkavne oblike	Samo konvekse oblike	Z grafitnimi elektrodami je težje zagotoviti stabilnost procesa.
Čas obdelave elektrode	t _{baker} = (2 ÷ 3) · t _{grafit}	Grafit dopuška večje rezalne hitrosti.	
Čas eroziranja	t _{baker} = (1,4 ÷ 2) · t _{grafit}	-	
Strojni park	n < 10.000 min ⁻¹ , vr < 5.000 mm/min	n > 20.000 min ⁻¹ , vr < 5.000 mm/min	Frezalni stroj mora biti opremljen s sistemom za odsevanje, ker grafitna zrna delujejo abrazivno na vodnih strojih.

34



Obraba elektrode



$$\phi = \frac{V_c}{V_w}$$

$$\phi_{lf} = \frac{l_f}{l - l_f}$$

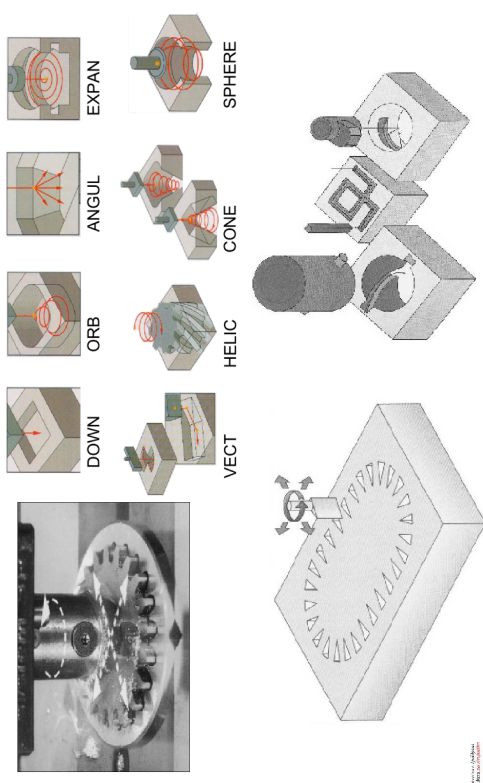
$$\phi_{lk} = \frac{l_k}{l - l_k}$$

$$\phi_{lc} = \frac{l_c}{l - l_c}$$

36



CNC krmiljeno orbitalno gibanje



37

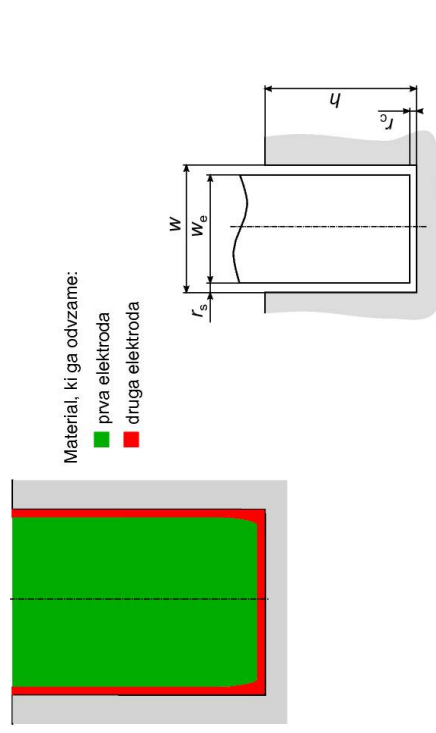
Uporaba potopne elektroerozije



V orodjarstvu sta potopna elektroerozija in visokohitrostno frezanje komplementarna postopka.

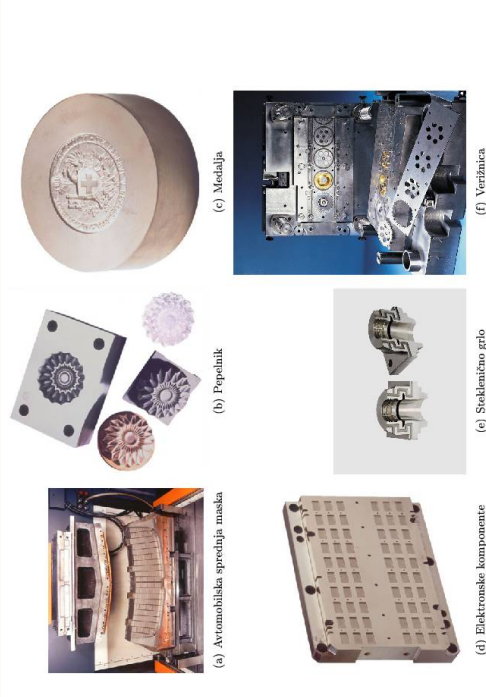
39

Groba in fina obdelava



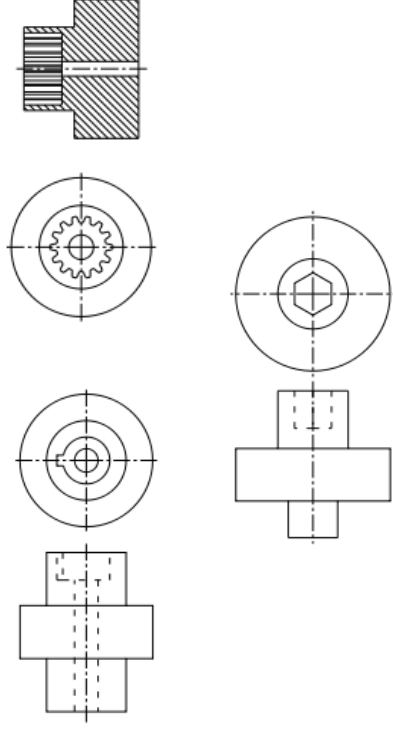
38

Primeri izdelkov

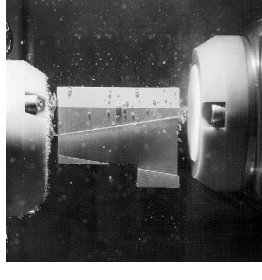
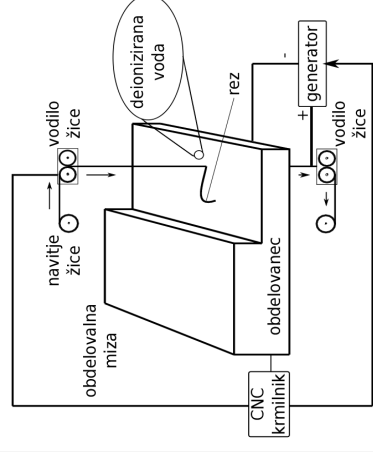


40

Primeri obdelav



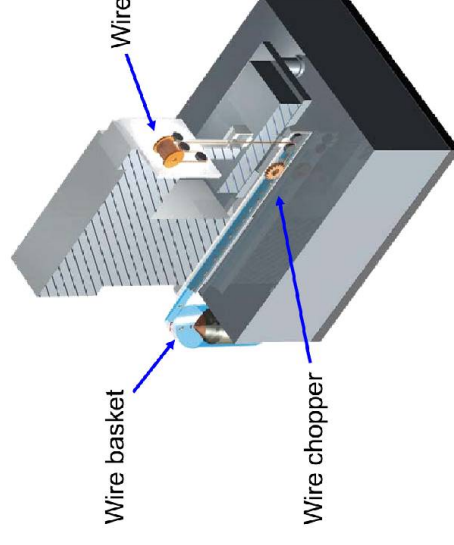
Žična elektroerozija



Konstruiranje za izdelavo s potopno elektroerozijo

- Predpisane tolerance čim širše in predpisana hrapavost površine čim večja.
- Izogibajmo se globokim in ozkim delom (elementom) na izdelku (oročju).
- Globina kalupa naj bo čim manjša. Obraba elektrode narašča z globino in je za izdelavo večjih globin potrebno večje število elektrod.
- Zaokrožitveni radii naj bodo čim večji. Na manjših globinah je radij zaokrožitve lahko večji kot na večjih globinah.

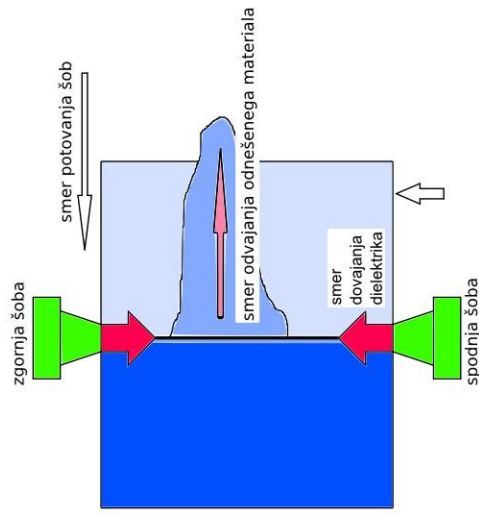
Žična elektroerozija



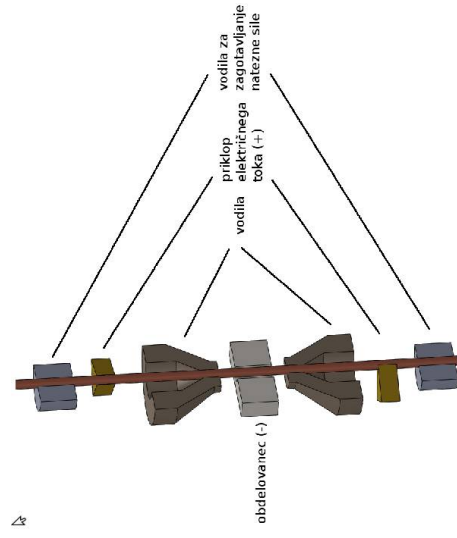
Obdelovalni parametri

- Električne veličine
 - izbira grobih obdelovalnih parametrov
 - izbira finih obdelovalnih parametrov
- Intenzivnost izpiranja
 - čim boljše, šobe naj drsijo po zgornji in spodnji površini obdelovanca
- Sila napenjanja žice
 - čim večja, omejena z natezno trdnostjo žice
- Stabilnost procesa
 - poleg ostalih pogojev v reži (kot pri potopni elektroeroziji) igra pomembno vlogo tudi sila napenjanja žice

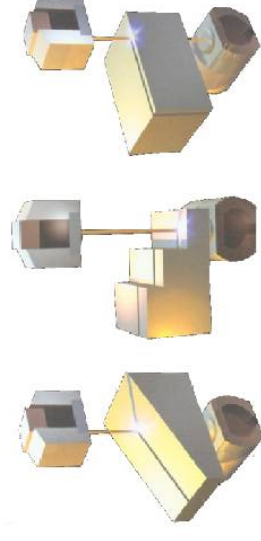
Izpiranje reže



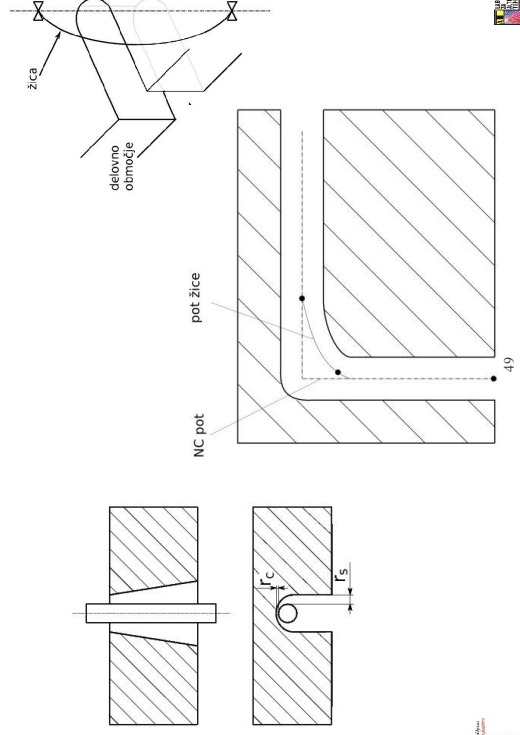
Sistem vodenja žice



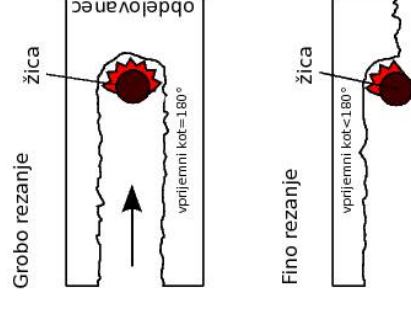
Primeri spreminjanja debeline – vpliv na parametre grobega reza



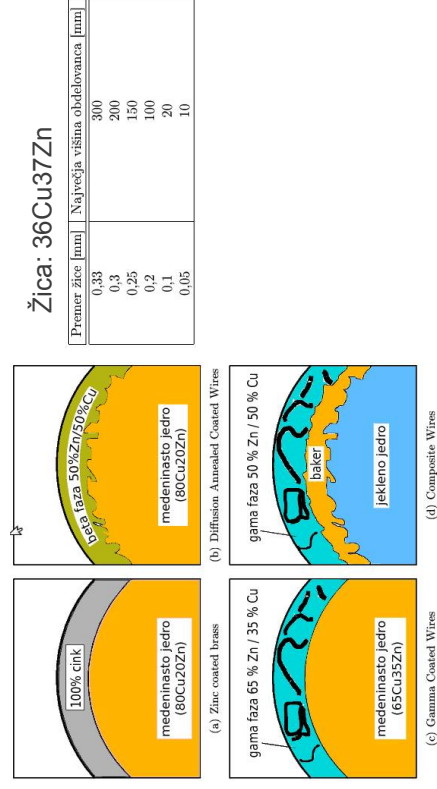
Značilnosti reza



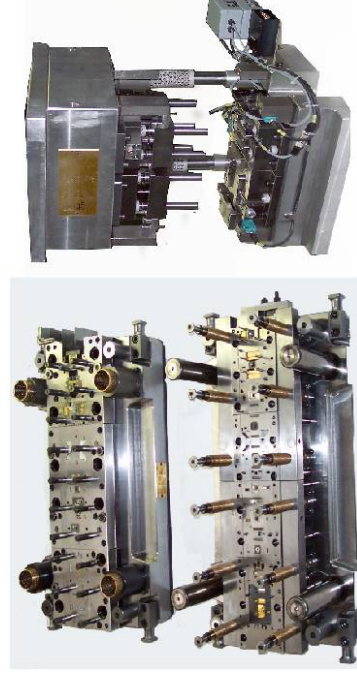
Prehod od grobe k fini obdelavi



Žica kot orodje



Rezalno orodje (štancanje)



Primeri izdelkov



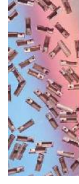
Elektroda za potopno elektroerozijo



Satelitska komponenta



Turbinske lopatice



Medicinske komponente



53

55

Alternativne tehnologije

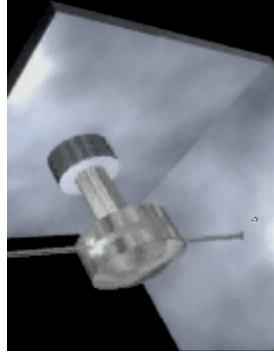
Vodni in abrazivni vodni curek



55



Primeri rezanja z žično elektroerozijo



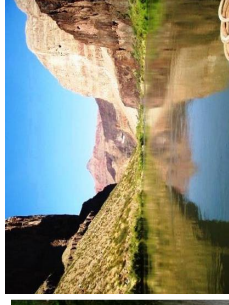
54



56



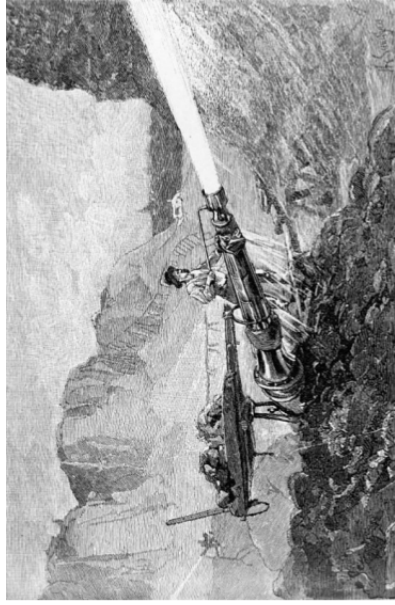
Moč vode v naravi



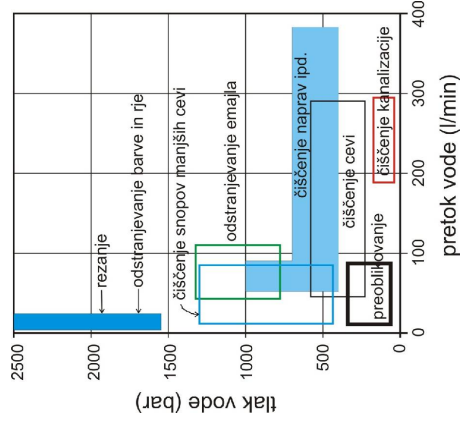
56



Verjetno prva uporaba vodnega curka leta 1883



Področja uporabe različnih tlakov in pretokov

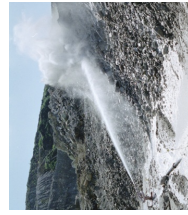


Izkoriščanje vodne energije

- Pridobivanje mehanske energije
- Voda kot orodje



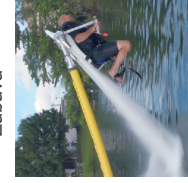
Mlin na Muri



Rudarstvo

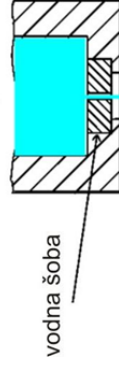


Prisilna sredstva



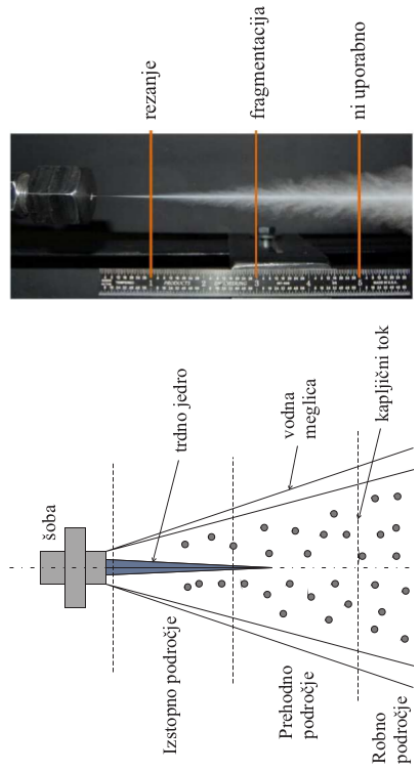
Zabava

Oblikovanje vodnega curka



$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 \cdot v_1^2 + \rho_1 \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_2 \cdot v_2^2 + \rho_2 \cdot g \cdot z_2$$

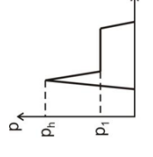
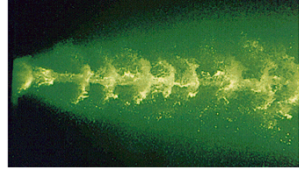
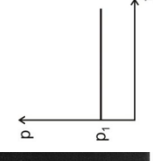
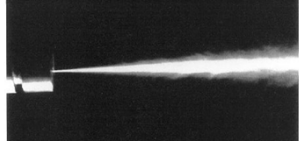
Struktura vodnega curka



61

Kontinuiran ali pulzni curek

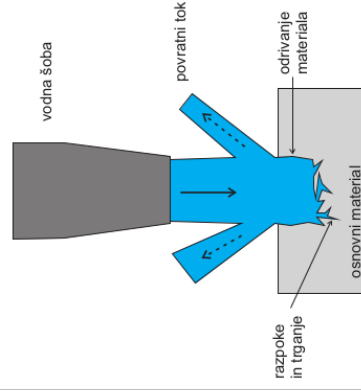
- Kontinuirani curki so bolj natančni, medtem ko imajo pulzni curki večjo udarno moč.
- Izkoriščamo t.i. učinek vodnega kladiiva.



63

Princip odnašanja z vodnim curkom

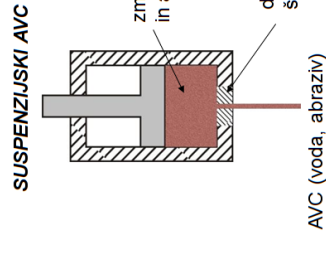
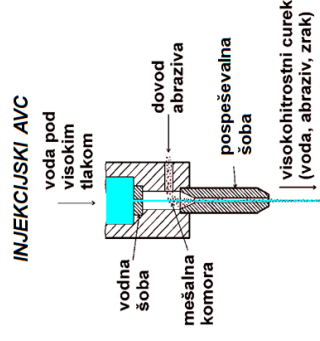
- Odnašanje je omejeno na materiale, ki imajo razpoke, in na mehkejše materiale.
- Poškodbe na materialu nastanejo zaradi:
 - plastične deformacije oz. izrivanja materiala,
 - penetracije vode v razpoke → širjenje razpok, razpoka,
 - trganja.
- Vrste obdelav:
 - Rezanje
 - Fragmentacija



62

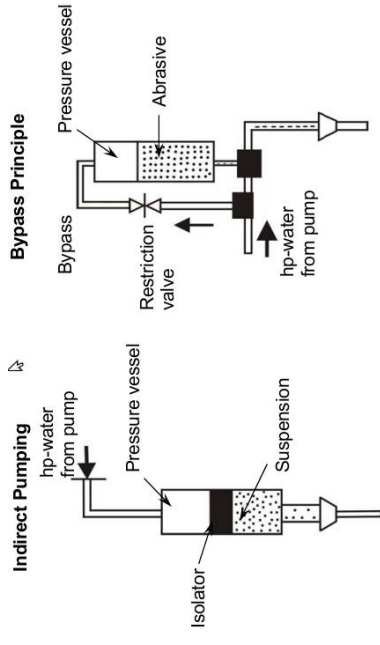
Nastanek abrazivnega vodnega curka

- Suspenzija – zmes tekočine in trdnih delcev
- Tipični premeri curkov: 0.5 - 1.2 mm – odvisno od velikosti abrazivnih zrn



64

Suspenzijski princip oblikovanja visokohitrostnega abrazivnega vodnega curka



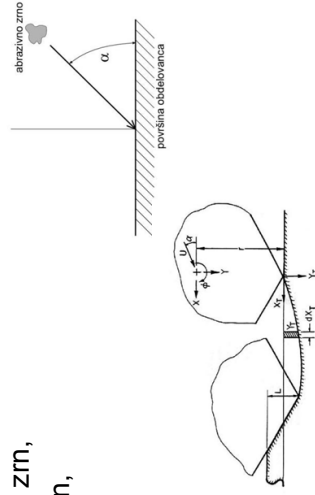
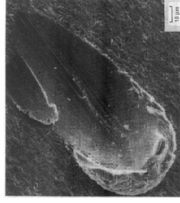
Erozija trdih delcev

Odnašanje z abrazivnim vodnim curkom

Mehanizem: erozija trdih delcev

Velikost kraterjev je odvisna od:

- hitrosti abrazivnih zrn,
- vpadnega kota zrn,
- vrste materiala,
- vrste abraziva.



Obdelovalni parametri rezanja z abrazivnim vodnim curkom

VHOD

ABRAZIVNI VODNI CUREK – AVC

- 1. Časovska asistija glave:
 - premer vodne šobe d_f
 - dolžina fokusirane šobe l_f
 - oblika mešalne komore
- 2. Procesni parametri AVC:
 - tlak vode p
 - pretok vode m_v
 - pretok abraziva m_a
- 3. Abraziv:
 - vrsta abraziva
 - oblika zrn
 - zrnatost



MATERIAL OBDELAVANCA

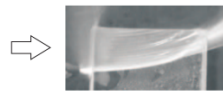
- 1. Vrsta materiala:
 - mehanske lastnosti
 - termofizikalne lastnosti
 - struktura
 - AVC koeficient obdelovalnosti
- 2. debelina materiala

KINEMATIKA

- podajalna hitrost v
- razdalja od vodne šobe do obdelovanca h_f

PROCES

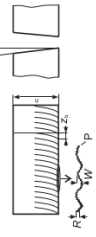
Razmere na rezalni fronti med AVC in obdelovancom



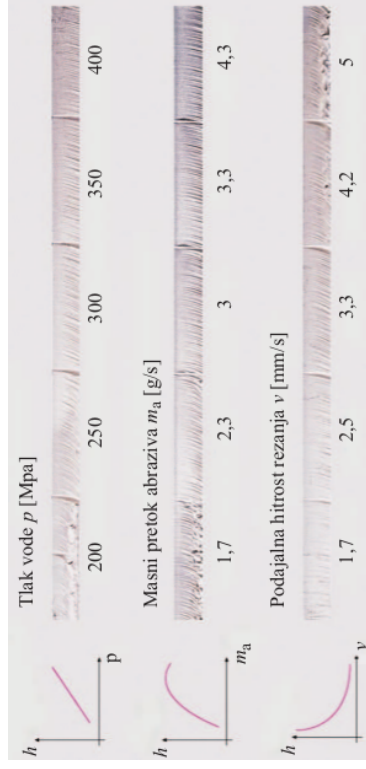
IZHOD

REZULTAT REZANJA Z AVC:

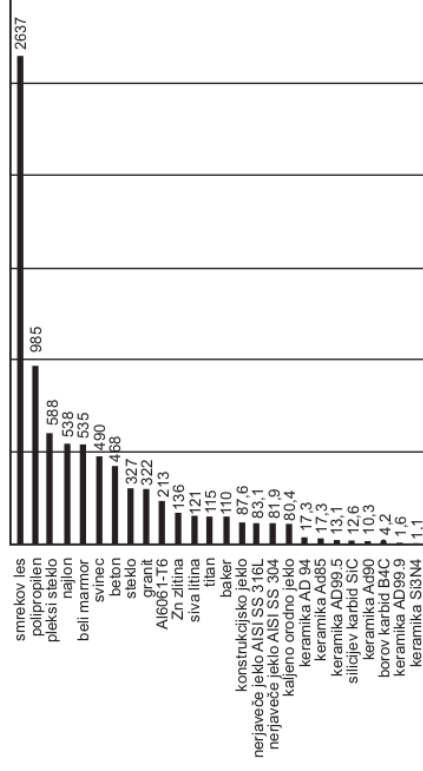
1. Učinkovitost rezanja:
 - globina reza h
2. Kvaliteta rezanja:
 - hrupavost površine R
 - valovitost oz. brazdovitost površine W
 - zasajenost brazd f
 - klenovitost reza ψ



Tlak vode, masni pretok abraziva in rezalna hitrost



Obdelovalnost materiala

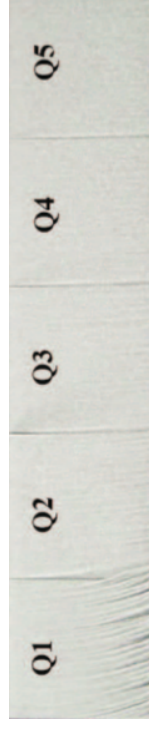


Empirični model rezanja z abrazivnim vodnim curkom

$$v = \left(\frac{N_m \cdot p^{1,594} \cdot d_o^{1,374} \cdot m_a^{0,343}}{C_z \cdot h \cdot q \cdot d_f^{0,618}} \right)^{1,15}$$

v ... hitrost rezanja [mm/s],
 N_m ... obdelovalno število materiala,
 p ... tlak vode [MPa]
 d_o ... premer vodne šobe [mm],
 m_a ... masni pretok abraziva [g/s],
 C_z ... konstanta (8800 metrski sistem),
 h ... debelina obdelovanca [mm],
 q ... kvaliteta reza,
 d_f ... notranji premer pospeševalne šobe [mm].

Kvaliteta reza



Kvaliteta reza q	Opis
q = 1	Kriterij za ločevalni rez
q = 2	Grobi rez z izrazito brazdovitostjo v spodnji polovici reza
q = 3	Gladko/grobi kriterij: rahla brazdovitost v spodnji coni reza
q = 4	Brez brazdovitosti za večino inženirskih materialov
q = 5	Zelo gladka površina reza

Abraziv

- Abrazivne peske oz. minerale za obdelavo površin delimo na:
 - okside (korund oz. aluminijev oksid, kremenčev pesek oz. silicijev oksid),
 - silikate (granat, olivin, cirkonijev silikat).
- Za obdelavo površin lahko dodatno uporabljamo zdrobljeno žlindra, jeklene ali steklene kroglice.



granat korund žlindra

Tipične oblike zrn



Komponente stroja za rezanje z abrazivnim vodnim curkom

krmilna enota x - os zalogovnik abrasiva

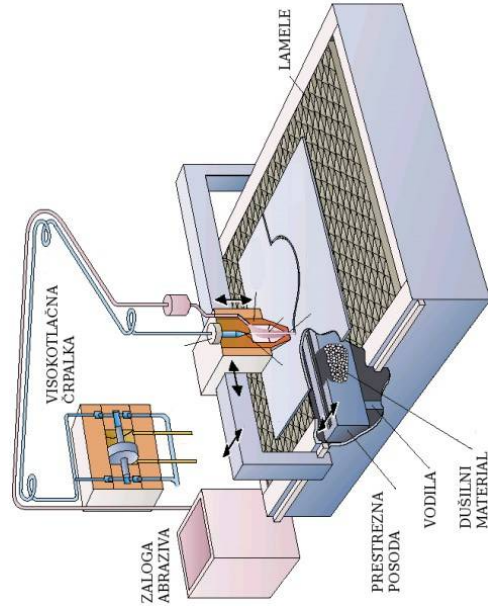


visokotlačna vodna črpalka

lovilni bazen

75

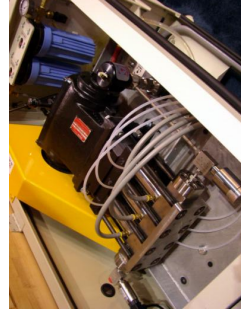
Shematski prikaz stroja za rezanje z abrazivnim vodnim curkom



74

Črpalke

Neposredno gnana črpalka z ročnično gredljo

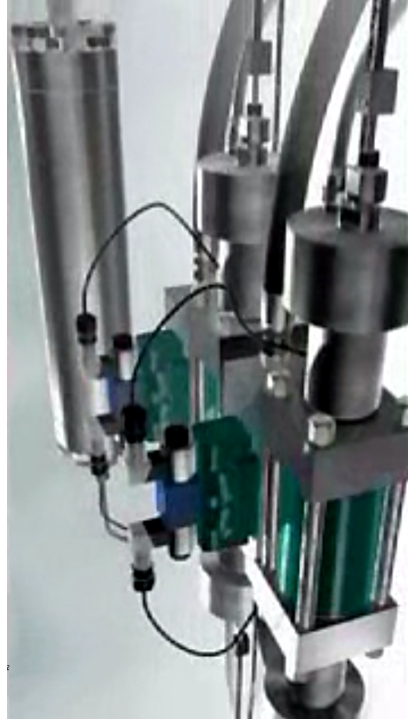


Posredno gnana črpalka - ojačevalnik



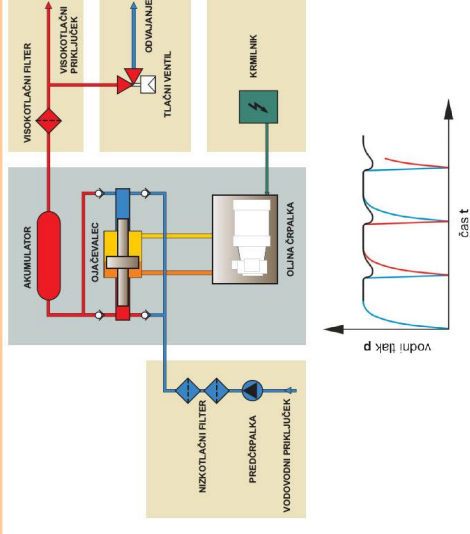
76

Hidravlična črpalka



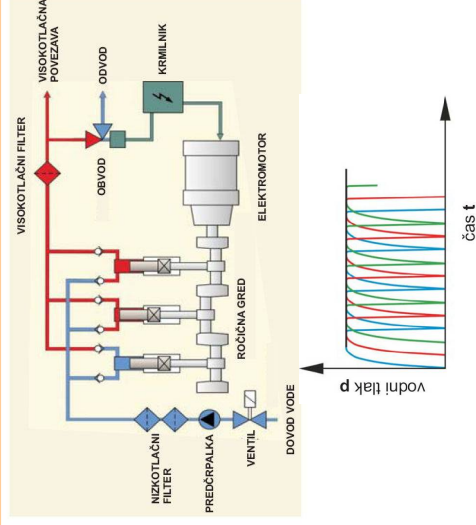
77

Posredno gnana črpalka z ojačevalcem



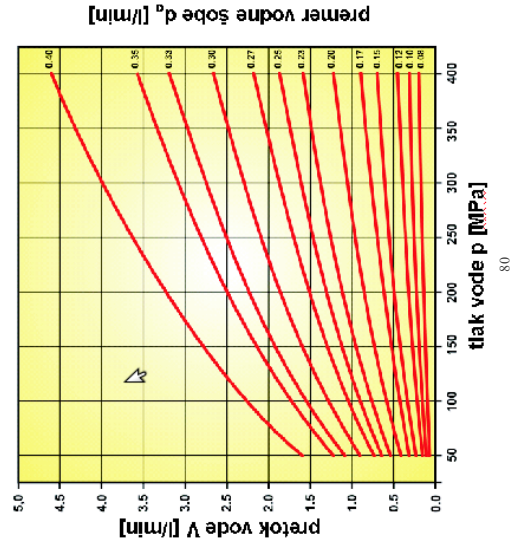
79

Neposredno gnana batna črpalka




78

Povezava med tlakom, pretokom in premerom vodne šobe




80

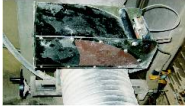

Rezalna glava



Vodne in pospeševalne šobe



Načini dovajanja abraziva

1. gravitacijsko
 
2. pnevmatsko
 

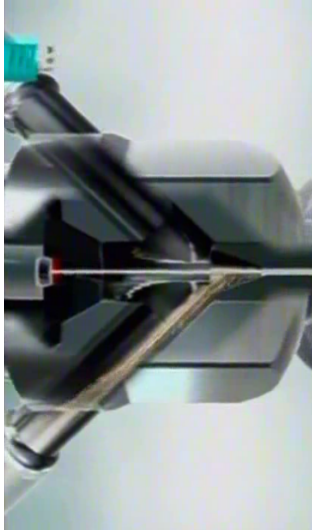
81

Proces rezanja



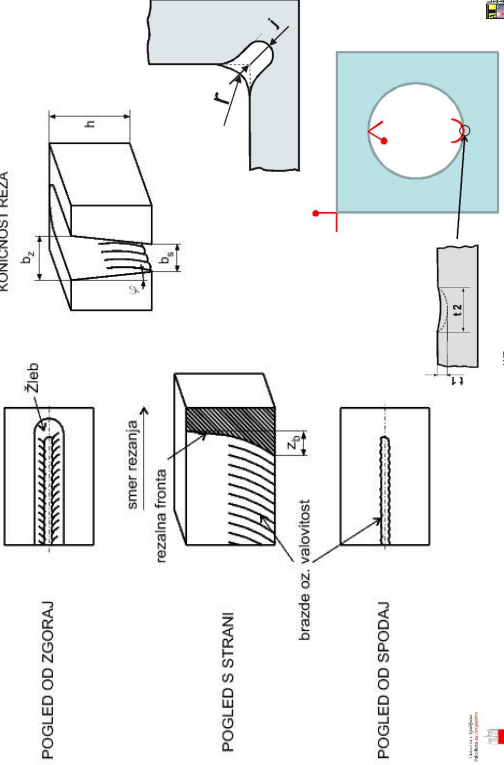
83

Delovanje injekcijske rezalne glave



82

Značilnosti obdelave



POGLED OD ZGORAJ

POGLED S STRANI

POGLED OD SPODAJ

KONICNOST REZA

Žleb

smer rezanja

rezalna fronta

brazde oz. valovitost

84

Uporaba nagiba rezalne glave



85



Primeri uporabe vodnega curka

Čiščenje



87



Vpliv izbire kvalitete reza

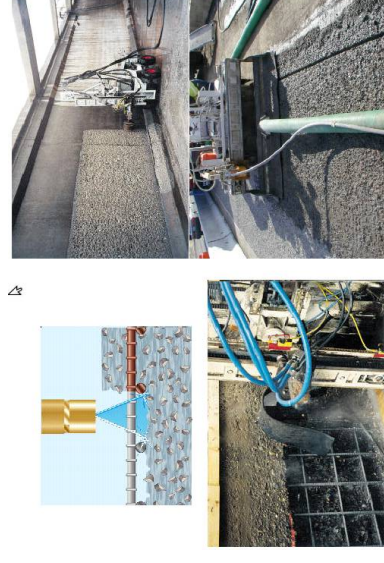
Rezred	R_a [μm]	Δ [mm]	j [mm]	t_1, t_2 [mm]	Debelina [mm]
Q5	3,2	< 0,05	< 0,25	< 0,1	15
Q4	6,3	< 0,1	< 0,7	< 0,25	25
Q3	12,5	< 0,2	< 1,5	< 0,5	40
Q2	25	< 0,3	< 3,0	< 1,0	80
Q1	50	< 0,3	< 3,0	> 1,0	300

86



Primeri uporabe vodnega curka

Fragmentacija

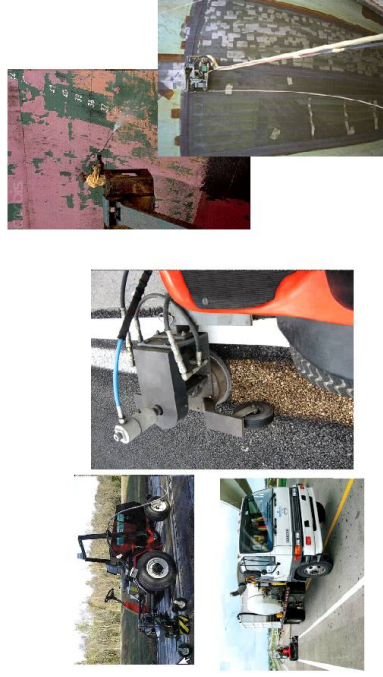


88



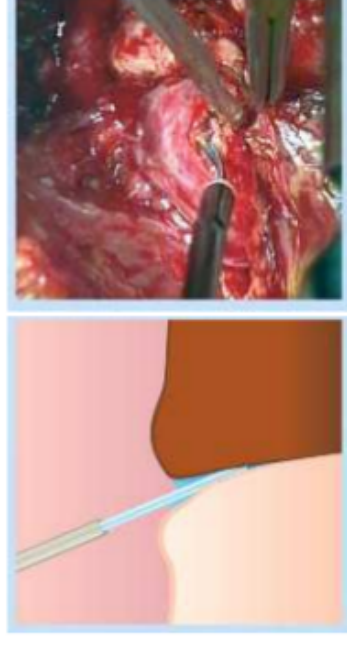
Primeri uporabe vodnega curka

Odstranjevanje prevlek in barv



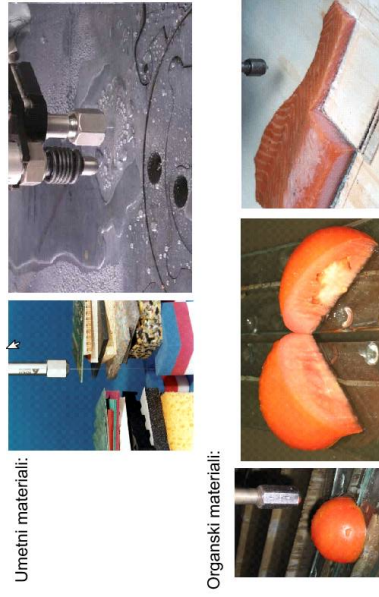
Primeri uporabe vodnega curka

Rezanje v medicinske namene



Primeri uporabe vodnega curka

Rezanje mehkih materialov

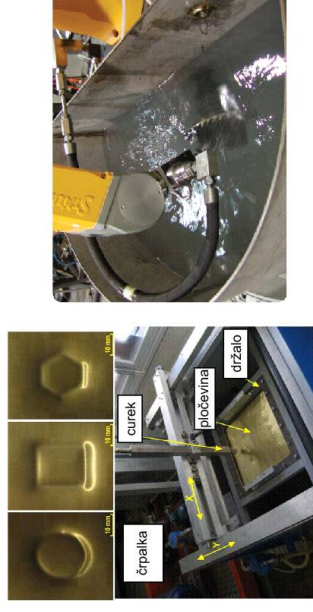


Umetni materiali:

Organski materiali:

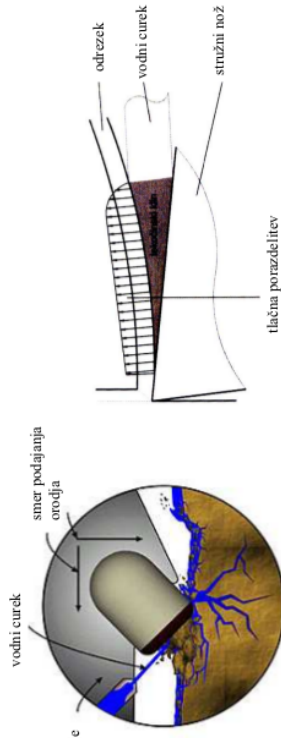
Primeri uporabe vodnega curka

Preoblikovanje pločevine in utrjevanje površin



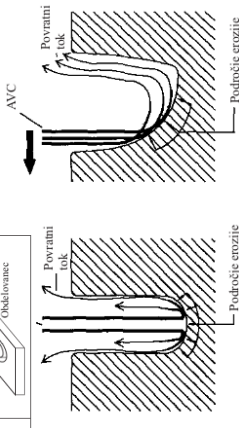
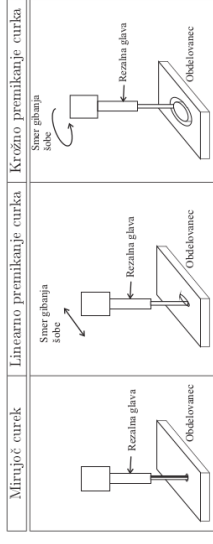
Primeri uporabe vodnega curka

Dovajanje hladilne tekočine pri struženju



Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

Prebijanje



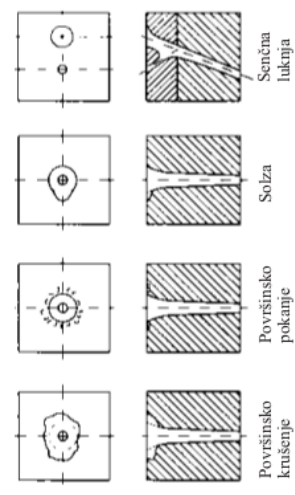
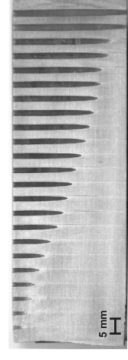
Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

Rezanje

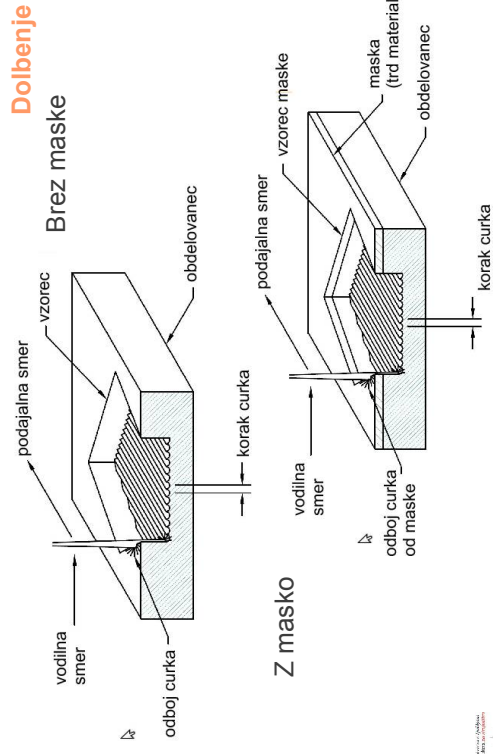


Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

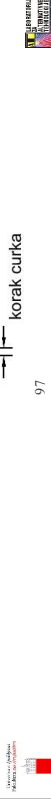
Prebijanje



Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

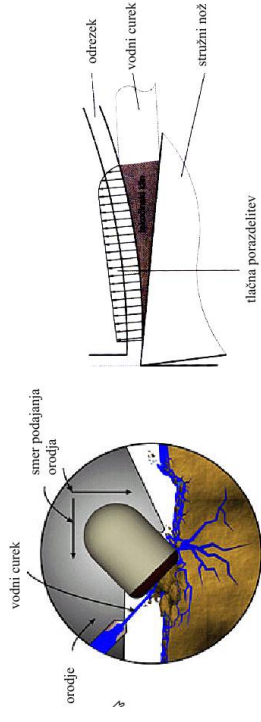


97



Primeri uporabe vodnega curka

Podpora konvencionalnim tehnologijam



tlasna porazdelitev

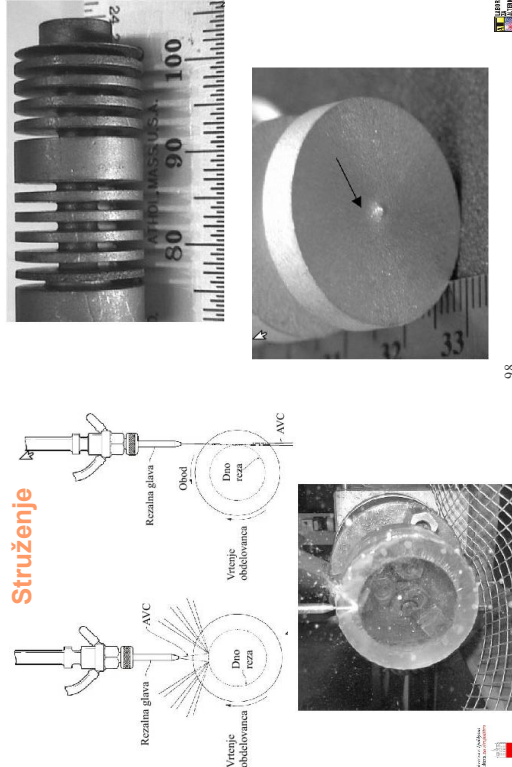
Fragmentacija kamnine

Struženje težko obdelovanih materialov

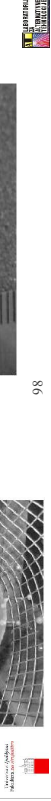
99



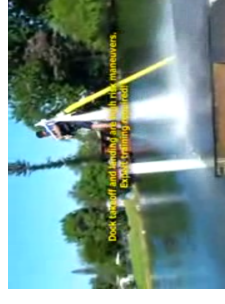
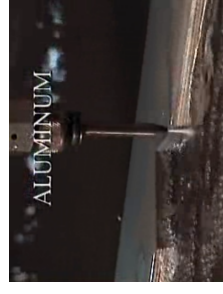
Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka



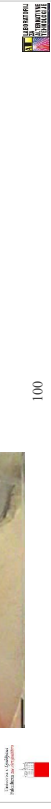
98



Primeru uporabe (abrazivnega) vodnega curka



100



Alternativne tehnologije

Lasersko rezanje

Vrste laserskih izvorov

- plinski CO₂, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$
- Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet; Nd:Y₃Al₅O₁₂), $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$
- plinski Excimer (npr. KrF)
- polprevodniški Diodni
- ...

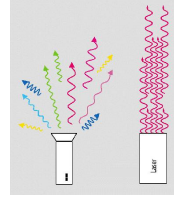
Razlika v valovni dolžini omogoča drugačen način uporabe različnih vrst laserjev

Tip laserja	Aktivni medij	Valovna dolžina [μm]	Območje	Letnica odkritja
Excimer	F ₂ ArF KrF	0,157 0,193 0,248	UV UV UV	1975
Helij-Neon	Ne	0,6328	Rdeče	1962
Nd:YAG	Nd ³⁺	1,064	IR	1964
CO ₂	Oglikov dioksid	10,64	IR	1964

Laserska svetloba

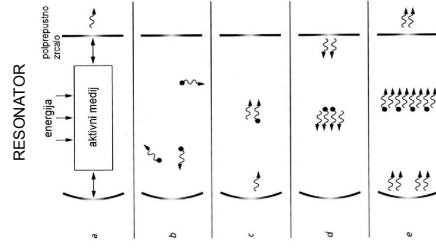
- Fizikalni princip: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER).

Vzbujanje atomov s fotoni katerih elektroni pri prehodu iz višjih nivojev oddajo energetski kvant v obliki novega fotona. Plaz fotonov ustvari žarek **monokromatske koherentne svetlobe**.



navadna svetloba

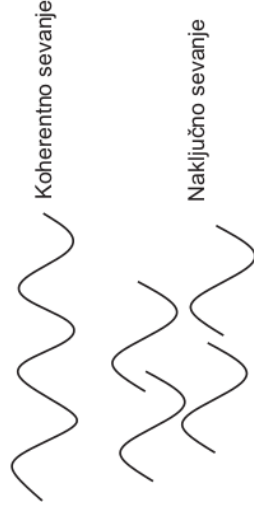
laserska svetloba



RESONATOR

Pomembne lastnosti laserskega žarka

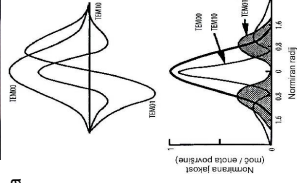
- Valovna dolžina – tip laserja
- Koherenca
- Rod in premer žarka
- Polarizacija



Rod žarka



- Rod laserskega žarka vidimo iz preseka žarka.
- Najbolj pogosta oblika je t.i. TEM00 ali Gaussova oblika. V tem načinu je gostota energije največja v centru in pada proti robu žarka.
- Rod žarka vidimo v kocki prozornega akrila.



		Število končnih polj		
		0	1	2
Število radijalnih polj	0			
	1			
	2			

105

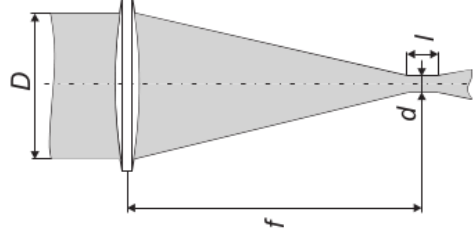


Fokusiranje laserskega žarka

- S fokusiranjem laserskega žarka ne spremenimo moči žarka ampak gostoto svetlobnega toka.
- Premer žarka v fokusu je odvisen od goriščne razdalje leče.
- Gostota svetlobnega toka v gorišču je s kvadratom obratno sorazmerna goriščni razdalji leče.

$$d = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot D} \quad l = \left(\frac{8 \cdot \lambda}{\pi} \right) \left(\frac{f}{D} \right)^2$$

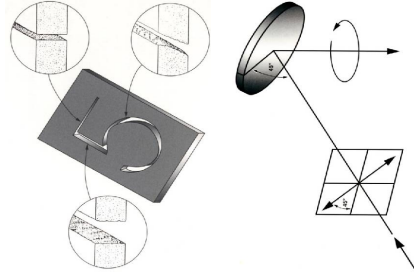
- D – premer žarka na mestu vstopa v lečo
- f – goriščna razdalja leče
- w – premer fokusiranega žarka (grlo)
- l – fokusna dolžina
- λ – valovna dolžina laserske svetlobe



107



Polarizacija laserskega žarka



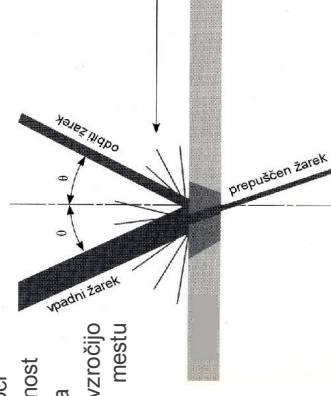
- Zaradi same konstrukcije resonatorja je laserska svetloba pri CO₂ laserju polarizirana.
- Polarizacija ima močnejši vpliv na absorpcijo energije v rezanem materialu.
- Zaželeno je rezanje v smeri polarizacije, ker je rez potem tanjši.
- Enako rezanje v vse smeri – posebno vrteče se zrcalo za rotirajočo se polarizacijo

106



Interakcija laserja in materiala

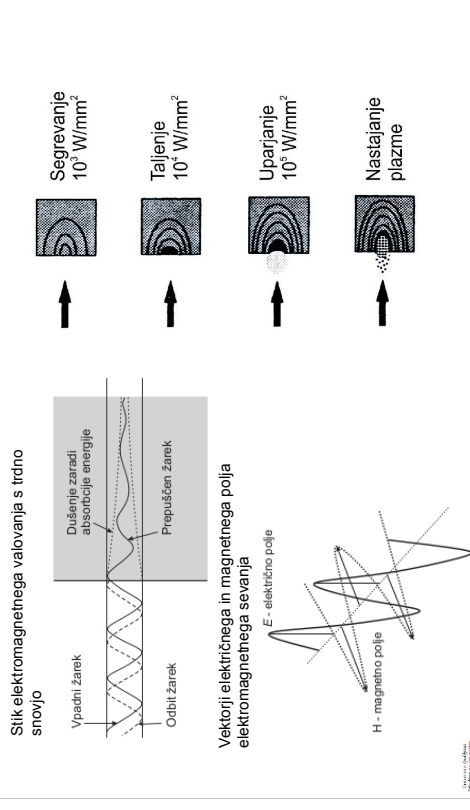
- Termični postopek
- Fokusiran žarek → gostota moči
- Absorbicija, odboj, transparentnost
- Absorbirana energija → toplota
- Vibracije v kristalni rešetki povzročijo povišanje temperature na mestu interakcije.



108



Interakcija laserja in materiala

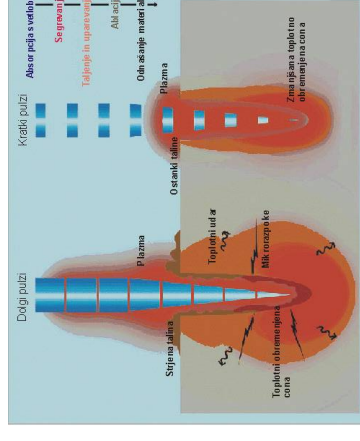


109



Kontinuiran in pulzni laser

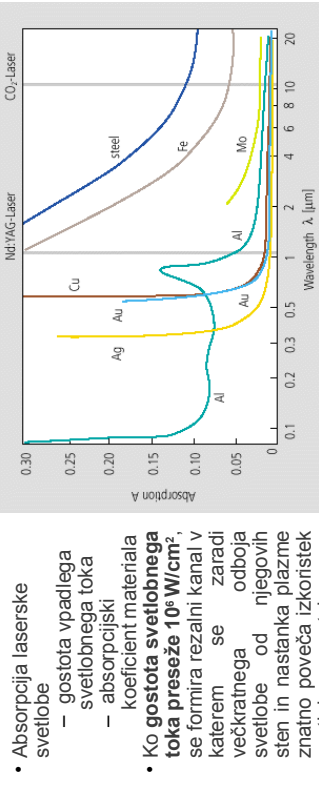
- Pulzni laserji omogočajo boljšo kontrolo laserske energije in s tem odvzema.
- Kratko pulzni laserji (nano-, piko-, femto-sekundni) so boljše od dolgo-pulznih zaradi manjšega vpliva na material in večje natančnosti.



111



Pomembne materialne lastnosti



- Absorpcija laserske svetlobe
 - gostota vpadlega svetlobnega toka
 - absorpcijski koeficient materiala
- Ko **gostota svetlobnega toka preseže 10^6 W/cm^2** , se formira rezalni kanal v katerem se zaradi večkratnega odboja svetlobe od njegovih sten in nastanka plazme znatno poveča izkoristek svetlobnega toka oz. absorpcija laserske svetlobe v materialu.
- Prevodnost toplote: večja prevodnost zmanjšuje toplotno energijo, ki bi se drugače porabila za lokalno taljenje oz. uparjanje.

110



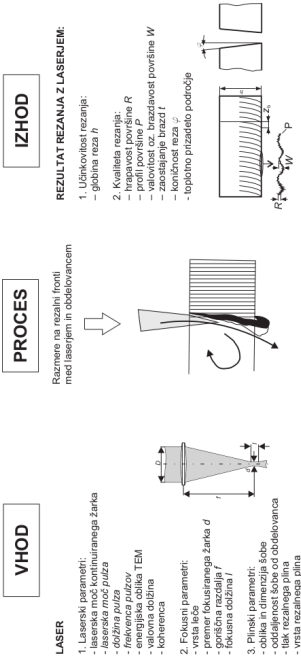
Vrste laserskega rezanja

- Kombinacije žarka, vrste in tlaka rezalnega plina določajo tri osnovne načine laserskega rezanja:
 - Lasersko sublimacijsko rezanje
 - inerten plin
 - pulzno delovanje laserja
 - nizki tlaki
 - Lasersko talilno rezanje
 - inerten ali redukcijski plin
 - načeloma kontinuirano delovanje laserja
 - visoki tlaki
 - Lasersko oksidacijsko rezanje
 - kisik
 - kontinuirano delovanje laserja
 - nizki tlaki

112



Obdelovalni parametri



116



Izbira obdelovalnih parametrov

- V celoti velja, da je potrebno za posamezno obdelavo nastaviti in nato vzdrževati čim konstantne naslednje parametre:
 - izbrati primeren rezalni plin,
 - izbrati lečo z najprimernejšo goriščno razdaljo,
 - nastaviti višino gorišča,
 - izbrati šobo z najprimernejšo odprtino in nastaviti višino reže med šobo in površino obdelovanca,
 - nastaviti pretok/tlak rezalnih plinov,
 - nastaviti hitrost rezanja.
- Izbira teh parametrov je izkustvena, vendar so si vrednosti za različne primere obdelave toliko podobne, da je za večino običajnih primerov mogoče nastaviti zadovoljive pogoje že po nekaj eksperimentih.

117



Hitrost rezanja

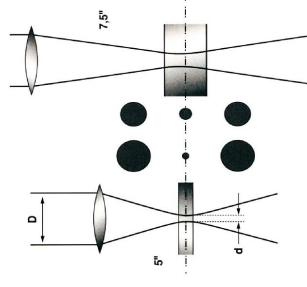
-
- Večja moč → večja hitrost, vendar:
 - širši rez
 - slabša integriteta površine
 - večje zaokrožitve
 → pulzni način delovanja v vogalih
 - Večja hitrost →
 - boljša integriteta površine
 - večji vpliv rodu žarka na koničnost reza

119



Velikost gorišča laserskega žarka

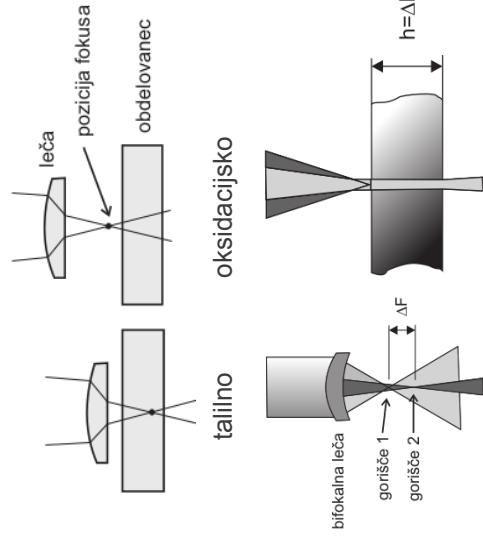
- Za rezanje debelejših materialov je primernejša večja goriščna razdalja, kar da boljšo kvaliteto reza in lažje izpihovanje taline (priporočilo 7,5" leča). Prav tako je zaželeno majhno spreminjanje premera po celotni višini reza.
- Za rezanje tanjših materialov se uporablja manjša goriščna razdalja (5" leča). Višja gostota energije omogoča hitrejšo rezanje.



120



Položaj gorišča laserskega žarka



121

Hitrost rezanja

$$v_T = Q \cdot P \cdot h^{-B}$$

Material	Q	B	Največja debelina h_{max} [mm]	Rezalni plin
Nizkoogljivo jeklo	7,04	1,053	20	kisik
Orodno jeklo	5,28	1,053	15	kisik
Nerjavno jeklo	4,65	1,265	12	dušik
Aluminij	4,79	1,495	8	dušik
Najlon	40	1,350	30	zrak
Akrilno steklo	70	1,350	30	zrak
Vežan les	69,66	1,276	30	zrak

v_T [mm/min], P [W], h [mm]

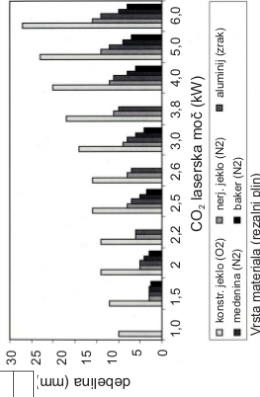
Enačba velja v območju 1,5 do 4 kW za kovine in 100 do za nekovine.

123

Rezalni plini pri laserskem rezanju

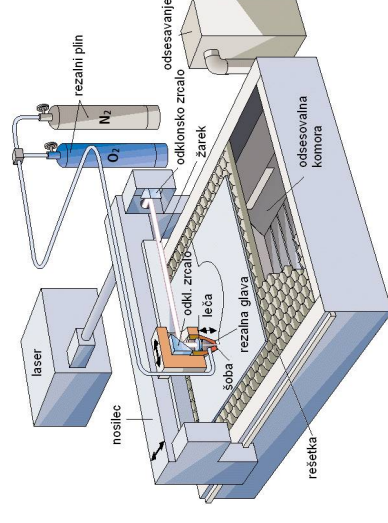
Material	Rezalni plin	Tlak (bar)
Konstruktivska jekla	Kisik 5.0	6
Ogljikova in legirana jekla		
Nerjavna jekla	Dušik 5.0	30
NiKljeve zlitine		
Bakove zlitine		
Broni		
Medi		
Titanove zlitine	Argon 5.0	15
Magnezijeve zlitine	Dušik 5.0	30
Aluminijeve zlitine	Dušik in kisik	5

Vpliv čistotbe kisika na hitrost oksidacijskega rezanja:



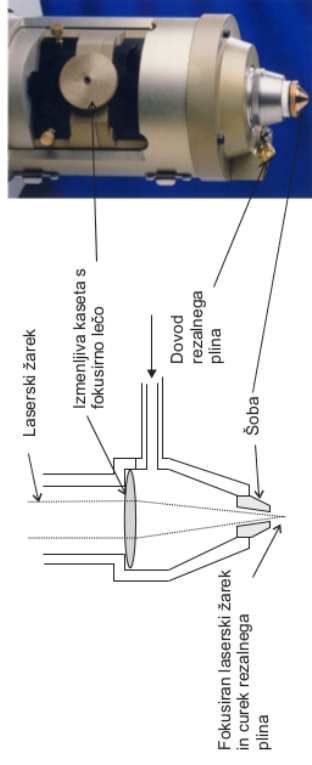
122

Shema stroja za lasersko rezanje



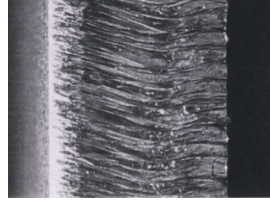
124

Rezalna glava



126

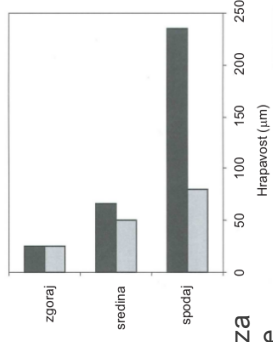
Značilnosti obdelave



Lasersko talilno rezanje

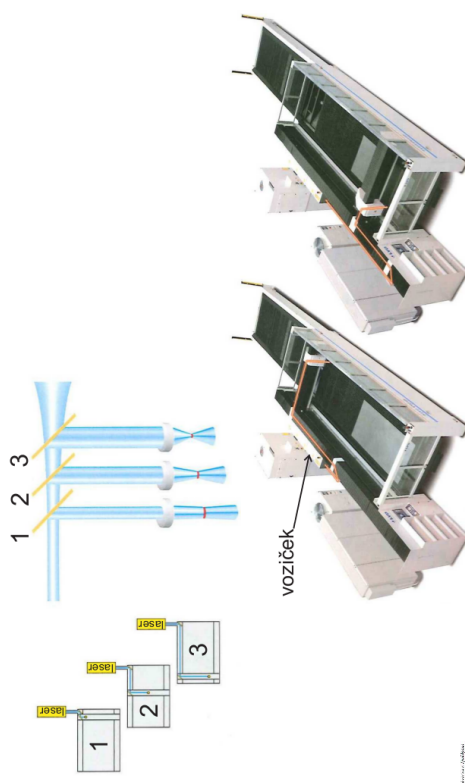


Lasersko oksidacijsko rezanje



Brazde na površini reza določajo hrapavost površine.

Vpliv dolžine optične poti



129

Hrapavost površine

- Hrapavost pri obdelavi z laserjem je zelo odvisna od materiala in načina rezanja (sublimacijsko, talilno, plamensko).
- Debelina materiala pogojuje hitrost rezanja in hrapavost.
- Parameter hrapavosti R_a se giblje nekje v rangu med 1 do nekaj čez 10 μm , v primeru sublimacijskega rezanja tudi pod 1 μm .

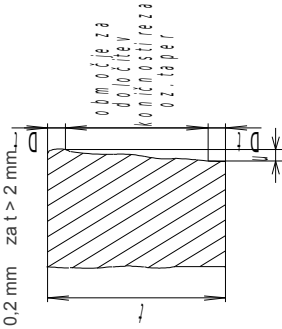
131

Koničnost reza

Definirana je z odstopenjem oblike reza od idealne pravokotne oblike. Z DIN 2310 standardom je določeno tudi merilno področje na rezu.

$Dt = 0,1t$ za $t < 2 \text{ mm}$

$Dt = 0,2 \text{ mm}$ za $t > 2 \text{ mm}$



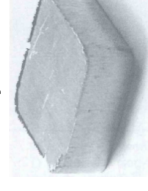
132



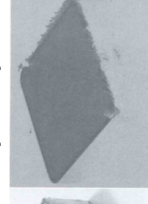
Srh

- Posledica nabiranja strjene taline na dnu reza
- Problem pri debelejših obdelovancih → pomembna je lega gorišča
- Eden izmed indikatorjev kvalitete procesa. V praksi operater stroja običajno oceni velikost srha in nato popravi nastavitvene parametre rezanja. Višina srha je pomembna predvsem za nadaljnjo obdelavo.

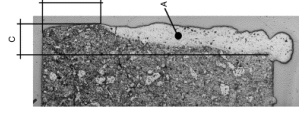
Aluminij



Nerjaveče jeklo



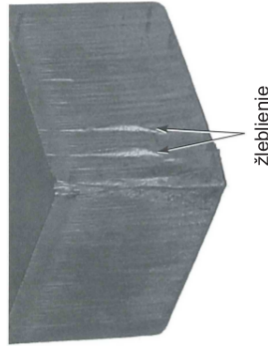
Posledica neenakomernih pogojev pri rezanju v različnih smereh



134

Žlebljenje

- Nihanje tlaka rezalnega plina
- Onesnaženost rezalnega plina
- Nihanje odmika rezalne (gorišča) glave od obdelovanca
- Nihanje laserske moči povzročajo dim in prašni delci v optični poti ali okvara resonatorja

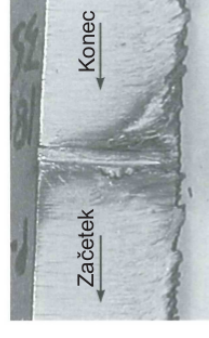
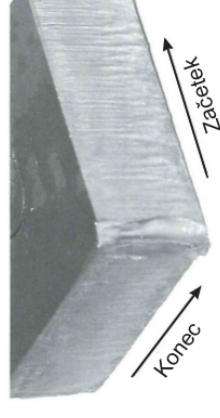


žlebljenje

133



Napaka vhoda in izhoda



135



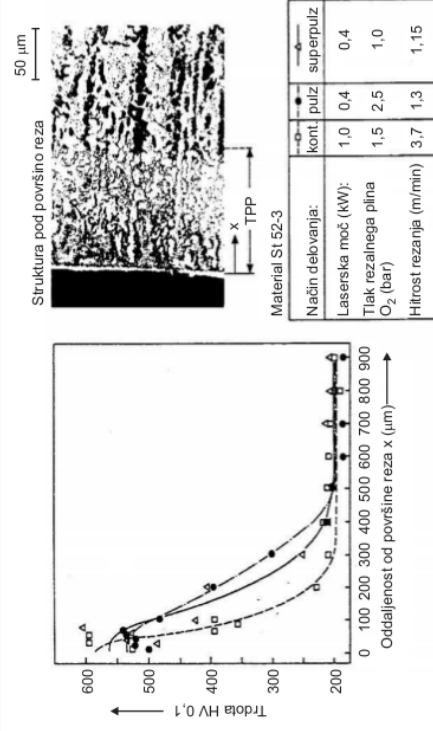
Integriteta površine

- Laserska obdelava je termičen proces → nastane **toplotno vplivano področje**, ki je sestavljena iz pretajane in nepretajane plasti.
- Če pretok rezalnih plinov med rezanjem ni dovolj velik, potem je **pretajana plast** debelejša. Tipična debelina je med 20 in 60 μm .
- Obdelava z laserskim sublimacijskim rezanjem ne pušča pretajane plasti.
- Struktura **nepretajane plasti** je odvisna od osnovnega materiala.
- Debelina nepretajane plasti je med 100 in 200 μm .
- Kisik kot rezalni plin povzroča večjo globino toplotno vplivanega področja, ker na površini reza osnovni material zgoreva in tako generira dodatno toploto.

Integriteta površine

- Mehanizem nastajanja **zaostalih napetosti** je enak pri vseh termičnih postopkih, zato so tudi po predznaku enake.
 - Zaostale napetosti nastajajo, ker je zgornja plast segreta oziroma pretajana, pod njo pa je hladen osnovni material.
 - Praviloma se na površini reza pojavljajo natezna napetosti, v notranjosti materiala pa tlačne.
 - Natezne obremenitve so večje, tlačne po velikosti manjše, pa delujejo na večjem volumnu.
- Razpoke** na površini obdelovanca, še posebno na pretajeni plasti so posledica zaostalih napetosti.
- Poleg faznih sprememb zasledimo pri laserski obdelavi še mnoge druge pojave vezane na kakovost nastale površine: v primeru rezanja polimerov in kompozitov prihaja do razpada molekularne zgradbe v okolici reza; prisotni so tudi plinasti produkti.

Integriteta površine

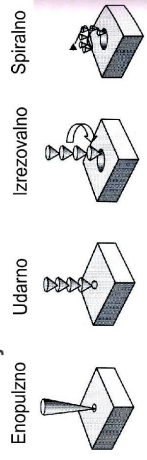


Področja uporabe

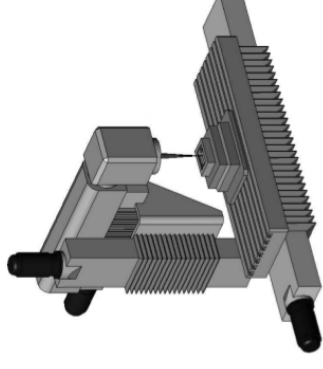
- Odvzemanje z uparjanjem oz. sublimacijo:
 - Prebijanje
 - Vrtanje
 - Dolbenje
 - Rezanje
- Odvzemanje s taljenjem:
 - Talino rezanje
 - Oksidacijsko rezanje

Vrtanje

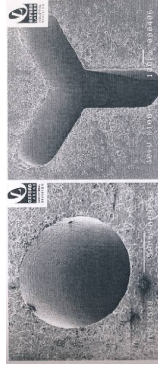
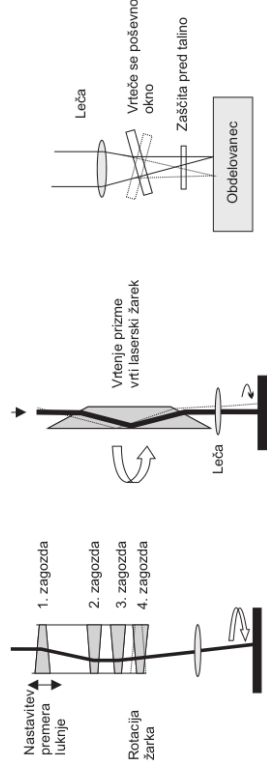
- Enopulzno: luknja je končana v enem pulzu
- Dvopulzno: dva zaporedna pulza – boljša interakcija s plazmo
- Udarno vrtanje – več zaporednih pulzov
- Izrezovalno rezanje – vrtenje žarka po obodu luknje
- Spiralno vrtanje



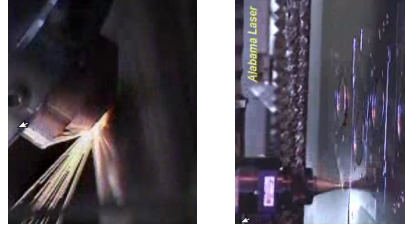
Dolbenje



Izrezovalno vrtanje



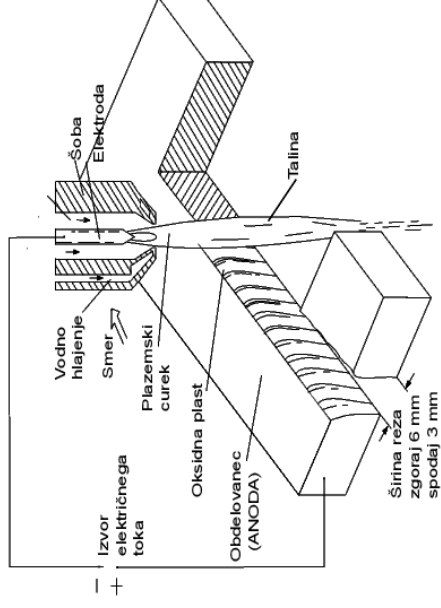
Primeri rezanja



Alternativne tehnologije

Plazemsko rezanje

Shema plazemskega rezanja



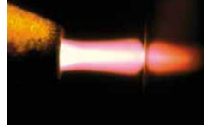
Uvod

- Plazemsko rezanje (PAC – Plasma Arc Cutting) je elektrotermični postopek.
- Plazma je četrto agregatno stanje snovi (trdno – tekoče – plinasto – plazma)
- Plazma je električno prevoden ioniziran plin.

Umetne plazme	Plazme zemeljskega izvora	Vesoljske in astrofizikalne plazme in izvori
Plazemski zasloni Flouroscentne luči Neonski napisi Varilski oblak Fuzija	Plamen Strele med nevihtro Strele v obliki žoge Ionosfera (polarni sij)	Zvezde in jedra Nuklearna fuzija Sončni veter Vesoljski prostor

Plazemski oblak

- Vnos energije v material poteka skozi električni oblak.
- Oblak je disociiran in ioniziran steber plinov, po katerem teče električni tok.
- Oblak se razlikuje glede na vrsto plina in tip gorilnika.
- V področju oblaka so zelo visoke temperature več kot 30.000 K.
- Za nastanek plazme potrebujemo energijo, da elektron ločimo od atoma.



navaden oblak

vodni vortex



Hydefinition oblak

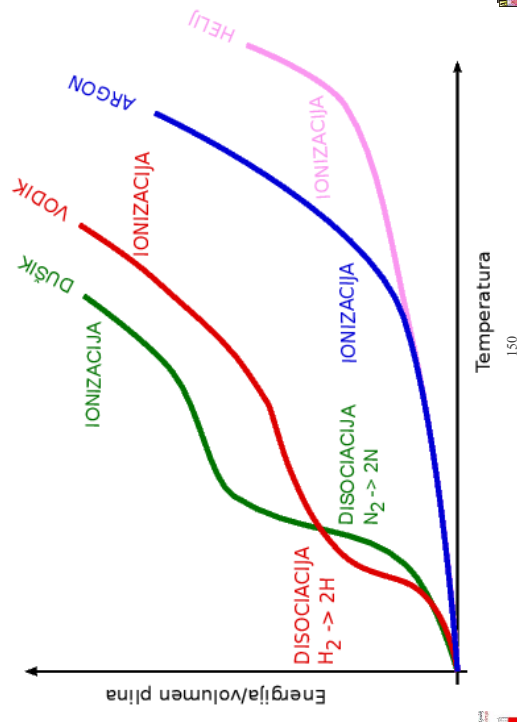


Zgodovina plazemske tehnologije

- 1950 TIG varjenje
- 1957 Klasično plazemsko rezanje
- 1963 Uporaba dveh plinov: rezalnega in zaščitnega
- 1963 Uporaba zraka kot rezalnega plina
- 1965 Rezanje v vodni zavesi
- 1968 Rezanje z vbrzgovanjem vode
- 1977 Rezanje v vodi
- 1990 Visoko natančno plazemsko rezanje (hyperplasma)

148

Disociacija in ionizacija



Princip odnašanja

- Vnos energije preko električnega obloka
- Povišanje temperature zaradi:
 - velike površinske gostote energije zaradi stisnjene obloka
 - velike električne prevodnosti ioniziranih plinov
 - visoke hitrosti ionov
 - pojava rekombinacije (ponovnega združevanja elektronov in ionov)
- Na površini prihaja do taljenja, uparjanja in izgoravanja

Proces	Primer	Energija
Disociacija	$H_2 \rightarrow H + H$	črpanje energije, oblok še ni nastal
Ionizacija	$H \rightarrow p^+ + e^-$	črpanje energije iz obloka
Rekombinacija	$p^+ + e^- \rightarrow H$	oddajanje energije na površini obdelovanca

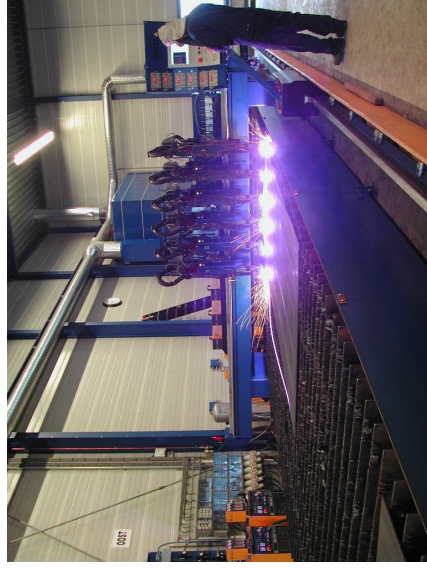
149

Stroj za plazemsko rezanje

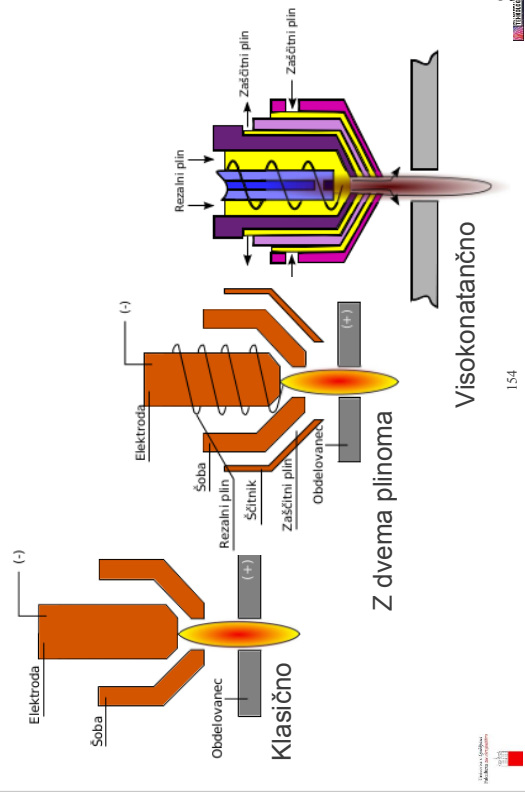


151

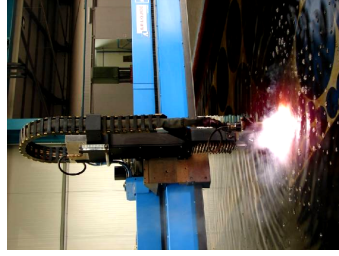
Stroj za plazemsko rezanje



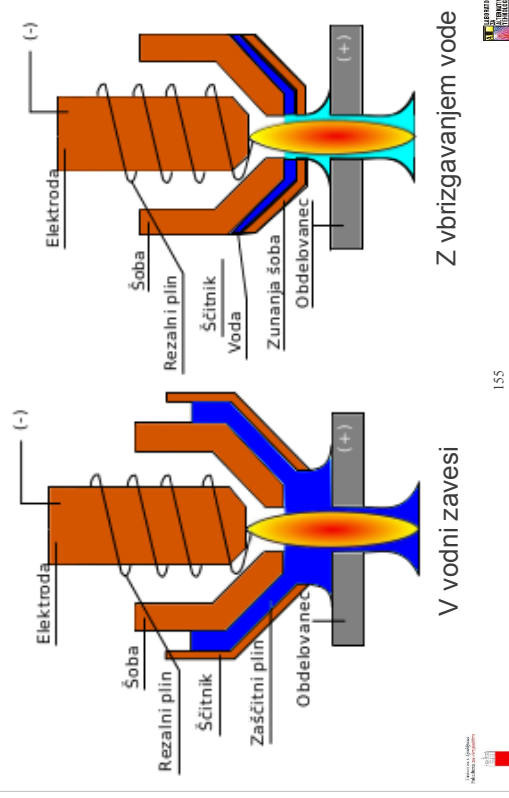
Načini rezanja s plazmo



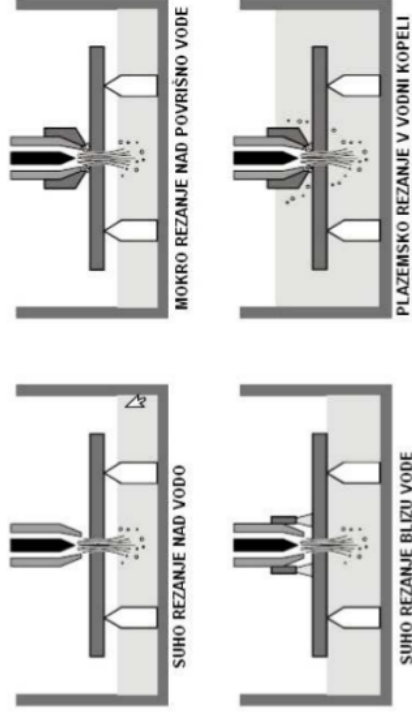
Stroj za plazemsko rezanje v vodi



Načini rezanja s plazmo



Suho rezanje in rezanje pod vodo



156



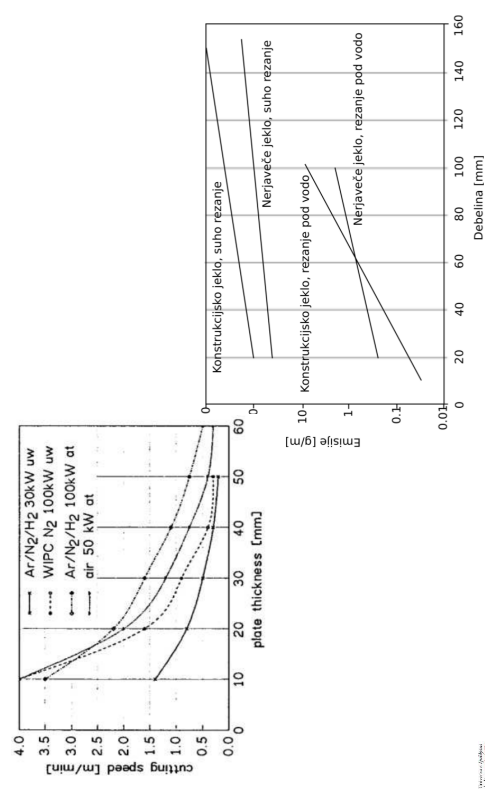
Rezalni plini

- Zrak: poceni, nitracija in oksidacija, konstrukcijska jekla
- Kisik: drag, agresivnost do šobe, konstrukcijska jekla
- Dušik: najpogosteje uporabljen plin za rezanje barvnih kovin in nerjavčevega jekla
- Argon in helij: cenovno zelo neugodna, vendar se ju pogosto uporablja za kvalitete reze
- Vodik: nikoli samostojno, vedno v mešanici. 35 % vodik, 65 % argon za rezanje barvnih kovin s 1000 A do debeline 150 mm.

158



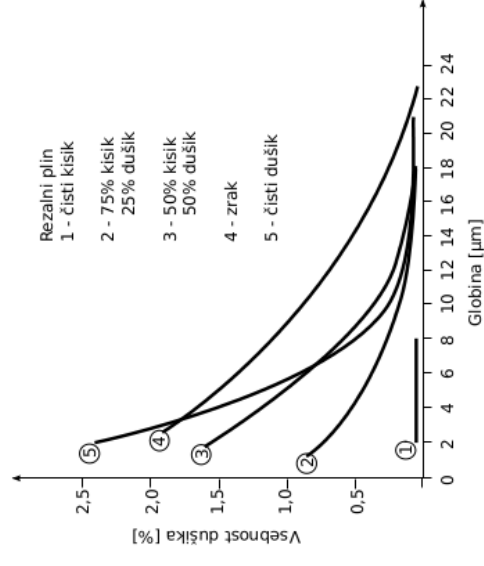
Suho rezanje in rezanje pod vodo



157



Globina vsebnosti dušika glede na rezalni plin



159



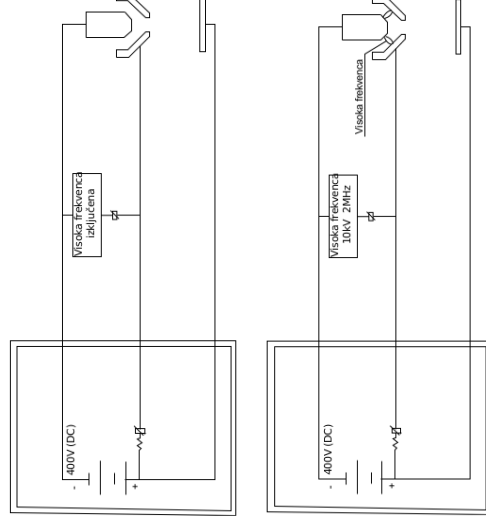
Kombinacije rezalnega in zaščitnega plina

Rezalni / zaščitni plin	Konstruktcijsko jeklo	Nerjavno jeklo	Aluminij
Zrak / zrak	Dobra kvaliteta in hitrost rezanja, ekonomično rezanje	Dobra kvaliteta in hitrost rezanja, ekonomično rezanje	Dobra kvaliteta in hitrost rezanja, ekonomično rezanje
Kisik / zrak	Odljučna kvaliteta in hitrost rezanja	Ni priporočljivo	Ni priporočljivo
Dušik / ogljikov dioksid	Sprejemljiva kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent	Dobra kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent	Odljučna kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent
Dušik / zrak	Sprejemljiva kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent	Dobra kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent	Dobra kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent
Dušik / voda	Sprejemljiva kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent	Odljučna kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent	Odljučna kvaliteta reza, odlična življenjska doba komponent
Argon+vodik / dušik	Ni priporočljivo	Odljučno za debeline nad 10 mm	Odljučno za debeline nad 10 mm

160



Vzpostavitev plazemskega obloka – 1. korak



162



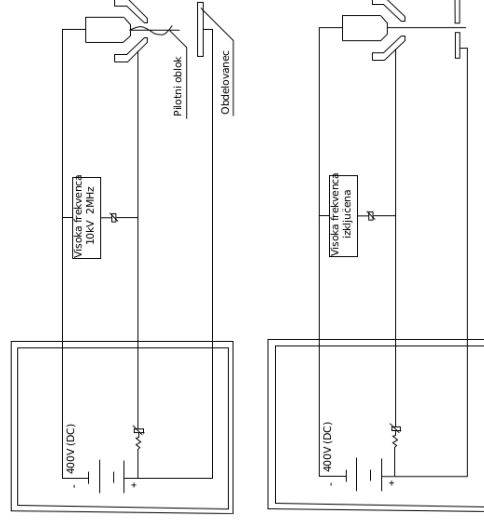
Izbira plina glede na material obdelovanca

Material in debelina	Rezalni plin	Zaščitni plin	Značilnosti obdelave
Konstruktcijsko jeklo od 0.5 to 8 mm	Kisik	Kisik, kisik+dušik, dušik	Pravokotnost reza primerljiva z laserski rezanjem, gladek rez brez srha
Konstruktcijsko jeklo od 4 to 50 mm	Kisik	Kisik, kisik+dušik, dušik	Pravokotnost reza primerljiva z laserski rezanjem do debeline 25 mm, gladek rez brez srha do debeline 20 mm
Visokolegirano jeklo od 1 to 6 mm	Dušik	Dušik, dušik+vodik	Slaba pravokotnost reza, gladek rez brez srha
Visokolegirano jeklo od 5 to 45 mm	Argon+vodik+dušik	Dušik, dušik+vodik	Slaba pravokotnost reza, gladek rez brez srha do debeline 20 mm
Aluminij od 1 to 6 mm	Zrak	Dušik, dušik+vodik	Skoraj pravokoten rez brez srha (AlMg3), mat površina
Aluminij od 5 to 40 mm	Argon+vodik, dušik	Dušik, dušik+vodik	Skoraj pravokoten rez brez srha do debeline 20 mm, mat površina

161



Vzpostavitev plazemskega obloka – 2. korak



163

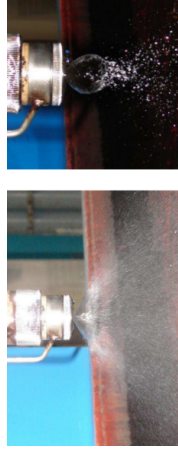


Obraba elektrode



Obdelovalni parametri

- Hidrostatični tlak vodnega stožca (1 bar)
 - premajhen tlak → razpršen oblok
 - prevelik tlak → preveč stisnjen oblok, konkaven rez (B) v zavojih pri rezanju večjih debelin



- Hlajenje elektrode v rezalni glavi
- Električna prevodnost vode (0 do 10 S/cm)

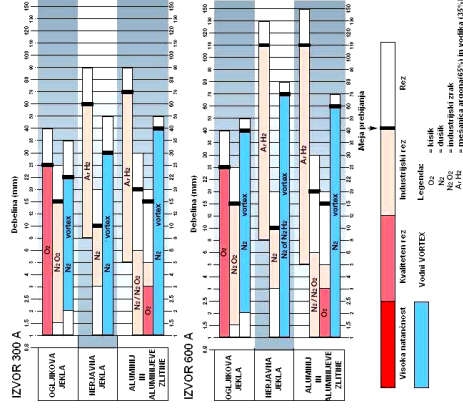
Obdelovalni parametri

- Električni tok: od 90 do 300 A (tudi 600 in 1000 A)
- Električna napetost: spreminjamo pri prehodih in izdelavi ostrih oblik, prebijanju
- Razdalja med šobo in obdelovancem: vpliva na moč rezanja → spodjedanje
- Hitrost rezanja:
 - premajhna hitrost → konvexen rez
 - prevelika hitrost → poševen rez, sprijemanje na rešetke
- Tlak plinov usklajen z električnim tokom:
 - prevelik tlak → odpihne oblok
 - premajhen tlak → ne potisne bloka skozi šobo



Električna moč in debelina rezanja

- Industrijski rezalniki na trgu režejo debeline od 0,4 do 140 mm.
- Učinkovitost rezanja je pogojena z močjo izvora in tipom gorilnika.
- Ekonomsko konkurenčno področje za plazmo je med 10 in 50 mm.
- Pri debelinah do 5 mm so določene vrste plazemskega rezanja konkurenčne laserju.
- Rezanje s plazmo nad 30 mm nerjavnega jekla nima konkurence.



Značilnosti obdelave

- Režemo predvsem elektroprovodne materiale. Možno je tudi neprovodne ob neprecesnem obloku.
- Velike hitrosti rezanja, posebno pri tankih pločevinah.
- Posledica velike koncentracije energije plazemskega obloka so majhne deformacije obdelovanca pri rezanju.
- Relativno majhni stroški pri uporabi cenenih plinov (zrak, dušik).

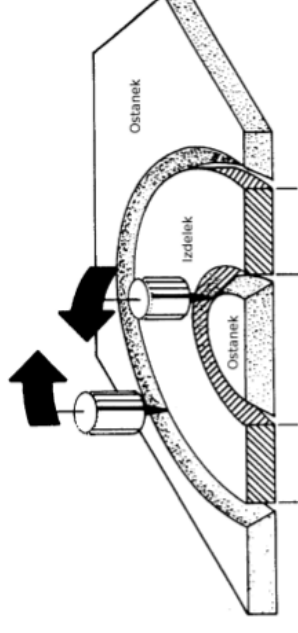


168



Rezalni kot

- Vrtinčenje plazme – neenakomerno razporejena energija – smer rezanja pomembna – zaradi razlike v kotu reza.

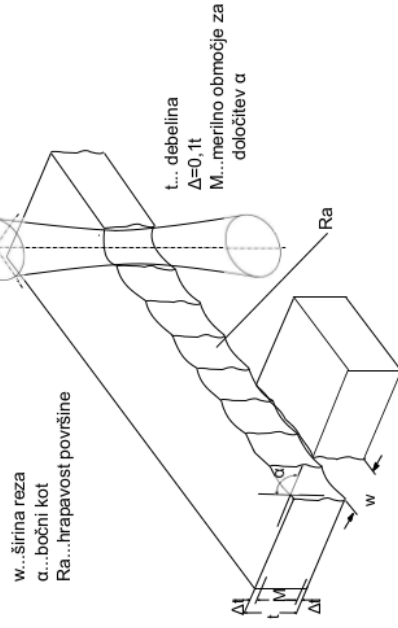


170



Kakovost plazemskega reza

Plazemski žarek



169



Širina reza

Tehnika rezanja	Debelina pločevine	Širina reza
Rezanje v vodi z argonom in dušikom	1–5 mm	do 2 mm
Rezanje v vodi z argonom in dušikom	5–10 mm	do 3,5 mm
Rezanje v vodi z argonom in dušikom	10–20 mm	do 5 mm
Rezanje v vodi z argonom in dušikom	20–30 mm	do 6,5 mm
Suho rezanje z argonom in vodikom	30–40 mm	do 7 mm
Suho rezanje z argonom in vodikom	40–60 mm	do 8 mm



171



Strije



- Tipičen potek strij pri rezanju z dušikom in argonom v vodni zavesi
- V zgornjem delu je zaostajanje plazemskega curka
- Nabira se talina, ki intenzivira odnašanje → strije bolj ravne
- Talina oddaja energijo, zato postajajo strije spet bolj zakrivljene

Področja uporabe

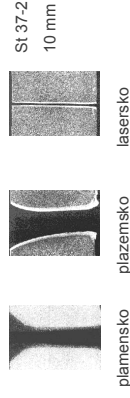
- Grob razrez kovinskih materialov
- Strojegradnja
- Tlačne posode
- Ladjedelnštvo
- Razrez odsluženih jedrskih reaktorjev
- Gradnja naftnih ploščadi

Toplotno vplivano področje

- Sestavljeno je iz pretaljenega sloja ter prekajenega in popušanega sloja materiala
- Podvodno rezanje zmanjšuje vnos toplote izven reza, kar omogoča tudi manjše deformacije tanjših in daljših kosov

Konstruktivsko jeklo St 52 debeline 3,5 mm

Režalni postopek	TPP mm ² /min	Silna reza mm ² /min
Avtoq. plamen. rezanje	3,2	1
Rezanje s plazmo	0,25	1,5
Rezanje z laserjem	0,06	0,2



Rezanje stranice avtomobila (VW "Caddy")

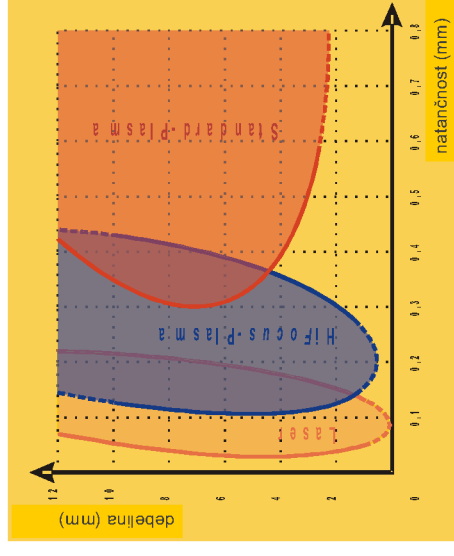


- Visokoprecizna plazma
- Robotska aplikacija

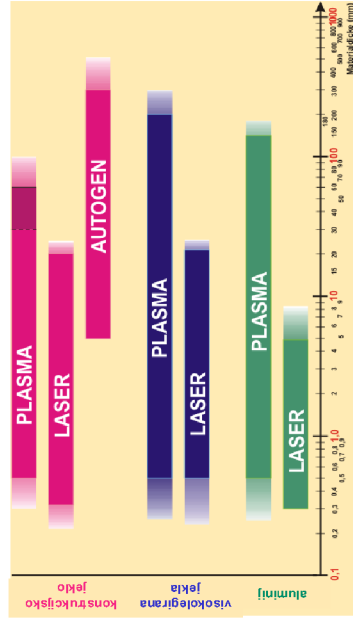
Plazemska tehnologija – izdelki



Primerjava laser - plazma



Področje uporabe termičnih in elektrotermičnih postopkov rezanja



Primeri plazemskega rezanja



Alternativne tehnologije

Plamensko rezanje

180



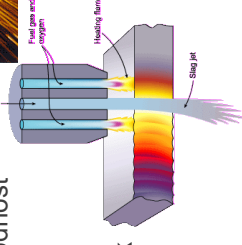
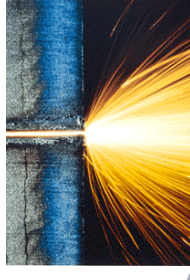
Plamensko rezanje

Zahteve za obdelovanec:

- $T_{\text{vnetišča}} < T_{\text{tališča}}$
- $T_{\text{tališča oksidov}} < T_{\text{tališča}}$
- Nizka toplotna prevodnost

Plini:

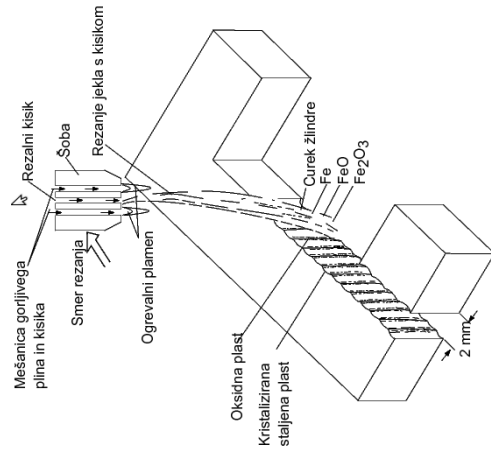
- acetylen + kisik
- propan-butan + kisik



182



Shema plamenskega rezanja



181



Princip odhašanja

- V jedru (**primarni plamen**) prihaja do oksidacije gorilnega plina. Za acetylen:

$$2C_2H_2 + 2O_2 \rightarrow 4CO + 2H_2$$
- V zunanjem delu (**sekundarni plamen**) se plamen „napaja“ s kisikom iz okoliškega zraka:

$$4CO + 2H_2 + 3O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$$
- Najtoplejša točka je na konici primarnega plamena
- Obdelovanec na mestu reza oksidira, s tem nastaja dodatna toplota, ki povzroča taljenje.

183



Gorilni plini

Gorilni plin	Temperatura plamena [°C]	Razmerje kisik:plin	Toplotna gostota plamena [kJ/m ³]	
			primarni	sekundarni
Acetilen	3.160	1,2 : 1	18.890	35.883
Propan	2.810	4,3 : 1	10.433	85.325
Propilen	2.872	3,7 : 1	16.000	72.000
Vodik	2.834	0,4 : 1	-	-
Naravni plin	2.770	1,8 : 1	14.900	35.770

Alternativne tehnologije

Primerjava konturnih postopkov rezanja

Primeri rezanja



Rezanje 600 mm debele pločevine



Primerjava plazemskega rezanja s plamenskim in laserskim rezanjem

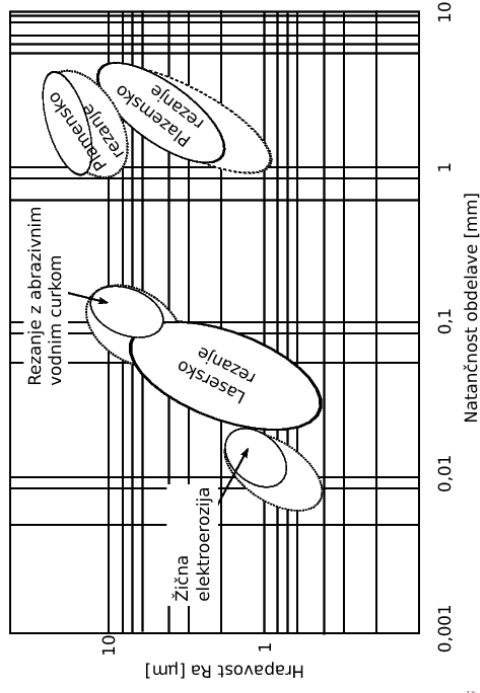
V primerjavi s plamenskim rezanjem

- Rezanje s plamenom je omejeno predvsem na konstrukcijska jekla.
- Plamensko rezanje povzroča večji vnos toplote kot pri plazmi
- Potrebno je predgrevanje
- Naprava za plazemsko rezanje je investicijsko in obratovnalno dražja

V primerjavi z laserskim rezanjem

- Primerljiva kvaliteta rezanja
- Vrsta jekla ne vpliva znatno na rezanje s plazmo.
- Plazma ne potrebuje znatne predpriprave (pločevina je lahko umazana/mastna)
- Znatno manjša investicija in delovni stroški
- Investicija delovna miza (1.500 x 3.000 mm)
Laser: 550.000 do 700.000 €
Plazma: 80.000 do 150.000 €

Tehnološka okna



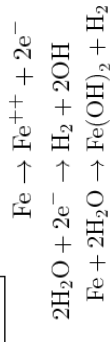
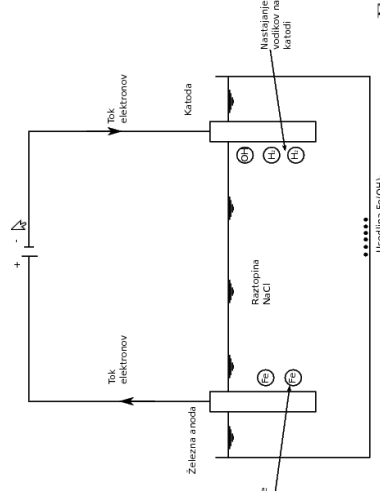
Alternativne tehnologije

Elektrokemijska obdelava

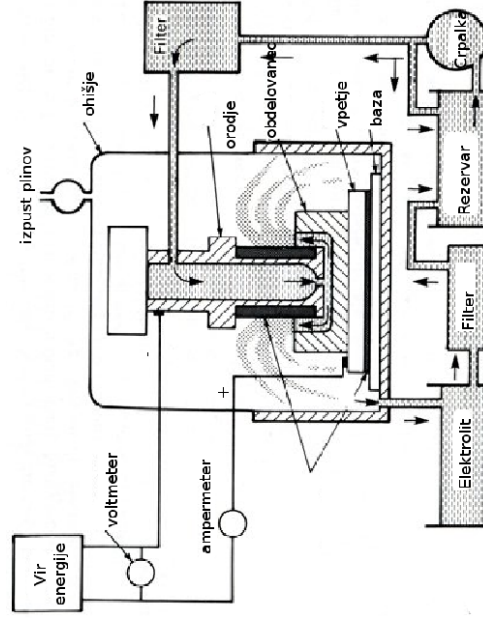
Izbira primerne konturnega postopka rezanja

	Lasersko rezanje	Rezanje z abrazivnim vodnim curkom	Plazemsko rezanje	Žična elektroerozija
Debelina t [mm]	Nizkoogljiva jekla	20	150	150
	Orodna jekla	15	75	150
	Nerjavna jekla	12	50	150
	Aluminij	8	100	150
	Baker	-	100	150
	Najlon	25	-	150
Tolerančni razred IT	Nizkoogljiva jekla	11	16	6
	Orodna jekla	11	16	6
	Nerjavna jekla	11	16	6
	Aluminij	11	16	6
	Baker	11	16	6
	Najlon	11	12	-
Globina toplotno vplivnega področja HAZ [mm]	Nizkoogljiva jekla	0,05 · t	$f < 20 : 0,1 + 0,05 \cdot f$ $f \geq 20 : 0,75 + 0,015 \cdot f$	$f < 20 : 0,3 \cdot f$ $f \geq 20 : 0,6 \cdot f$
	Orodna jekla	0,2 · t	-	$f < 20 : 0,4 \cdot f$ $f \geq 20 : 0,8 \cdot f$
	Nerjavna jekla	0,02 · t	-	$f < 20 : 0,2 \cdot f$ $f \geq 20 : 0,2 \cdot f$
Aluminij	Aluminij	0,02 · t	-	$f < 20 : 0,2 \cdot f$ $f \geq 20 : 0,2 \cdot f$
	Baker	-	-	$f < 20 : 0,2 \cdot f$ $f \geq 20 : 0,2 \cdot f$
	Najlon	0	-	$f < 20 : 0,2 \cdot f$ $f \geq 20 : 0,2 \cdot f$
Vezan les	Vezan les	0	-	-
	Vezan les	0	-	-

Elektrolitsko raztapljanje železa



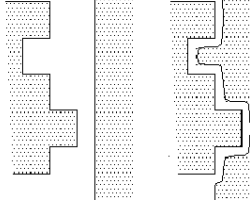
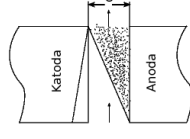
Shema stroja za elektrokemijsko obdelavo



192

Značilnosti obdelave

- Večje odnašanje ob vstopu dielektrika v režo
- Hitrost odnašanja do $16 \text{ cm}^3/\text{min}$
- Hrapavost površine tudi pod $Ra=0,5 \mu\text{m}$
- Ni obrabe elektrode
- Ni toplotno vplivanega področja
- Nenatančna izdelava



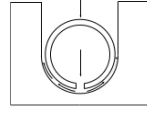
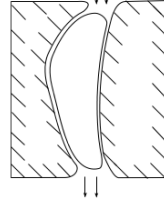
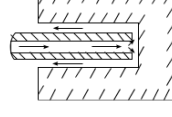
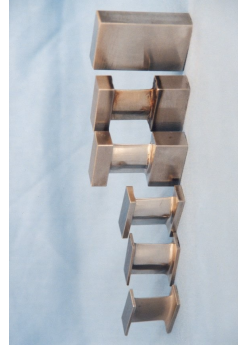
194

Elektrodni materiali

Material elektrode	Cena	Odpornost na iskrenje	Opomba
Baker	srednja	slaba	Nizka uporabnost
Medenina (60Cu-39Zn)	nizka	slaba	Najboljša elektroda za splošno rabo
Bron	srednja	slaba	Dobra
Austenitno jeklo	srednja	dobra	Ko je potrebno preprečiti iskrenje
Sintran volfram-baker	zelo visoka	zelo dobra	Težko obdelovalen
Volfram	zelo visoka	odlična	

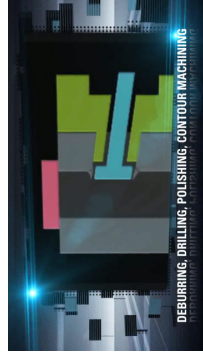
193

Primeri izdelkov

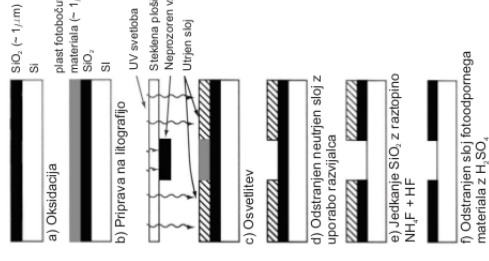


195

Primeri obdelave



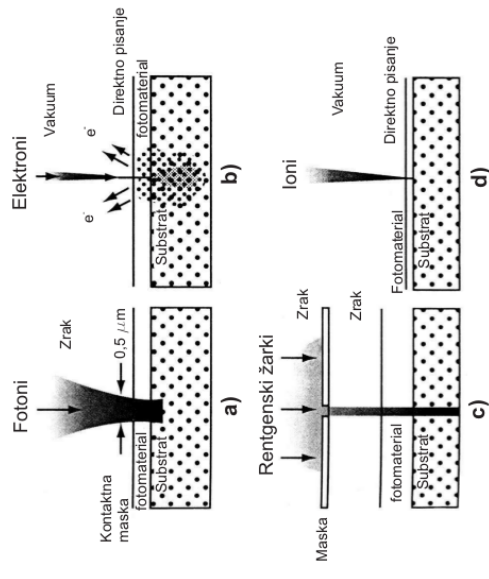
Primer fotolitografije



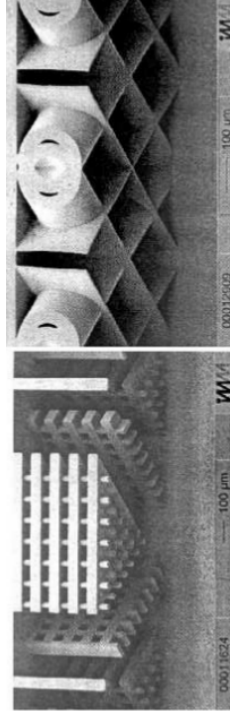
Alternativne tehnologije

Kemijska obdelava

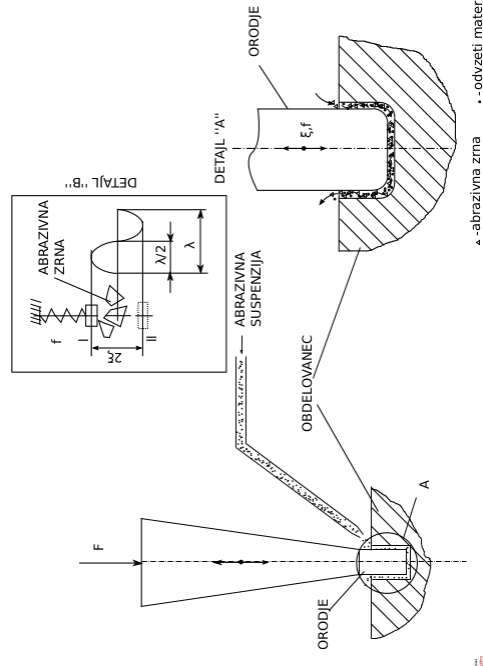
Direktno zapisovanje v fotomaterial



Primeri izdelanih struktur

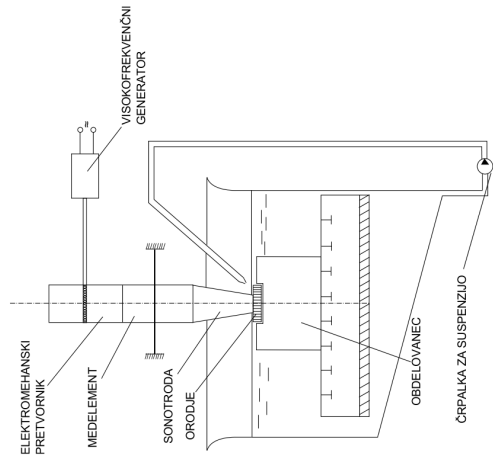


Princip odnašanja



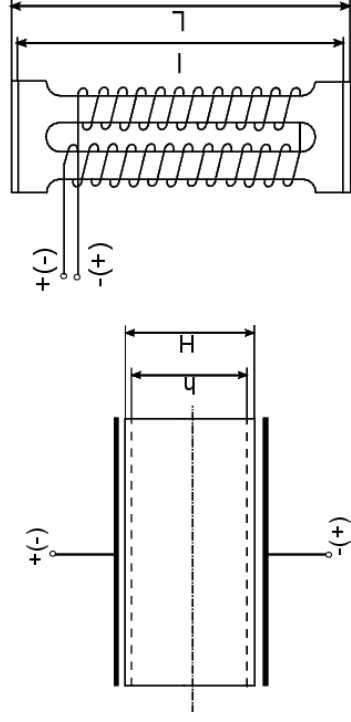
Alternativne tehnologije

Ultrazvočna obdelava

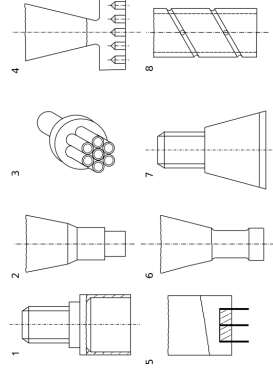


Shema stroja za ultrazvočno obdelavo

Oscilator

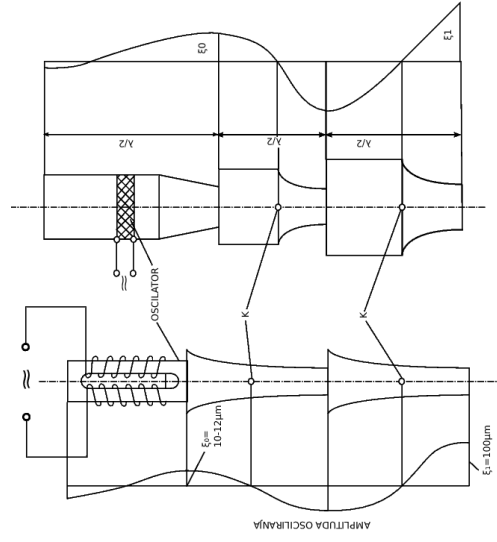


Orodja



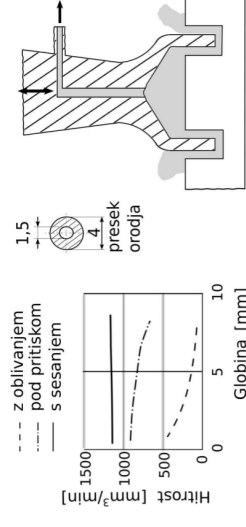
- Orodje: velika elastičnost in žilavost → največkrat konstrukcijsko jeklo
- Obdelovanec: trd in krhek
- Obraba vedno prisotna: čelna in volumska obraba

Ojačevalec



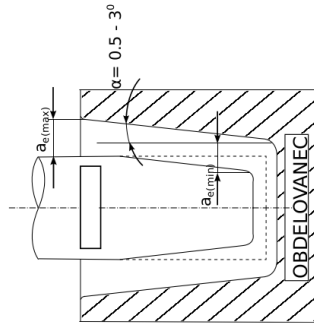
Značilnosti obdelave

- Hitrost obdelave raste z večanjem frekvence in amplitude nihanja ($\xi < 0,1$ mm) ter z večanjem abrazivnih zrn. Optimalno razmerje med amplitudi in velikostjo zrn je $\xi : d_{sr} = 0,6$ do $0,8$. Največje hitrosti se dosega z delci iz borovega karbida. Uporabljajo se tudi silicijev karbid, korund in silicijev oksid, ki so cenejši.



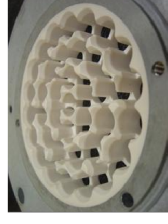
Značilnosti obdelave

- Natančnost obdelave:
 - velikost abrazivnih zm
 - reža
 - obraba orodja
 - prečna nihanja orodja



$$a_e = 1,5 \cdot d_{SR}$$

Uporaba



(a) Zalogovnik za orodja iz keramike



(b) Luknja v kroglji iz silicijevega nitrida



(c) Natančna izdelava lukenj v keramiko



(d) Obsešek iz podpragih kamnov obdelanih z ultrazvočno obdelavo



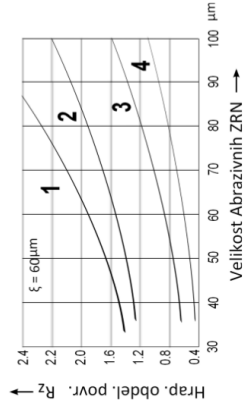
(e) Rezanje živil



(f) Obdelava keramike ležajne

Značilnosti obdelave

- Hrapavost površine:
 - velikost abrazivnih zm
 - amplituda nihanja
 - material obdelovanca



Literatura

- G. Dieter: Engineering Design: A Materials and Processing Approach, McGraw-Hill, 1983.
- K. Sommer: Non-Traditional Machining Handbook, Advanced Publishing, 2000.
- C.L. Caristan: Laser Cutting - Guide for Manufacturing, SME, Dearborn, Michigan, ZDA, 2004.
- E. Paul: Plasma cutting handbook, HPBooks, New York, ZDA, 2011.