

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

Joško Valentinčič in Henri Orbančič

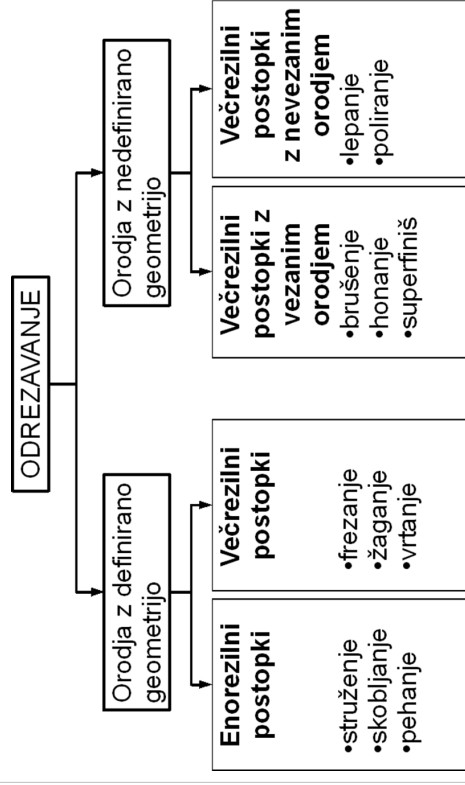
Predmet: Nekonvencionalni procesi

1. letnik II. stopnje RRP programa

Gradivo za predavanja

Ljubljana 2012

Predstavniki konvencionalnih postopkov obdelave



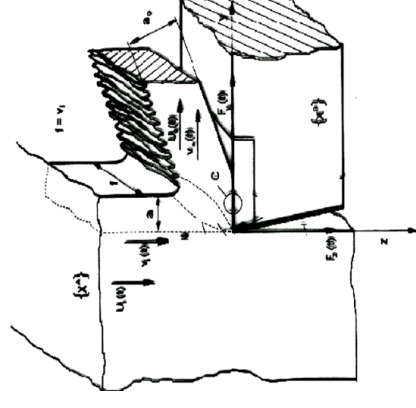
3

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
- Mikroobdelovalni postopki

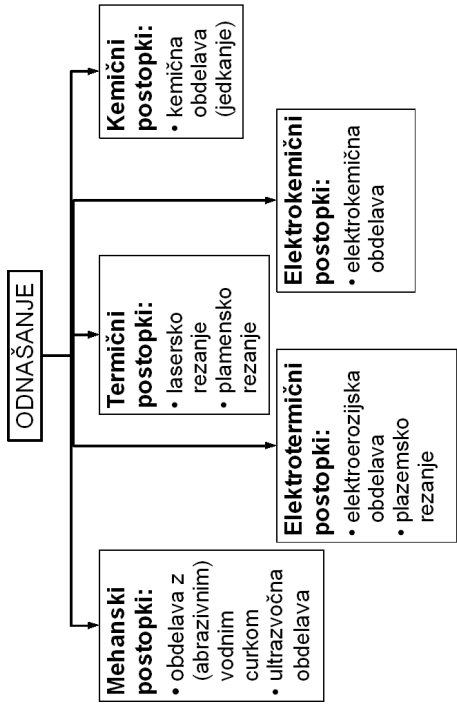
2

Razmere pri odrezavanju



4

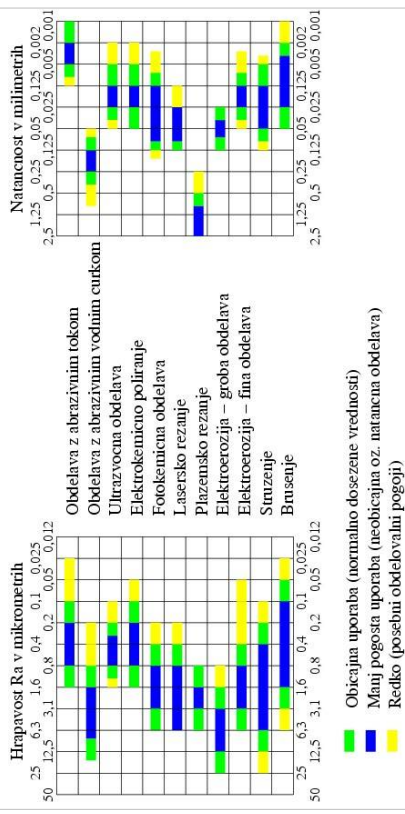
Predstavniki nekonvencionalnih postopkov



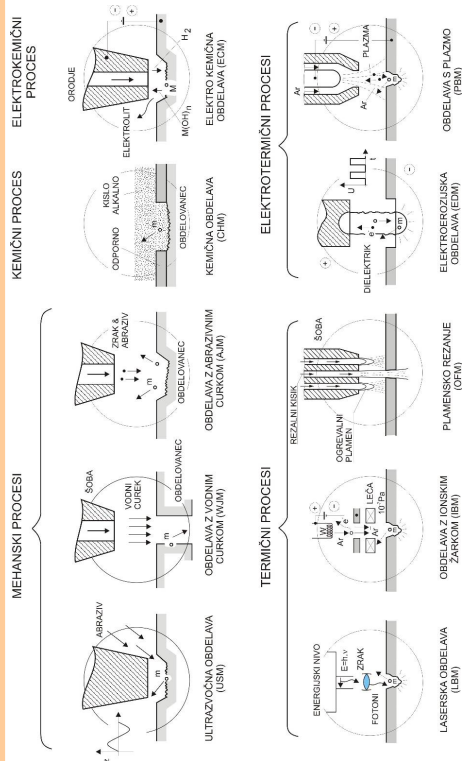
Konvencionalne in nekonvencionalne tehnologije

ORDELOVAL 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 DOSEGATIVA (mm)	PRIMAX. STOPNJI ODVZEMA (mm)	OBČAJNA MOČ STROJA (kW)
Štruženje	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

Dosežena hrapavost površine in natančnost nekaterih obdelovalnih postopkov



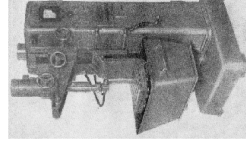
Delitev nekonvencionalnih procesov



Nekonvencionalni procesi

Elektroerozijska obdelava

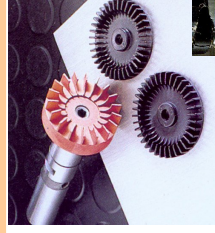
Trendi razvoja potopne elektroerozije



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

Elektroerozijski postopki

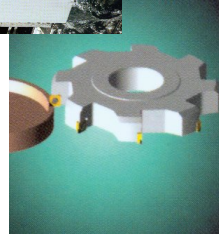
Potopna elektroerozija



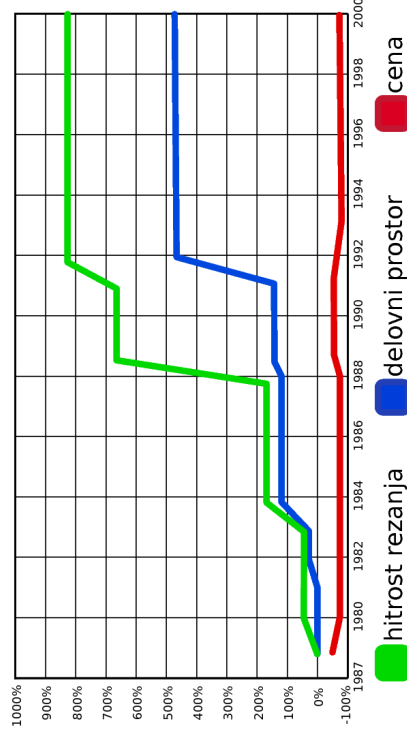
Žična elektroerozija



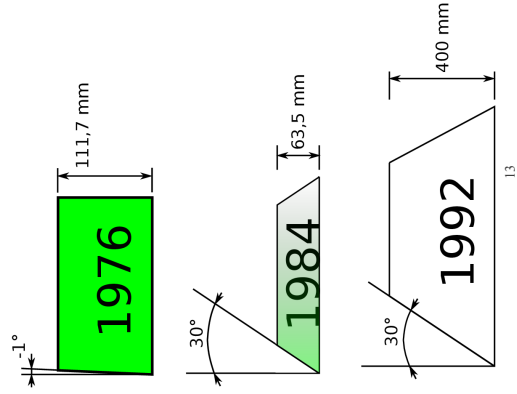
Elektroerozijsko brušenje



Trendi razvoja žične elektroerozije



Trendi razvoja žične elektroerozije

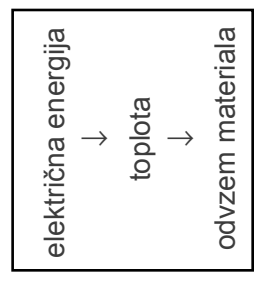


Potek enotnega dogodka

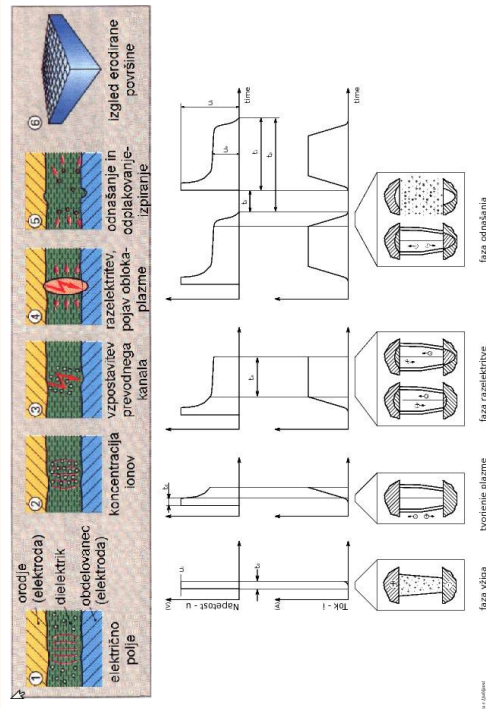
- Inicijacija razelektrove: Plinski mehurčki in delci kovine v dielektriku se formirajo v gručo in tam pride do preboja.
- Ionizacija: V plinskem kanalu se začne ionizacija. Nastane kanal plazme, ki je sestavljen iz toka ionov in elektronov.
- Segrevanje: Tok elektronov in ionov povzroča segrevanje anode in katode.
- Odvzem: Izmet taline iz kraterja

Potek enotnega dogodka

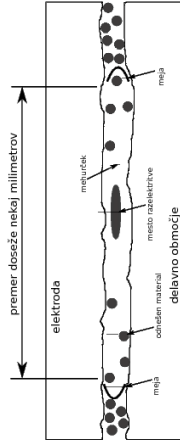
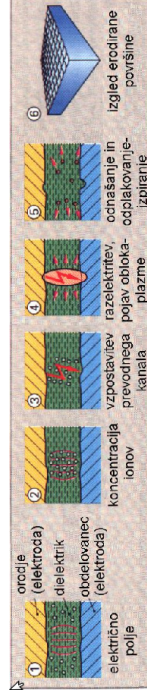
- Električni preboj dielektrika
- Nastanek plazemskega kanala
- Generiranje toplote
- Odvzem materiala



Potek razelektrove

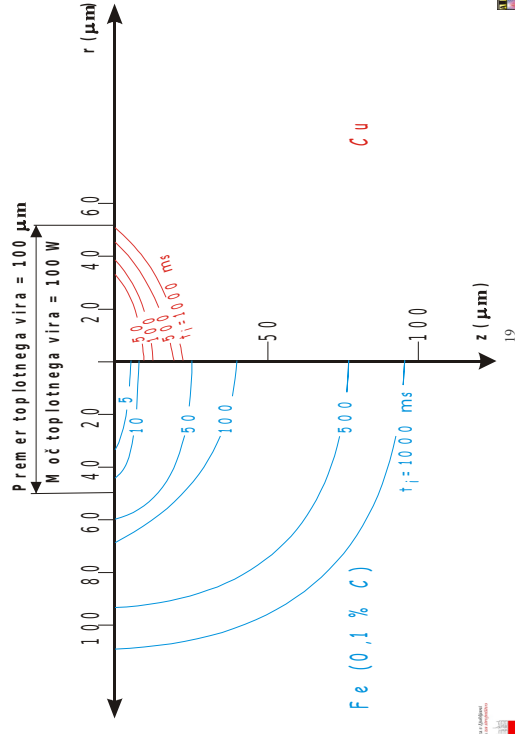


Potek razelektivitve



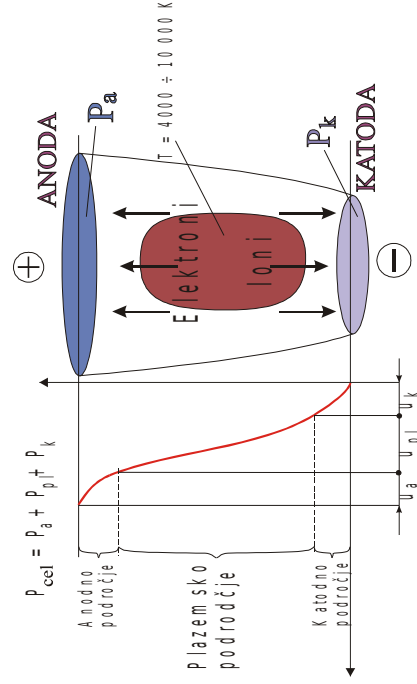
17

Meje taljenja materiala



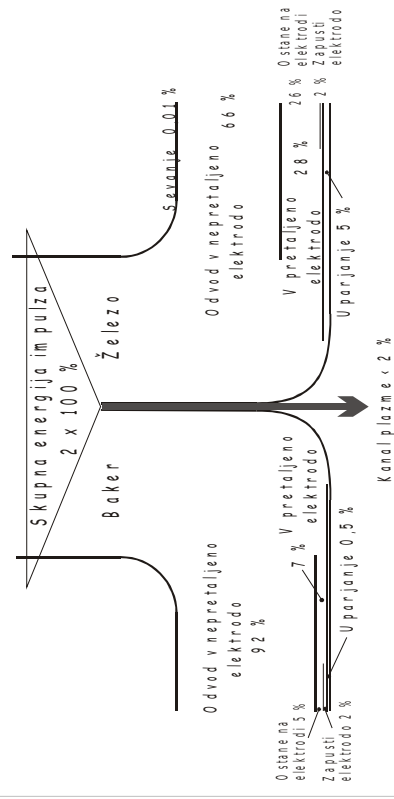
19

Področja razelektivitve



18

Toplotna bilanca razelektivitve



20

Izmet taline s površine

- Elektrostatične sile: gradient električnega polja deluje na električno nabite delce v talini + električno polje v anodi
- Elektromagnetne sile: posledica električnega in magnetnega polja, signifikantna le pri majhnih premerih bazena taline
- Hidravlične sile: ob spremembi tlaka v plinskem mehurčku
- Vrenje taline: padec temperature povzroči padec tlaka ($pV=nRT$) -> vrenje

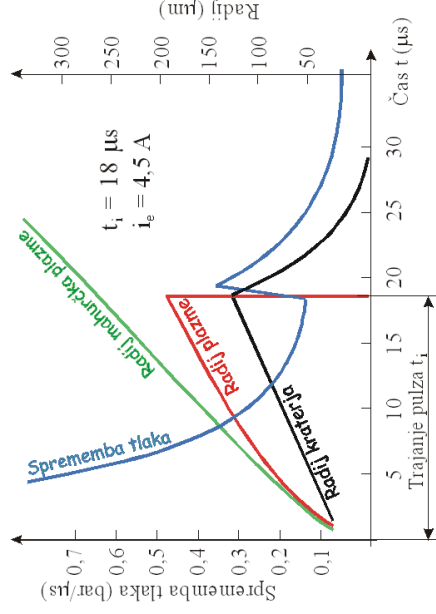
21

Izmet taline

- Na začetku razelektritve:
 - velika gostota toka (elektromagnetne sile) in
 - vrenja pregrete taline (hidrodinamične sile).
- Na koncu razelektritve
 - zaradi vrenja pregrete taline (hidrodinamične sile).

23

Potek spremembe tlaka v plinskem mehurčku



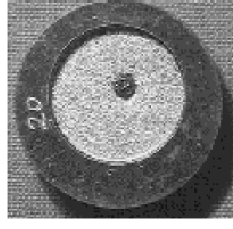
22

Potek razelektritve

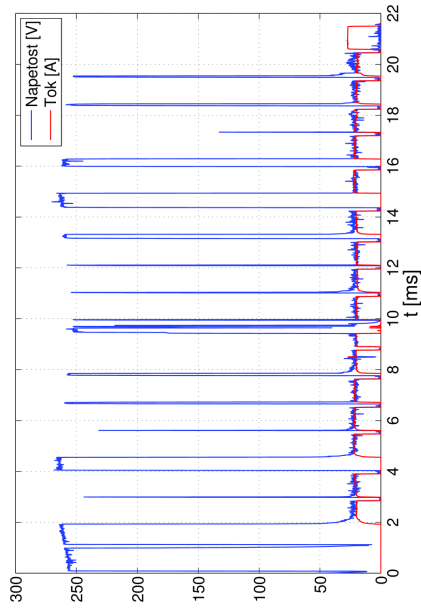


24

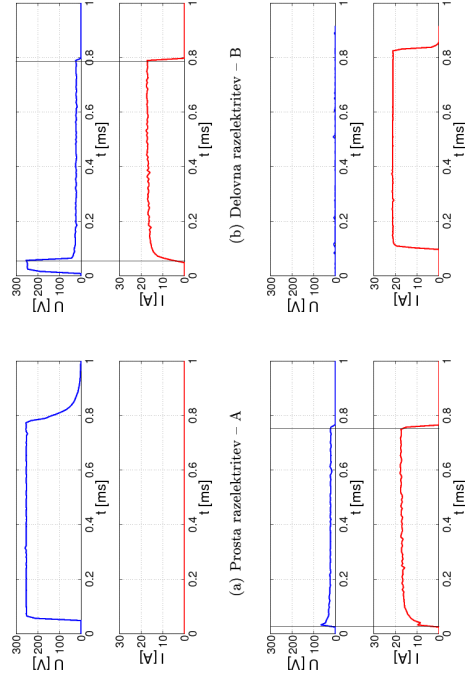
Fina obdelava brez preprečitve obločnih razelektritev



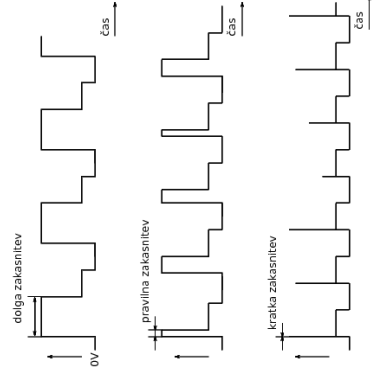
Napetostni in tokovni signal v reži



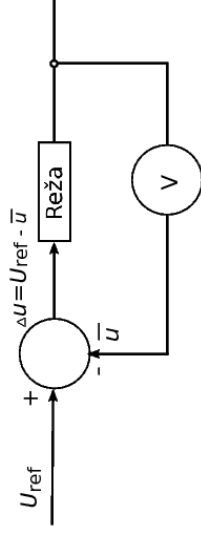
Tipi razelektritev



Krmiljenje velikost reže



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

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

Funkcije dielektrika

- Dielektrik je električno neprevoden medij v katerem se dogajajo kontrolirane električne razelektiritve.
- 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.

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 molekulskih 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.

Potopna elektroerozija

ELKTRODA
DIELEKTRIK
OBDELOVANEČ
GENERATOR

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

33

LABORATORIJ
ZAVRŠNA
TEHNOLOGIJA

Parametri potopne elektroerozije

VHOD

- Obdelovane: material
- Elektrode: material
- Dielektrik: razred, viskoznost
- kromatizirana viskoznost
- dielektričnost
- ...

EDM stroj:

- polariteta
- tok niske napetosti (I_{nisk})
- tok visoke napetosti (I_{visok})
- vsiljena napetost (U_{vsilj})
- čas razbakteritve (t_c)
- čas pavze (t_p)
- referenčna napetost v reži (U_{ref})
- časovni komparator servo sistema (k)
- frekvenca reži (f_r)
- frekvenca pavze (f_p)
- vsiljena odnosa (f_{vsilj})
- vsiljena odnosa (f_{vsilj})

PROCES

Baszere v reži med elektrodo in obdelovancem

Napetostni in tokovni signal v reži:

U

I

IZHOD

Elektrode:

- vmesne obraba
- relativna obraba
- relativna obraba ($\theta = \frac{V}{I \cdot t}$)
- relativna obraba
- rotov ($V_{rel} = \frac{V}{I \cdot t}$)

Obdelovane:

- geometrija
- nastanost
- stanje odvzema
- integriteta površine (V_c , HAZ, mikro razpoke)

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

35

LABORATORIJ
ZAVRŠNA
TEHNOLOGIJA

Primeri obdelave

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

34

LABORATORIJ
ZAVRŠNA
TEHNOLOGIJA

Shema stroja za potopno elektroerozijo

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

36

LABORATORIJ
ZAVRŠNA
TEHNOLOGIJA

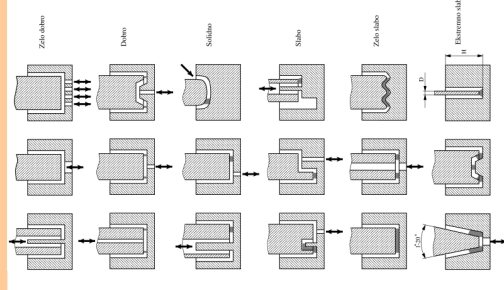
Obdelovalni parametri

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

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

37

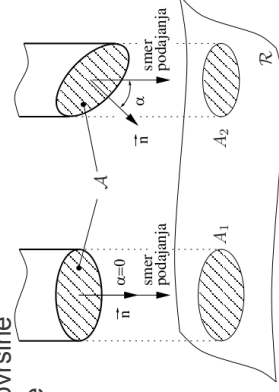
Izpiranje reže



39

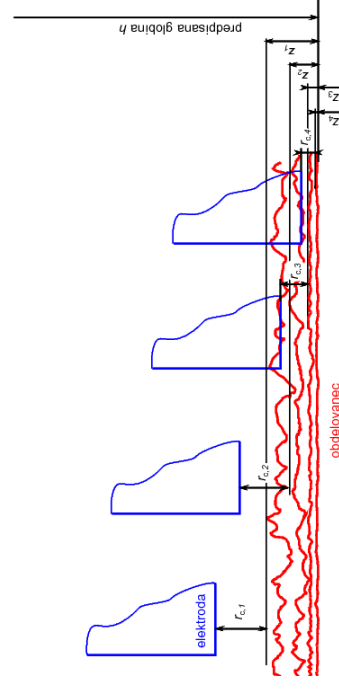
Izbira obdelovalnih parametrov

- Material obdelovanca in elektrode
 - baker – jeklo
 - grafit – jeklo
 - baker – barvne kovine
- Nadalje izbiramo glede na
 - velikost erodirane površine
 - način izpiranja reže
 - obrabo elektrode



38

Prehod od grobe k fini obdelavi



40

Tehnološka tabela

Ingersoll 80P, elektroda: ECu, obdelovanec: jeklo	1	2	3	4	5	6	
Vžigna napetost	180	180	180	140	140	140	
Razelektivni 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_{vc} [mm ³ · min ⁻¹]	0,29	0,55	0,81	2,83	9,26	22,5
Volumeška obraba elektrode	V_e [mm ³ · min ⁻¹]	0,012	0,013	0,022	0,016	0,016	0,009
Relativna obraba robov elektrode	φ_{LC} [-]	0,10	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12
Srednja višina odstopanja neravnin	R_a [μm]	1,7	1,9	2,9	4,4	6,5	9,3
Srednja višina neravnin	R_z [μm]	11,7	14,2	18,2	25,3	33,9	45,4
Največja višina neravnin	R_{max} [μm]	14,9	16,3	22,3	30,9	43,1	70,3
Globina bele plasti	HAZ [μm]	4,5	7,5	9,5	12,8	16,2	27,5
Dodatek za nadaljno obdelavo	z [mm]	0,019	0,02	0,03	0,04	0,06	0,10
Bočna reza	2 · s [mm]	0,03	0,07	0,07	0,16	0,22	0,31

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

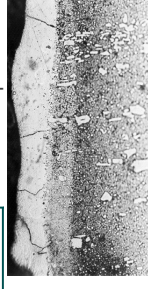
Kriteriji	Baker	Grafit	Opomba
Velikost elektrode	< 10.000 mm ²	> 10.000 mm ²	Gostota bakra je 5 krat večja od gostote grafit. Velika bakrena elektroda je problematična zaradi velikih poveskov, ki so prisotni med obdelavo.
Natančnost izdelave	ujemi H7/h6, toleranca oblike < 7 μm	manjša natančnost v primerjavi 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 hrupavost površine. Bolj finozrnati grafiti kot EDM 3 niso cenovno ugodni.
Zahtevnost izpranja reže	Konveksne in konkavne oblike	Samo konveksne oblike	Z grafitnimi elektrodami je težje zagotoviti stabilnost procesa.
Čas obdelave elektrode	$t_{baker} = (2 \div 3) \cdot t_{grafit}$		Grafit dopušča večje rezalne hitrosti.
Čas erodiranja	$t_{baker} = (1,4 \div 2) \cdot t_{grafit}$		
Strojni park	$n < 10.000$ min ⁻¹ , $v_r < 5.000$ mm/min	$n > 20.000$ min ⁻¹ , $v_r < 5.000$ mm/min	Frezabni stroj mora biti opremljen s sistemom za odsesavanje, ker grafitna zrna delujejo abrazivno na vodila stroja.

Integriteta površine

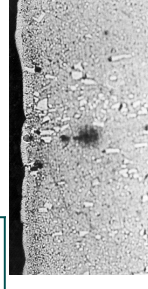


Groba obdelava

500X povečava



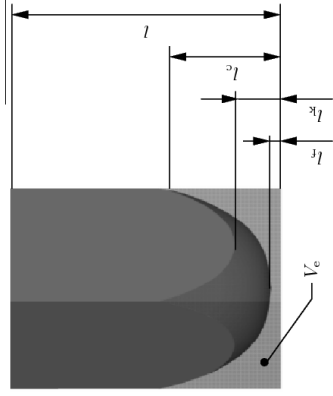
Fina obdelava



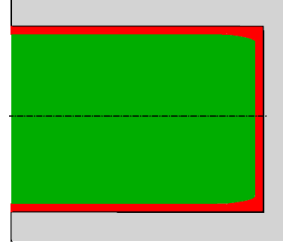
slabo

dobro

Obraba elektrode

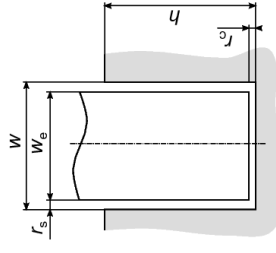


Groba in fina obdelava

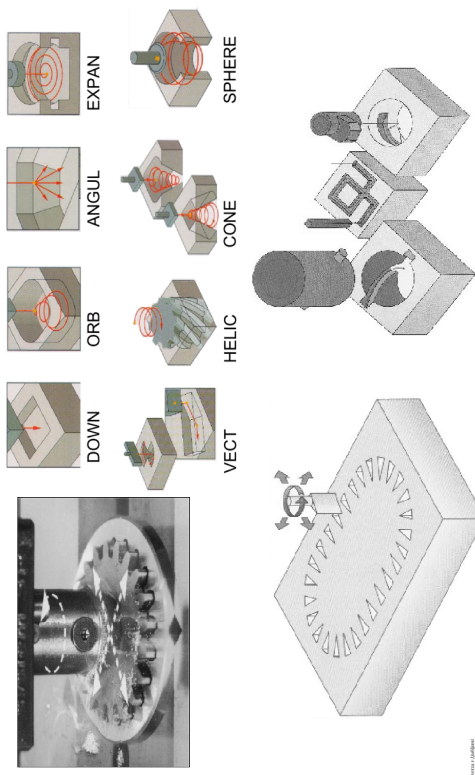


Material, ki ga ocvzame:

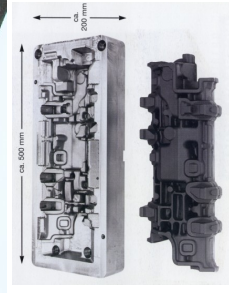
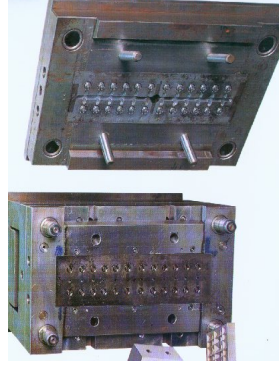
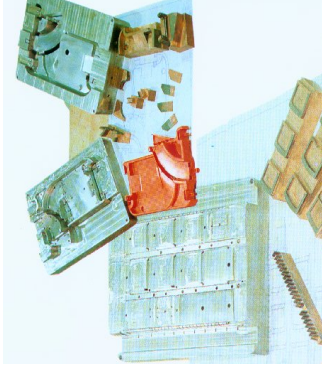
- prva elektroda
- druga elektroda



CNC krmiljeno orbitalno gibanje

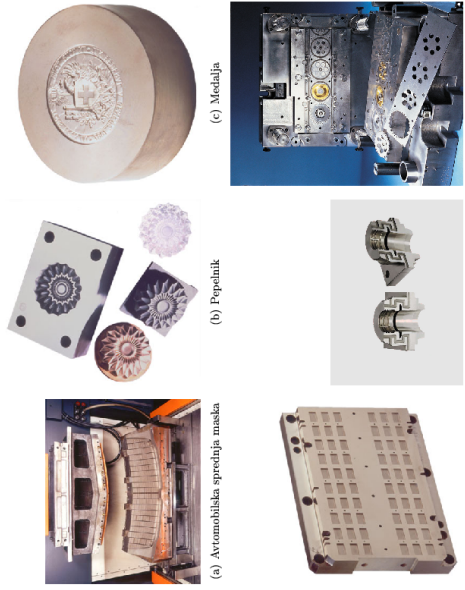


Uporaba potopne elektroerozije

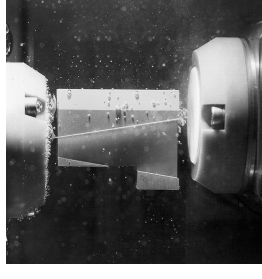
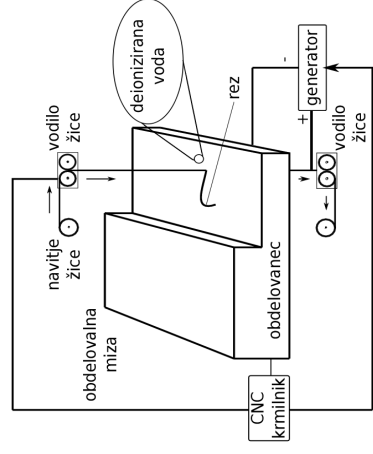


V orodjarstvu sta potopna elektroerozija in visokohitrostno frezanje komplementarna postopka.

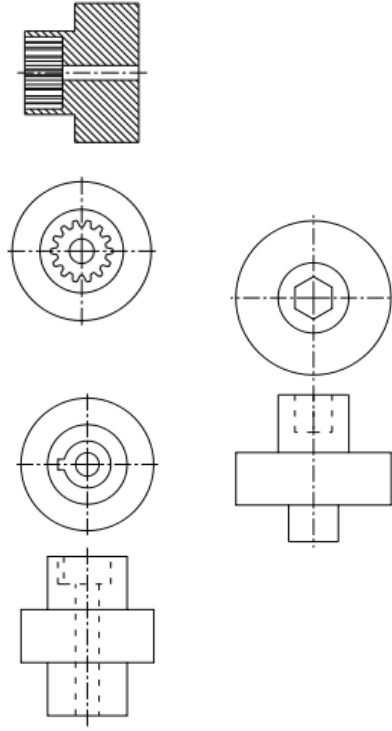
Primeri izdelkov



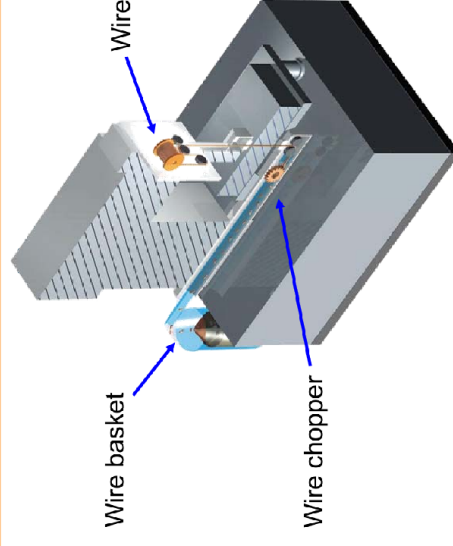
Žična elektroerozija



Primeri obdelav



Žična elektroerozija

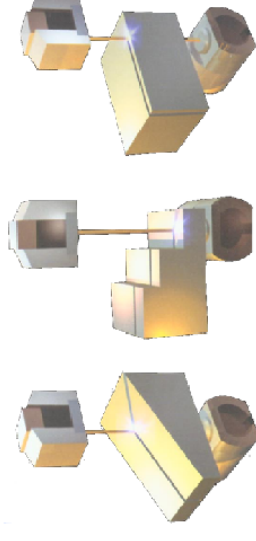


Obdelovalni parametri

- 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

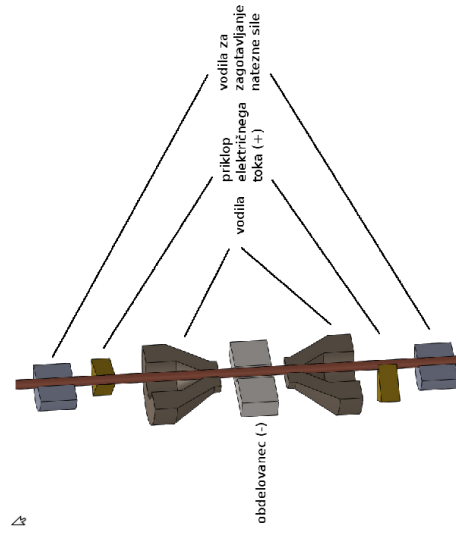
53

Primeri spreminjanja debeline – vpliv na parametre grobega reza



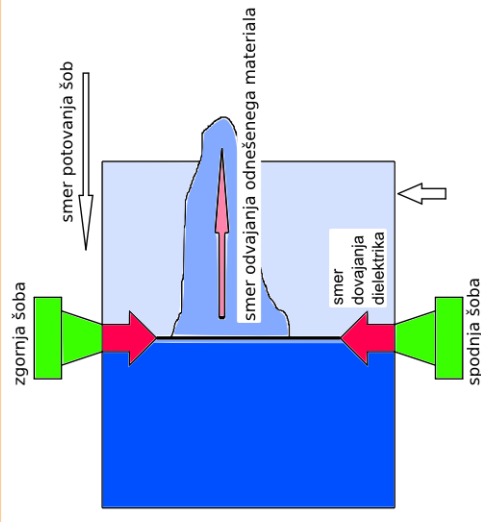
55

Sistem vodenja žice



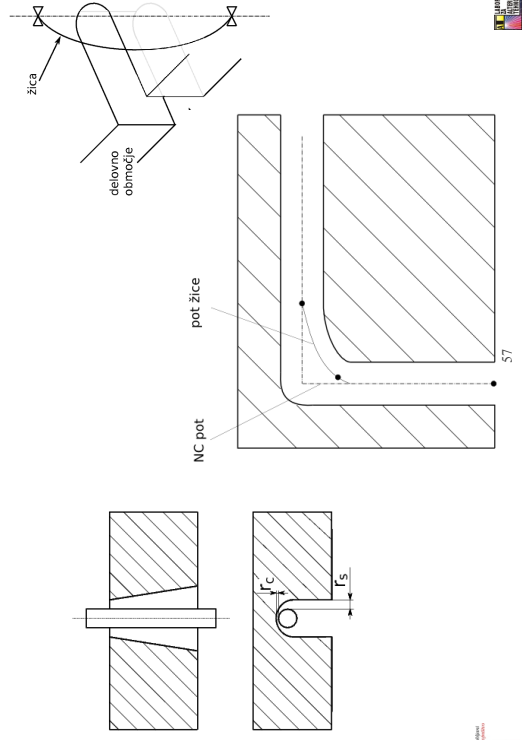
54

Izpiranje reže

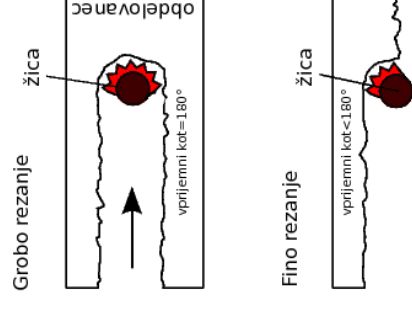


56

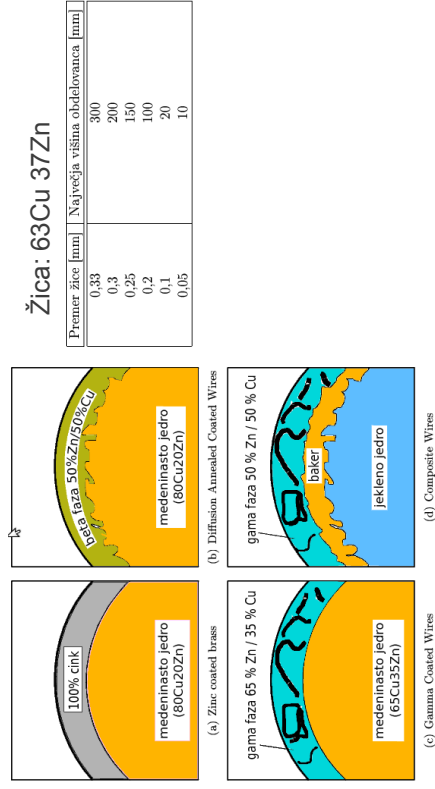
Značilnosti reza



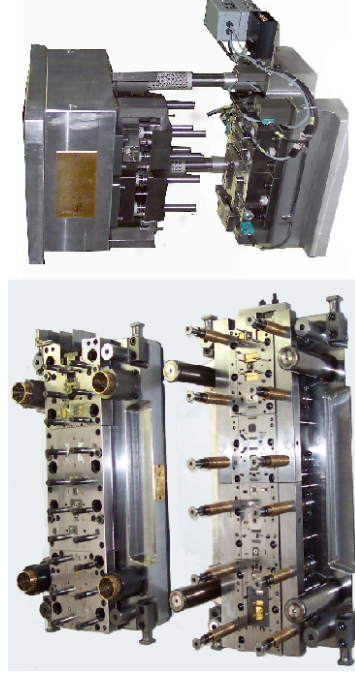
Prehod od grobe k fini obdelavi



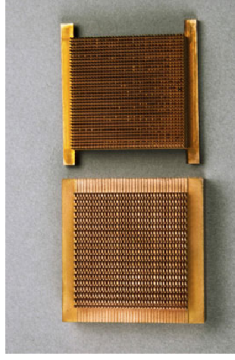
Žica kot orodje



Rezalno orodje (štancanje)



Primeri izdelkov



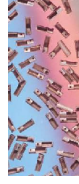
Elektroda za potopno elektroerozijo



Satelitska komponenta



Turbinske lopatice

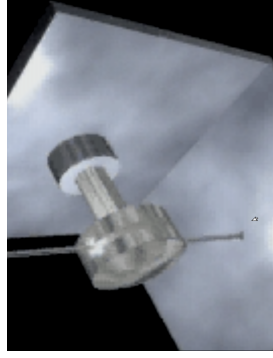


Medicinske komponente

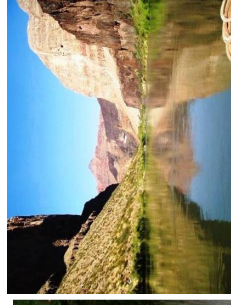
Nekonvencionalni procesi

Vodni in abrazivni vodni curek

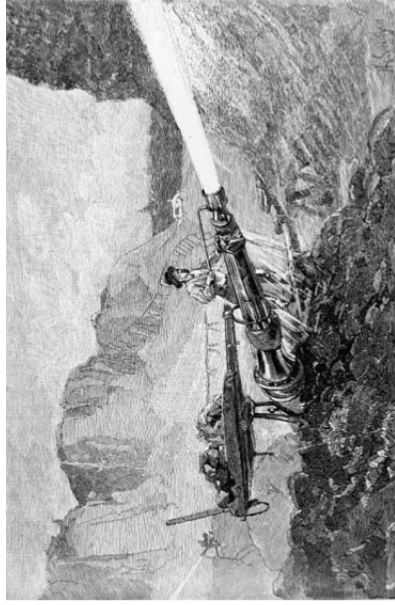
Primeri rezanja z žično elektroerozijo



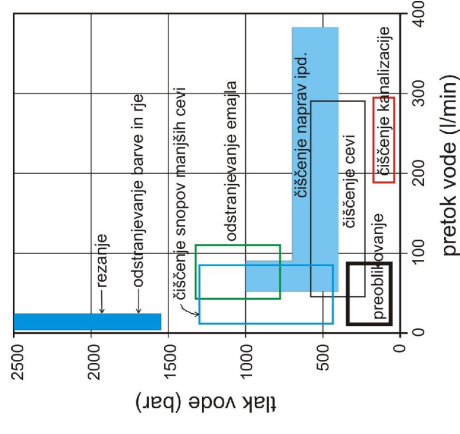
Moč vode v naravi



Verjetno prva uporaba vodnega curka leta 1883



Področja uporabe različnih tlakov in pretokov

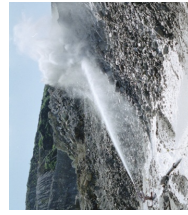


Izkoriščanje vodne energije

- Pridobivanje mehanske energije
- Voda kot orodje



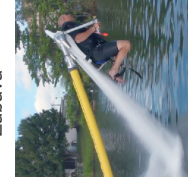
Mlin na Muri



Rudarstvo

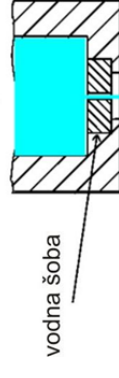


Prisilna sredstva



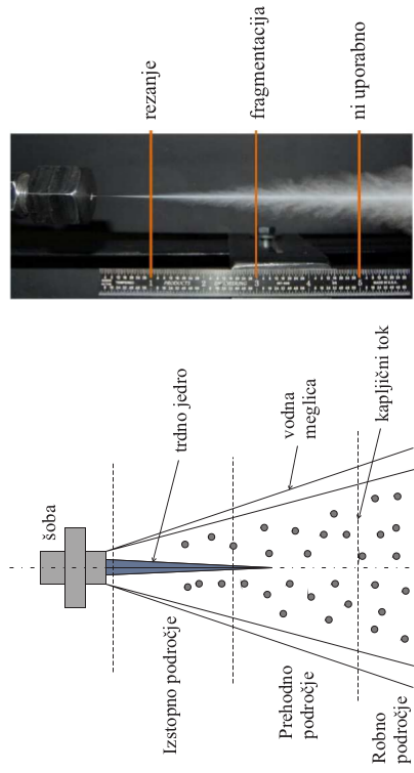
Zabava

Oblikovanje vodnega curka



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

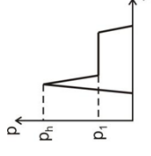
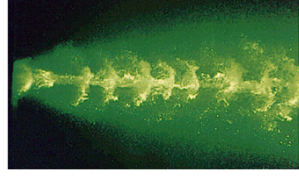
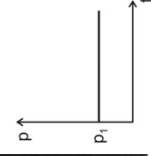
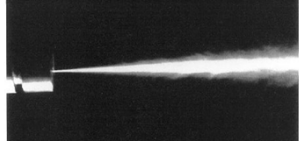
Struktura vodnega curka



69

Kontinuiran ali pulzni curek

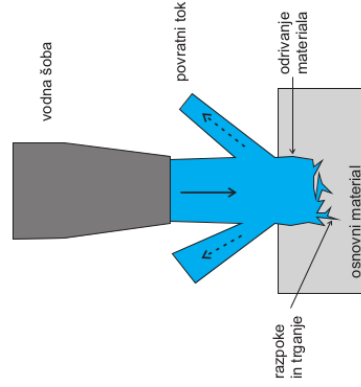
- Kontinuirani curki so bolj natančni, medtem ko imajo pulzni curki večjo udarno moč.
- Izkoriščamo t.i. učinek vodnega kladiiva.



71

Princip odnašanja z vodnim curkom

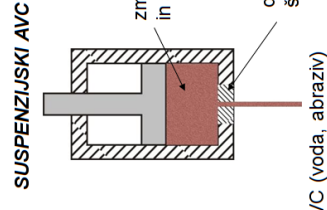
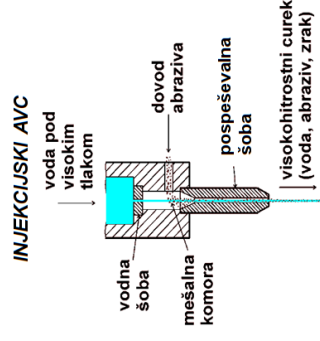
- Odnašanje je omejeno na materiale, ki imajo razpoke, in na mehkejša materiale.
- Poškodbe na materialu nastanejo zaradi:
 - plastične deformacije oz. izrivanja materiala,
 - penetracije vode v razpoke → širjenje razpok, razpoka,
 - trganja.
- Vrste obdelav:
 - Rezanje
 - Fragmentacija



70

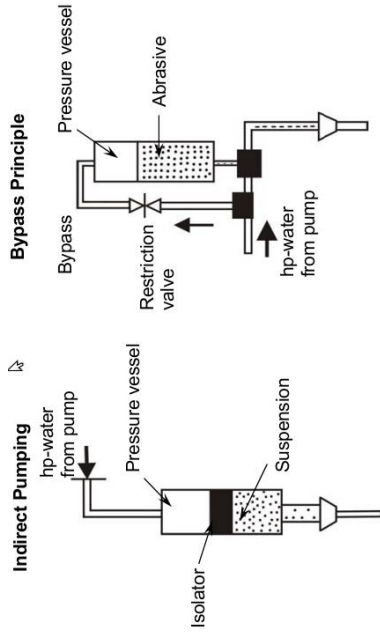
Nastanek abrazivnega vodnega curka

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

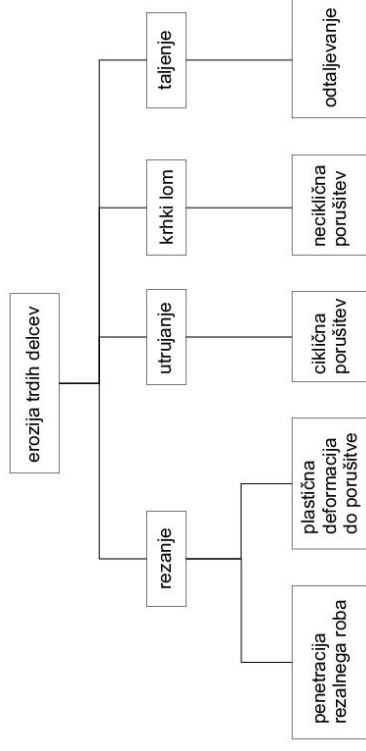


72

Suspenzijski princip oblikovanja visokohitrostnega abrazivnega vodnega curka



Erozija trdih delcev

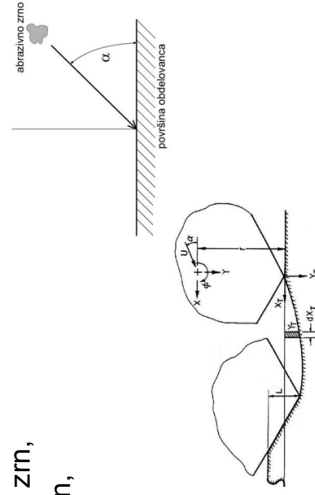
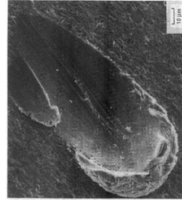


Odnašanje z abrazivnim vodnim curkom

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. Geometrija, asistivna glava:
 - 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 obdelovitosti
2. debelina materiala

KINEMATIKA

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

PROCES

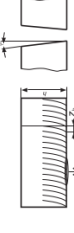
Razmere na rezalni fronti med AVC in obdelovanca



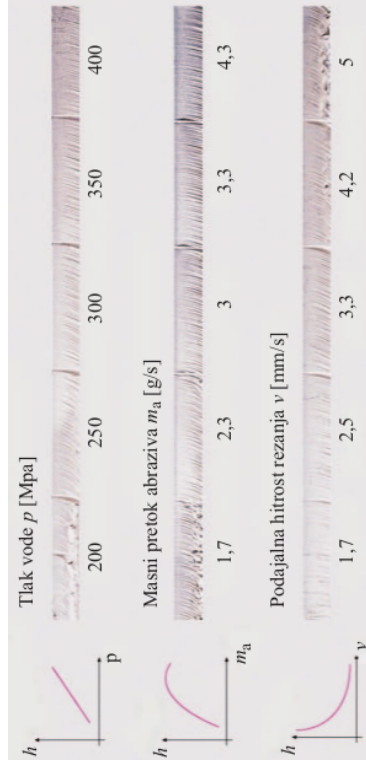
IZHOD

REZULTAT REZANJA Z AVC:

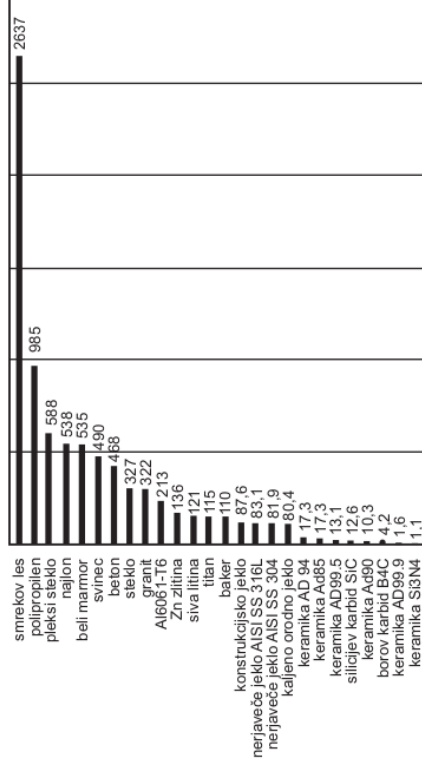
1. Učinkovitost rezanja:
 - globina reza h
2. Kvaliteta rezanja:
 - hrupavost površine R_a
 - valovitost oz. brazdatost površine W
 - zasajanje brazd t
 - klenovitost reza ψ



Tlak vode, masni pretok abraziva in rezalna hitrost



Obdelovalnost materiala

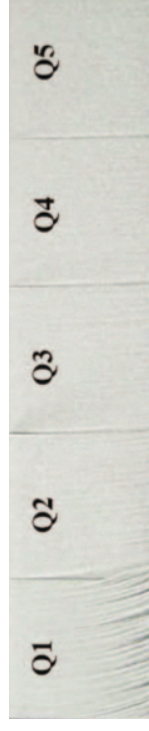


Empirični model rezanja z abrazivnim vodnim curkom

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

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.

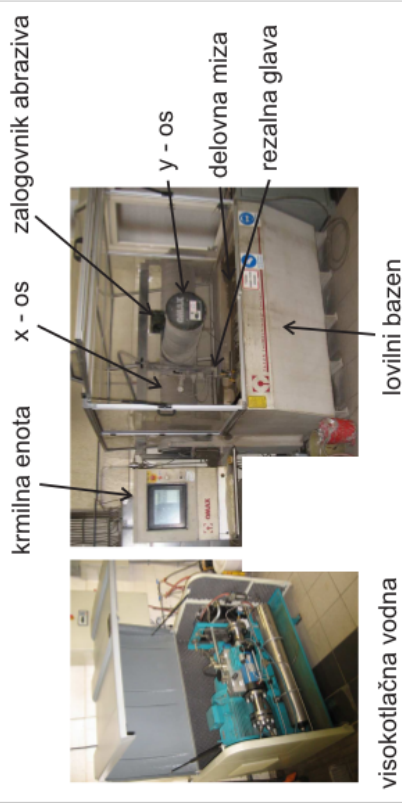


granat korund žlindra

Tipične oblike zrn

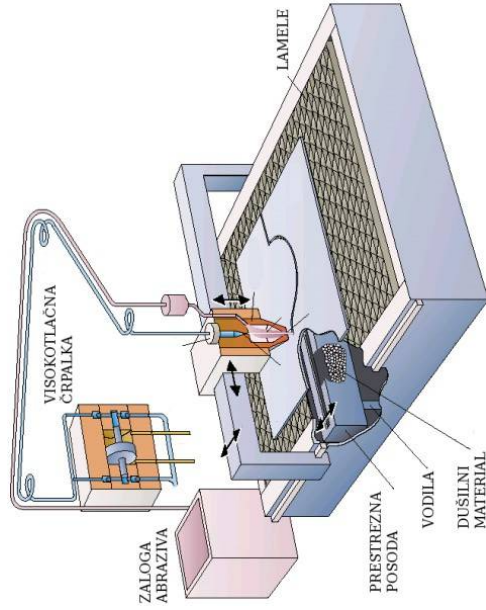


Komponente stroja za rezanje z abrazivnim vodnim curkom



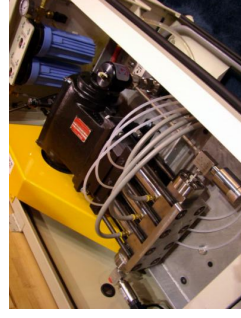
visokotlačna vodna črpalka

Shematski prikaz stroja za rezanje z abrazivnim vodnim curkom



Črpalke

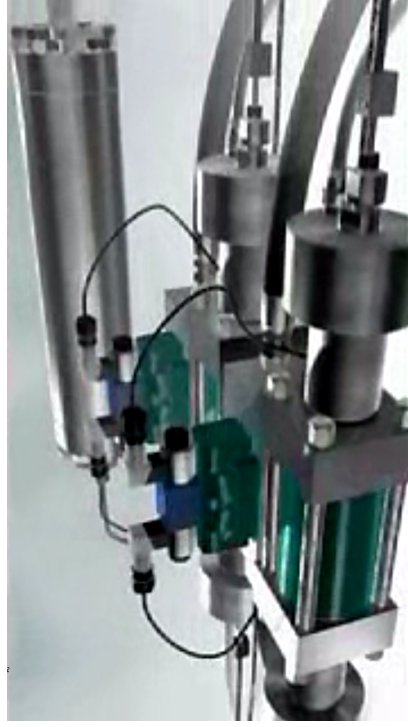
Neposredno gnana črpalka z rolično gredjo



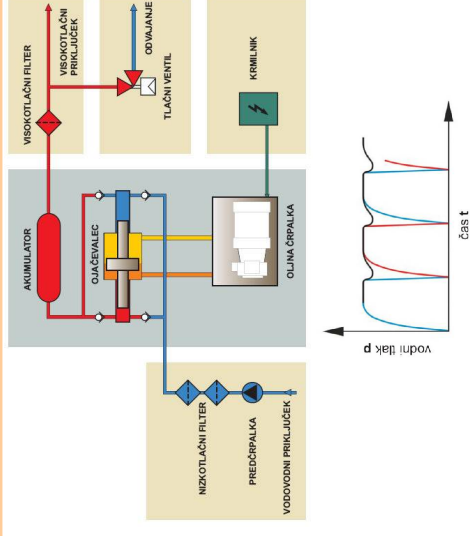
Posredno gnana črpalka - ojačevalnik



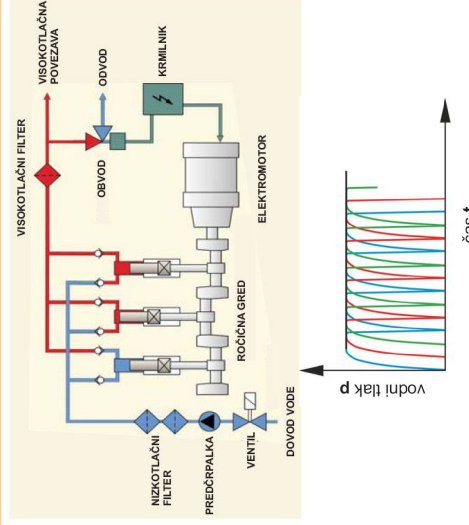
Hidravlična črpalka



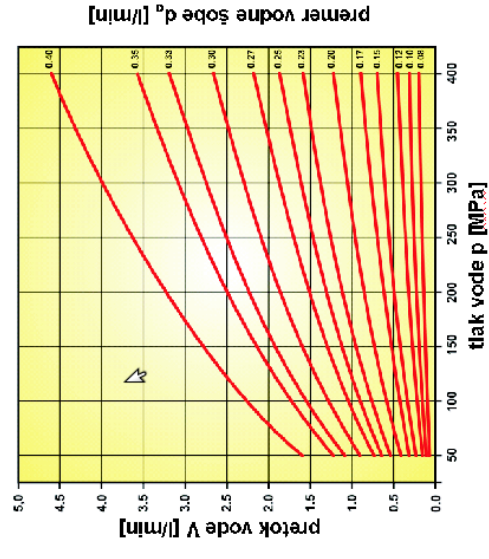
Posredno gnana črpalka z ojačevalcem




Neposredno gnana batna črpalka




Povezava med tlakom, pretokom in premerom vodne šobe



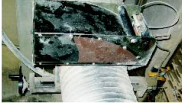

Rezalna glava



Vodne in pospeševalne šobe



Načini dovajanja abraziva

1. gravitacijsko
 
2. pnevmatsko
 


89

Proces rezanja



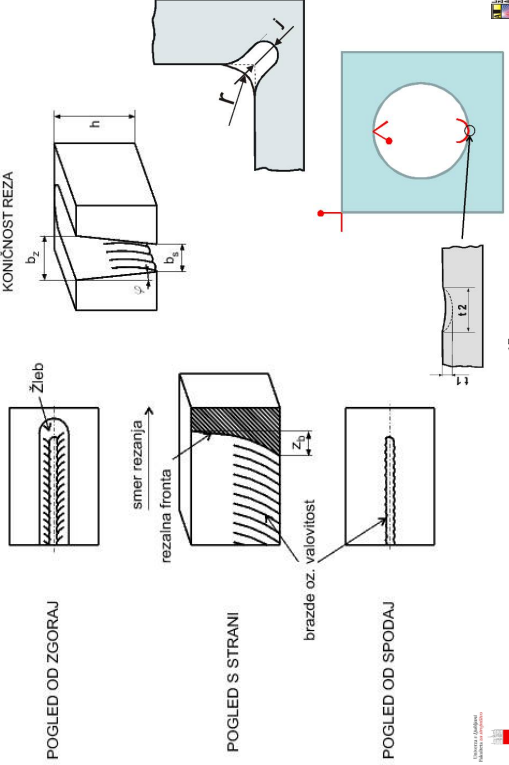
91

Delovanje injekcijske rezalne glave



90

Značilnosti obdelave



91

Uporaba nagiba rezalne glave



93

Primeri uporabe vodnega curka

Čiščenje



95

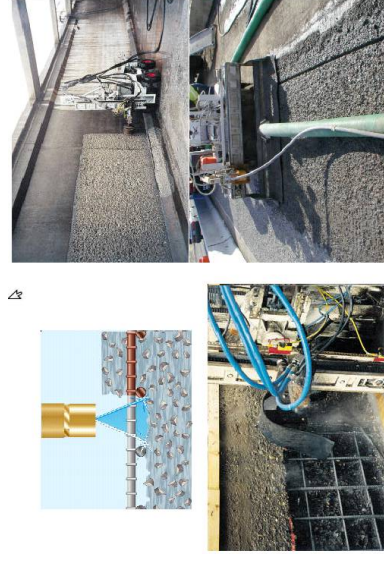
Vpliv izbire kvalitete reza

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

94

Primeri uporabe vodnega curka

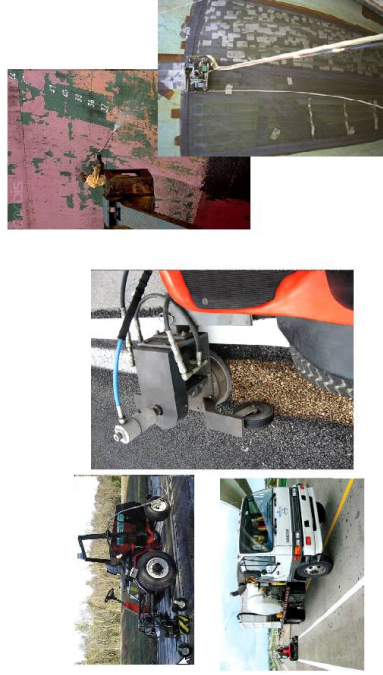
Fragmentacija



96

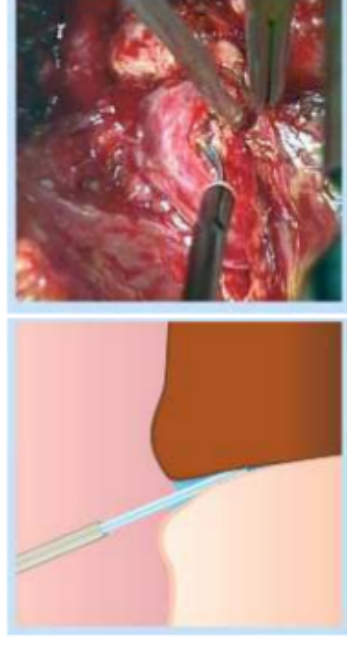
Primeri uporabe vodnega curka

Odstranjevanje prevlek in barv



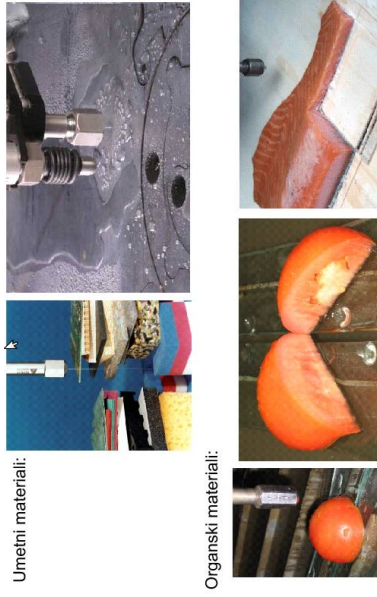
Primeri uporabe vodnega curka

Rezanje v medicinske namene



Primeri uporabe vodnega curka

Rezanje mehkih materialov

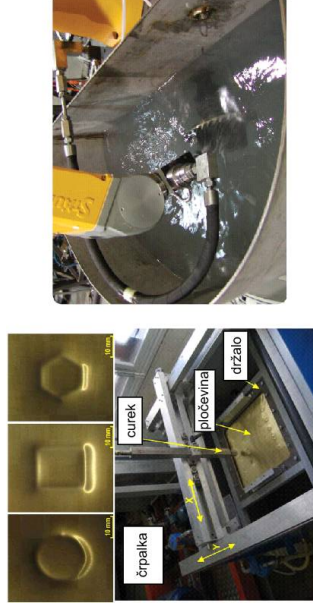


Umetni materiali:

Organski materiali:

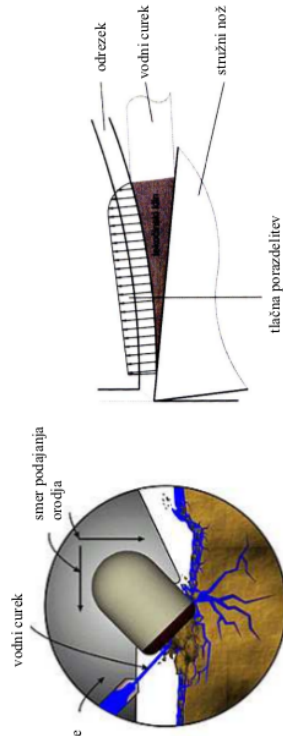
Primeri uporabe vodnega curka

Preoblikovanje pločevine in utrjevanje površin



Primeri uporabe vodnega curka

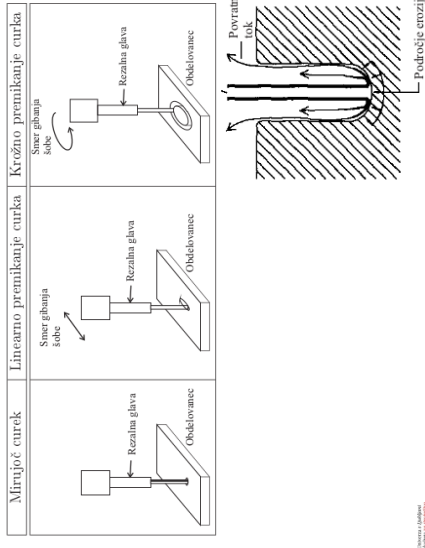
Dovajanje hladilne tekočine pri struženju



101

Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

Prebijanje



103

Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

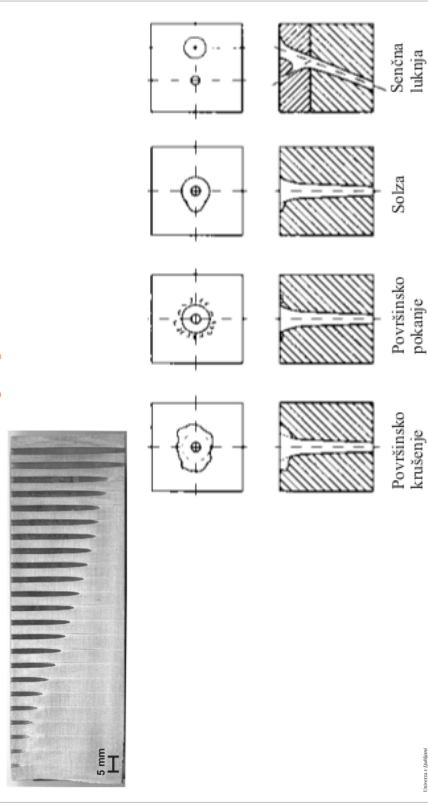
Rezanje



102

Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

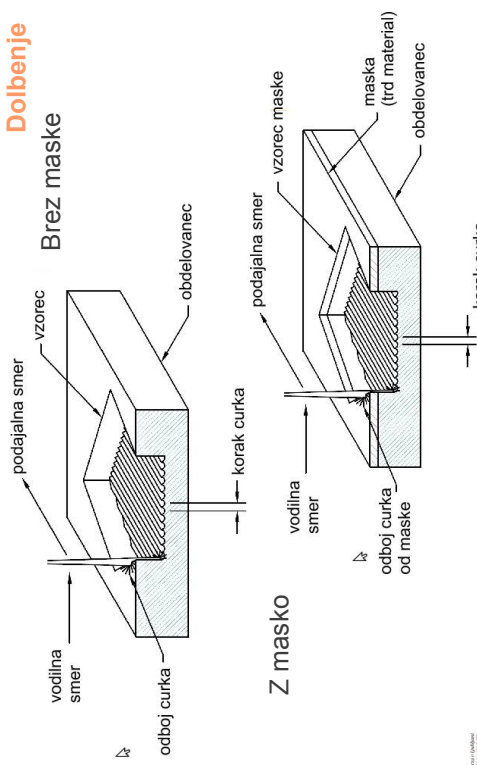
Prebijanje



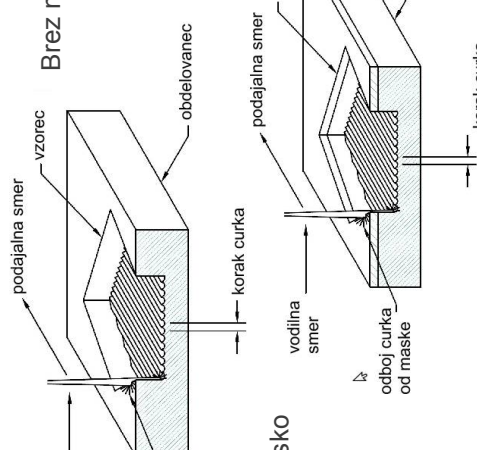
104

Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

Dolbenje



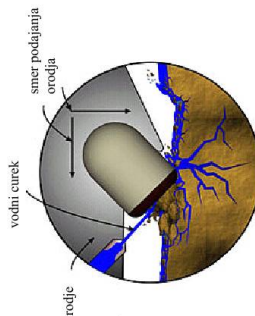
Brez maske

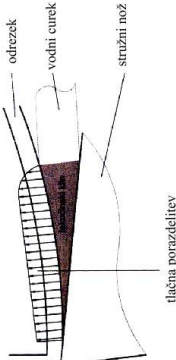


105

Primeri uporabe vodnega curka

Podpora konvencionalnim tehnologijam





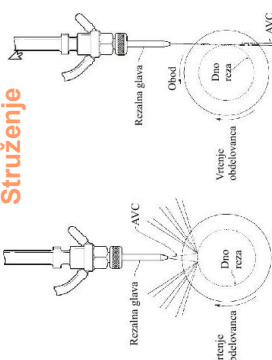
Fragmentacija kamnine

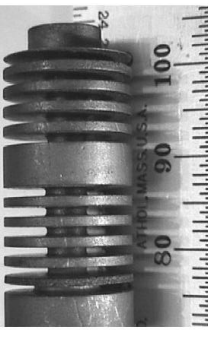
Struženje težko obdelovanih materialov

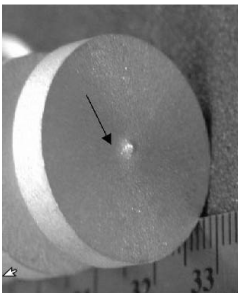
107

Primeri uporabe abrazivnega vodnega curka

Struženje











106

Primeru uporabe (abrazivnega) vodnega curka









108

Nekonvencionalni procesi

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
- ...

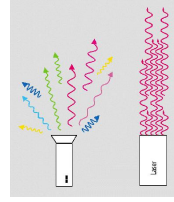
Razlika v valovni dolžini omogoča drugačen način uporabe različnih vrst laserjev

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

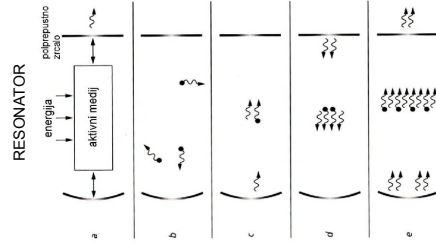
- Fizikalni princip: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER).

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**.



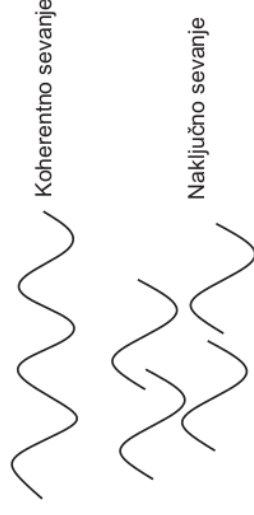
navadna svetloba

laserska svetloba



Pomembne lastnosti laserskega žarka

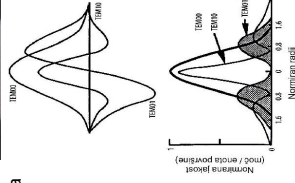
- Valovna dolžina – tip laserja
- Koherenca
- Rod in premer žarka
- Polarizacija



Rod žarka



- Rod laserskega žarka vidimo iz preseka žarka.
- Najbolji 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 radialnih polj	0			
	1			
	2			

113

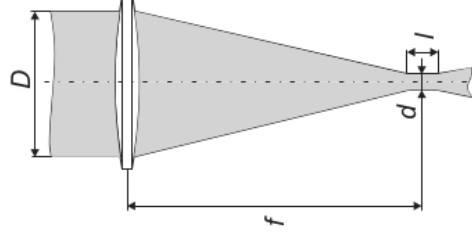


Fokusiranje laserskega žarka

- 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.

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

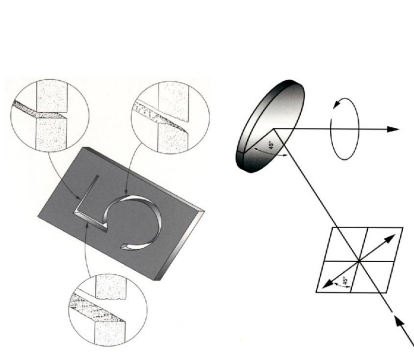
- D – premer žarka na mestu vstopa v lečo
- f – goriščna razdalja leče
- w – premer fokusiranega žarka (grlo)
- l – fokusna dolžina
- λ – valovna dolžina laserske svetlobe



115



Polarizacija laserskega žarka



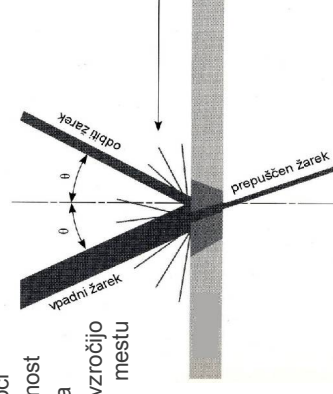
- Zaradi same konstrukcije resonatorja je laserska svetloba pri CO₂ laserju polarizirana.
- Polarizacija ima močnejši vpliv na absorpcijo energije v rezanem materialu.
- Zaželeno je rezanje v smeri polarizacije, ker je rez potem tanjši.
- Enako rezanje v vse smeri – posebno vrteče se zrcalo za rotirajočo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

114



Interakcija laserja in materiala

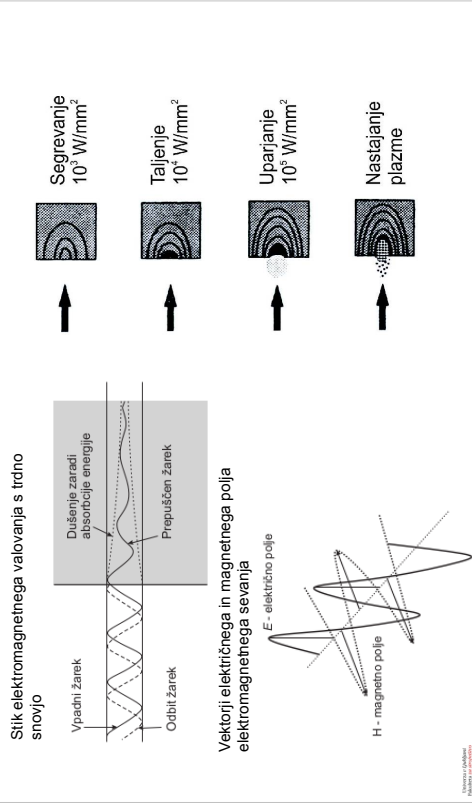
- Termični postopek
- Fokusiran žarek → gostota moči
- Absorbicija, odboj, transparentnost
- Absorbirana energija → toplota
- Vibracije v kristalni rešetki povzročijo povišanje temperature na mestu interakcije.



116



Interakcija laserja in materiala

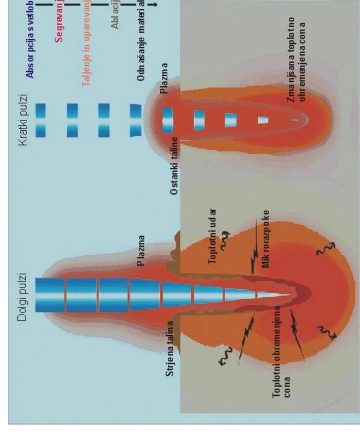


117



Kontinuiran in pulzni laser

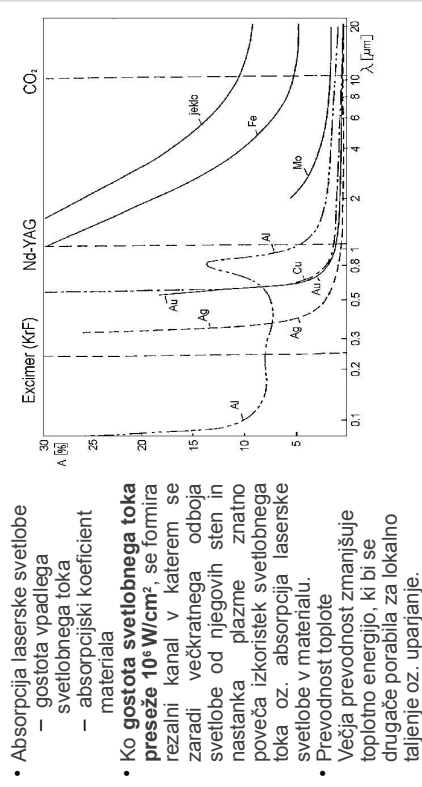
- Pulzni laserji omogočajo boljšo kontrolo laserske energije in s tem odvzema.
- Kratko pulzni laserji (nano-, piko-, femto-sekundni) so boljše od dolgo-pulzih zaradi manjšega vpliva na material in večje natančnosti.



119



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.
 - Prevednost toplote
- Večja prevodnost zmanjšuje toplotno energijo, ki bi se drugače porabila za lokalno taljenje oz. uparjanje.

118



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

120



Lasersko sublimacijsko rezanje

Večina materiala se z visoko intenzivnostjo laserskega

žarka upari in odnese pod pritiskom inertnega plina;

- + majhna hrapavost na površini reza
- + majhna toplotno vplivano področje (les, papir, širok spekter umetnih materialov od kompozitov do keramike)
- nizka hitrost rezanja
- potrebna je visoka energija (npr. jeklo : izparilna toplota = 25 x taliina toplota)

Lasersko oksidacijsko rezanje

Uporaba reaktivnega asistenčnega plina (kisik O₂) za povečanje eksotermne reakcije in oksidacije (gorenja) materiala segretega z laserjem. Uporablja se predvsem za **rezanje konstrukcijskih jekel**. Tlak plina je odvisen od debeline materiala in je med 1 (večje debeline) in 5 bar (tanki materiali).

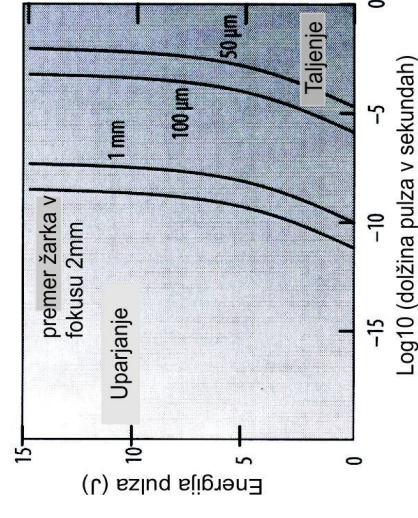
- + visoka hitrost rezanja → rezanje jekel s kisikom: oksidacija železa zviša absorpcijski koeficient za sevanje CO₂ laserja na 90 %, eksotermno gorenje daje 70 % procesne energije)
- + majhna poraba rezalnega plina (do 5 m³/h).
- rezultati rezanja (jeklo: oksidna plast na površini reza)

Lasersko talilno rezanje

Material je segret in staljen z laserskim žarkom ter odnesen s tokom plina. Za rezalni plin se uporablja predvsem dušik (N₂) in argon (Ar) pod visokim tlakom (10 do 20 bar);

- + neoksidirana površina reza (visoko legirana jekla, nikljeve legure, titanove zlitine, nerjaveča jekla, aluminij),
- večja hrapavost površine reza zaradi staljenega materiala,
- žareča HAZ zaradi prevoda toplote v osnovni material,
- nizka hitrost podajanja, vendar večja, kot pri sublimacijskem rezanju,
- velika poraba rezalnega plina (do 100 m³/h).

Energija in dolžina pulza potrebna za uparjanje – sublimacijsko rezanje



Potek laserskega taliinega rezanja

125

Obdelovalni parametri

VHOD

LASER

- Laserski sistemski
- laserska moč konjugiranega žarka
- laserska moč pulza
- dolžina pulza
- frekvenca pulzov
- energijska oblika TEM
- valovna dolžina
- koherenca

2. Fokusni parametri:

- vrsta leče
- premera lasernega žarka d
- površinska razdalja f
- fokusna obližna f

3. Plinski parametri:

- oblika in dimenzija šobe
- oddaljenost šobe od obdelovanca
- vrsta rezalnihga plina

PROCES

Razmere na rezalni fronti med laserjem in obdelovancem

IZHOD

REZULTAT REZANJA Z LASERJEM:

1. Učinkovitost rezanja:
 - glavna vzeta η
2. Kvaliteta rezanja:
 - profil površine R
 - valovitost oz. brazdovitost površine W
 - zaostrjenost brazg f
 - topolno prizadeto področje

127

Potek laserskega oksidacijskega rezanja

126

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.

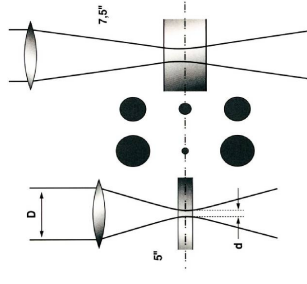
128

Materiali

- **Konstrukcijska jekla** oz. nizko legirana maloogljučna jekla. Hitrost rezanja je odvisna predvsem od vrste legirnih elementov. Režejo se predvsem s kisikom.
- **Nerjaveča jekla**, legirana s kromom in nikljem. Reže se z nevtralnimi plinom dušikom, zaradi nezaželene oksidacije.
- **Aluminijeve zlitine**, reže se z dušikom, ker oksidi preprečujejo eksotermno reakcijo. Izjemoma tudi z zrakom.
- **Titanijeve in nikljeve zlitine**, reže se s kisikom, ker ta pospeši rezanje zaradi eksotermne reakcije.
- **Bakrove zlitine**, reže se s kisikom, vendar eksotermna reakcija ni tako močna kot pri konstrukcijskih jeklih.
- **Nekovinske materiale (akrilno steklo, les, ipd.)** režemo z vpihovanjem zraka.

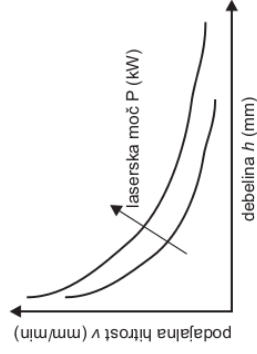
Velikost gorišča laserskega žarka

- 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.



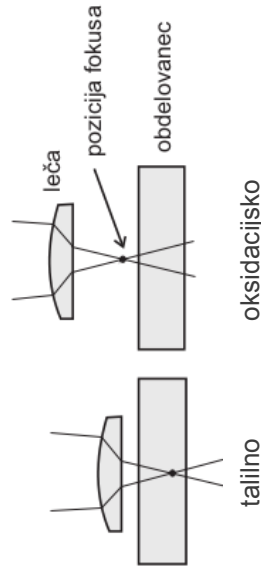
Hitrost rezanja

- 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



Položaj gorišča laserskega žarka

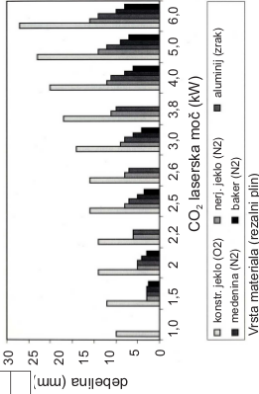
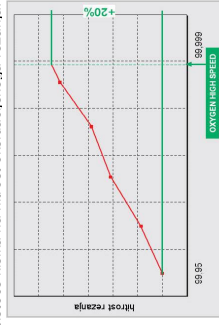
- Lega fokusa pri oksidacijskem rezanju je večinoma **na površini** obdelovanca. Žarek segreje površino, samo rezanje pa dosežemo z eksotermno reakcijo oz. gorenjem.
- Pri talinem rezanju je lega fokusa **pod površino** na globini 2/3 debeline materiala. Tako bo material pretajen po celotni debelini.



Rezalni plini pri laserskem rezanju

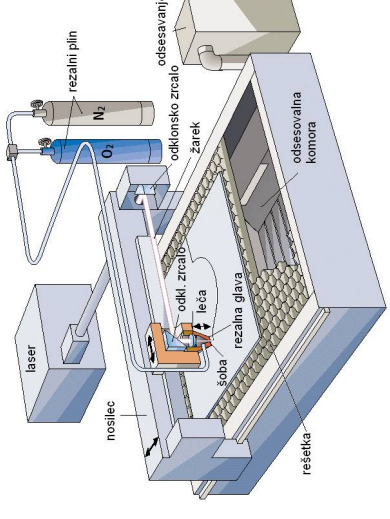
Material	Rezalni plin	Tlak (bar)
Konstruktivska jekla	Kisik 5.0	6
Ogljikova in legirana jekla		
Nerjavna jekla	Dušik 5.0	30
Nikljeve zlitine		
Bakove zlitine		
Broni		
Medi		
Titanove zlitine	Argon 5.0	15
Magnezijeve zlitine	Dušik 5.0	30
Aluminijeve zlitine	Dušik in kisik	5

Vpliv čistotě kisika na hitrost oksidacijskega rezanja:



133

Shema stroja za lasersko rezanje



135

Hitrost rezanja

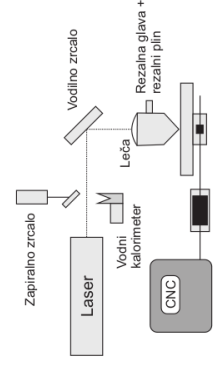
$$v_r = Q \cdot P \cdot h^{-B}$$

Material	Q	B	Največja debelina h _{max} [mm]	Rezalni plin
Nizkoogljeno 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

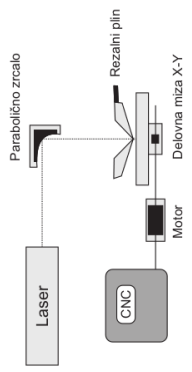
134

Optika

Preprosta optika

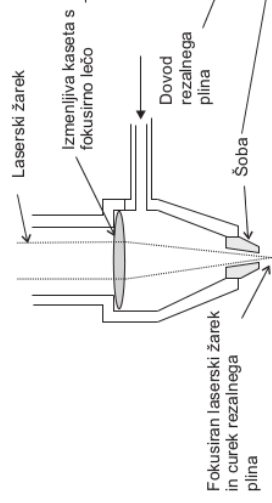
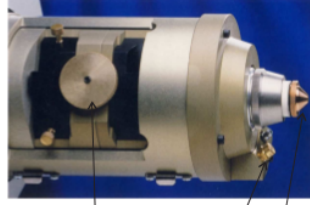


Refleksivna optika



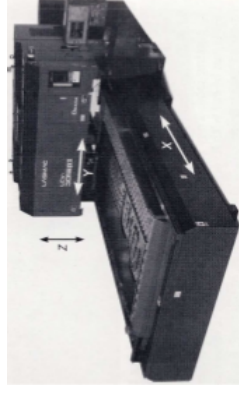
136

Rezalna glava

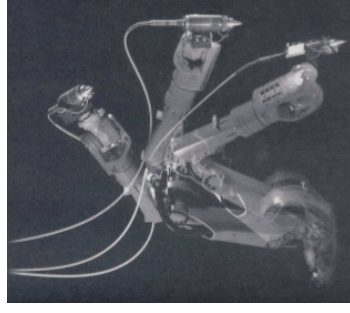


Vodenje rezalne glave

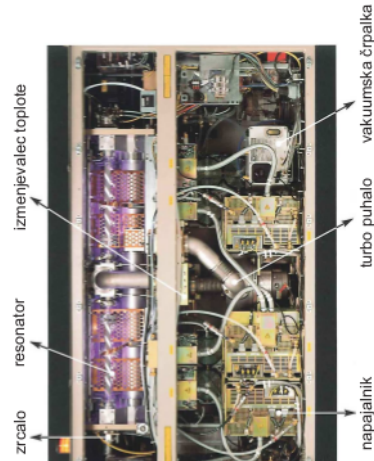
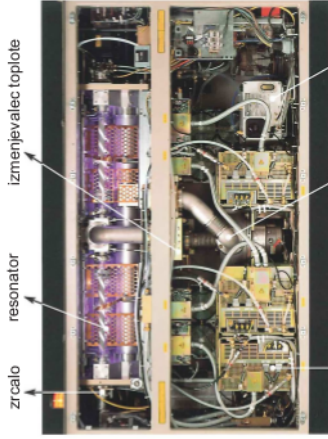
Nd:Yag nameščen na robotsko roko za rezanje v 3D prostoru



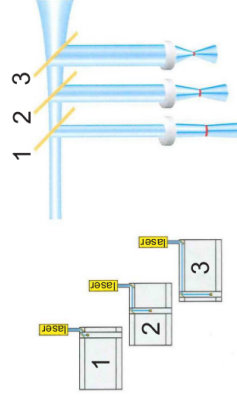
Samostoječ CO2 laserski sistem



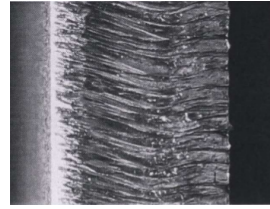
Resonator



Vpliv dolžine optične poti



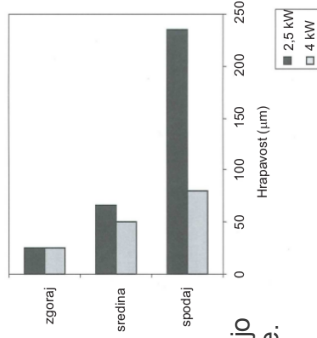
Značilnosti obdelave



Lasersko tailino rezanje



Lasersko oksidacijsko rezanje

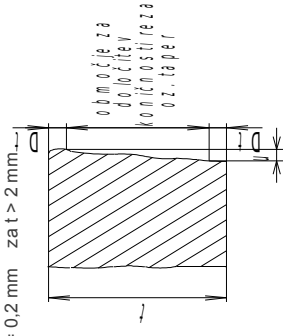


Strije na površini reza določajo hrapavost površine.

Koničnost reza

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

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



Hrapavost površine

• **Hrapavost** odvisna od:

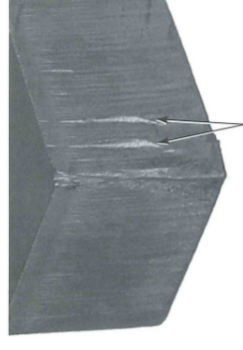
- vrste materiala,
- debeline materiala
- Ra se giblje nekje v rangu med 1 do nekaj čez 10 µm, v izjemnih primerih tudi pod 1 µm (sublimacijsko rezanje polimerov).

[Z R sovapa h]
 [urf]

debelina pločevine t [mm]
 Razdelitev področja hrapavosti
 Rz na kakovostna polja

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

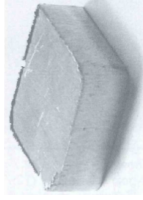


žlebljenje

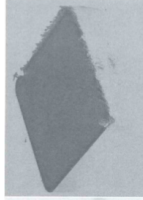
Srh

- Posledica nabiranja strijene 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

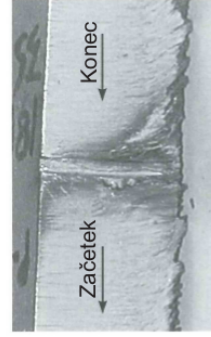
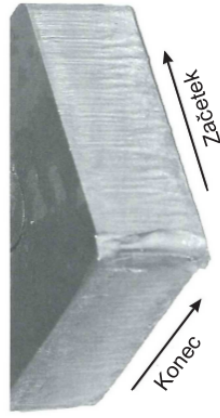


Posledica neenakomernih pogojev pri rezanju v različnih smereh

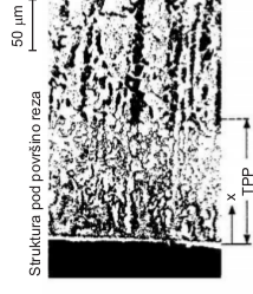
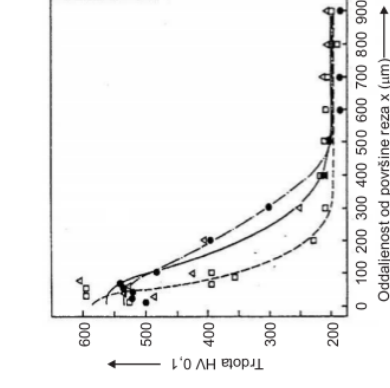
Integriteta površine

- Laserska obdelava je termičen proces → nastane **toplotno vplivano področje**, ki je sestavljena iz pretaljane in nepretaljane plasti.
- Če pretok rezalnih plinov med rezanjem ni dovolj velik, potem je **pretaljena plast** debelejša. Tipična debelina je med 20 in 60 μm .
- Obdelava z laserskim sublimacijskim rezanjem ne pušča pretaljane plasti.
- Struktura **nepretaljane plasti** je odvisna od osnovnega materiala.
- Debelina nepretaljane 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.

Napaka vhoda in izhoda



Integriteta površine



Material: St 52-3

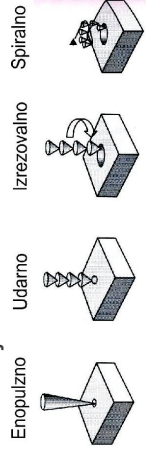
Način delovanja:	kont.	pulz	superpulz
Laserska moč (kW):	1,0	0,4	0,4
Tlak rezalnega plina O ₂ (bar)	1,5	2,5	1,0
Hlrost rezanja (m/min):	3,7	1,3	1,15

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 pretaljena, 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 pretaljeni 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.

Vrtanje

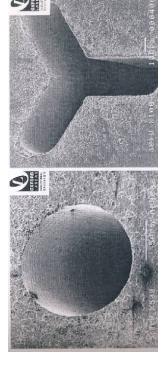
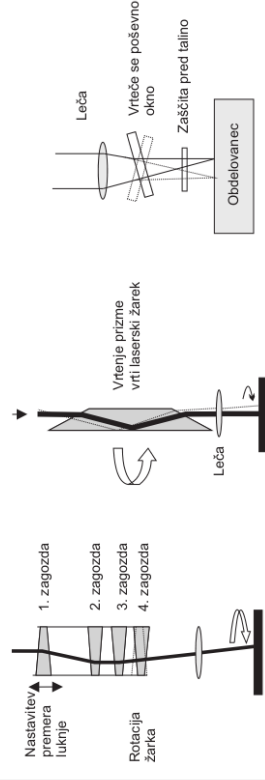
- Enopulzno: luknja je končana v enem pulzu
- Dvopulzno: dva zaporedna pulza – boljša interakcija s plazmo
- Udarno vrtanje – več zaporednih pulzov
- Izrezovalno rezanje – vrtenje žarka po obodu luknje
- Spiralno vrtanje



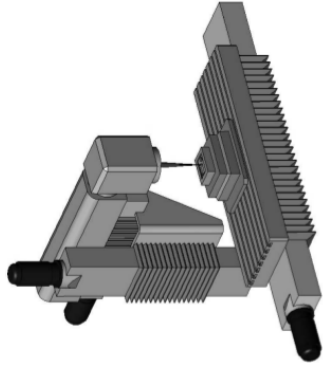
Področja uporabe

- Odzemanje z uparjanjem oz. sublimacijo:
 - Prebijanje
 - Vrtanje
 - Dolbenje
 - Rezanje
- Odzemanje s taljenjem:
 - Talilno rezanje
 - Oksidacijsko rezanje

Izrezovalno vrtanje



Dolbenje



Nekonvencionalni procesi

Plazemsko rezanje

Primeri rezanja

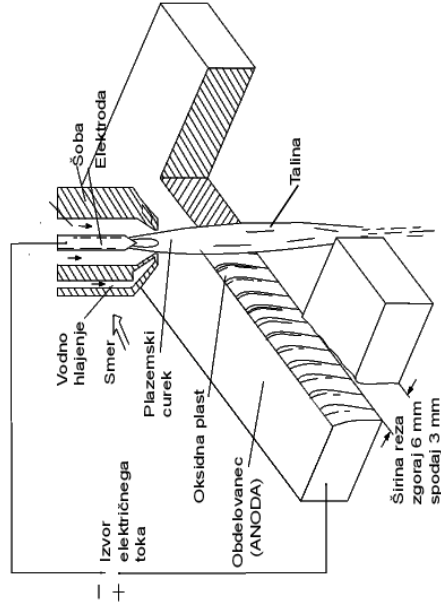


Uvod

- 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 Fluorescentne luči Neonski napisi Varniški oblok Fuzija	Plamen Strele med nevlhito Strele v obliki žoge Ionosfera (polarni sij)	Zvezde in jedra Nuklearna fuzija Sončni veter Vesoljski prostor

Schema plazemskega rezanja



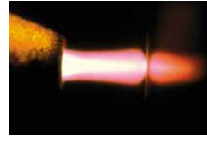
157

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 zavesti
- 1968 Rezanje z vbrizgavanjem vode
- 1977 Rezanje v vodi
- 1990 Visoko natančno plazemsko rezanje (hyperplasma)

159

Plazemski oblok

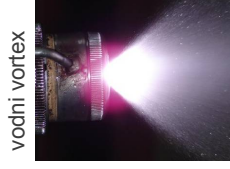


navaden oblok

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



Hydefinition oblok



vodni vortex

158

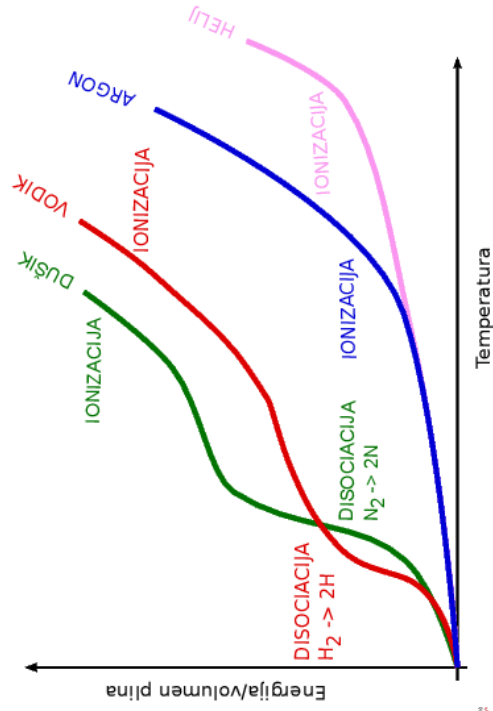
Princip odhašanja

- 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 izgorovanja

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

160

Disociacija in ionizacija



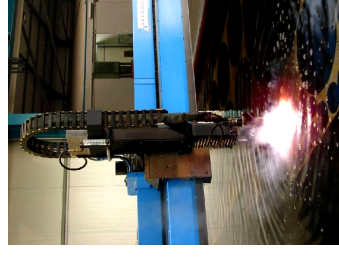
Stroj za plazemsko rezanje



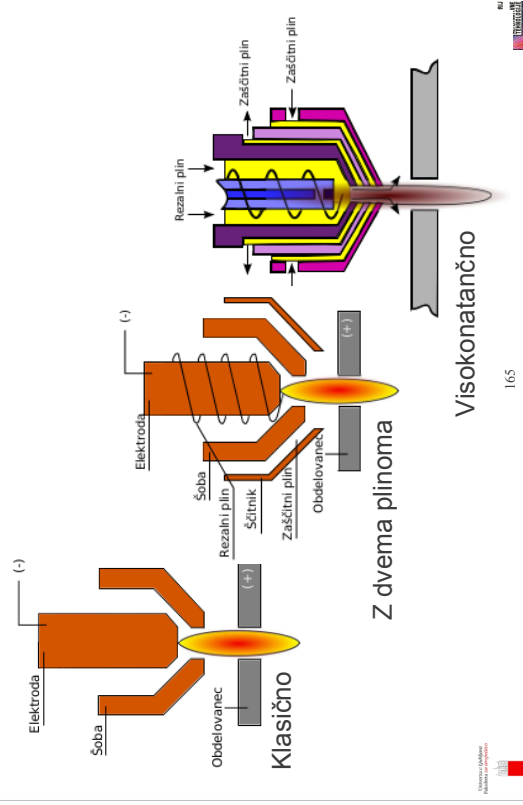
Stroj za plazemsko rezanje



Stroj za plazemsko rezanje v vodi

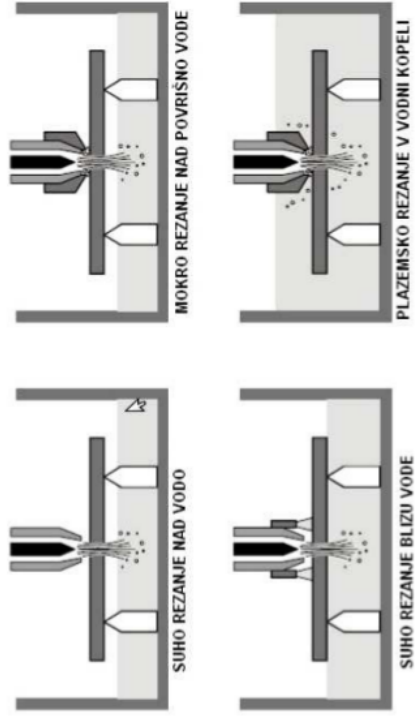


Načini rezanja s plazmo



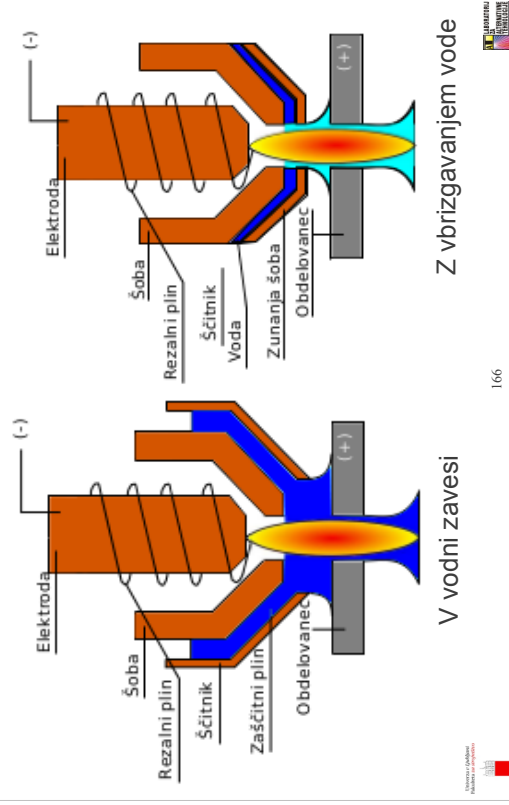
165

Suho rezanje in rezanje pod vodo



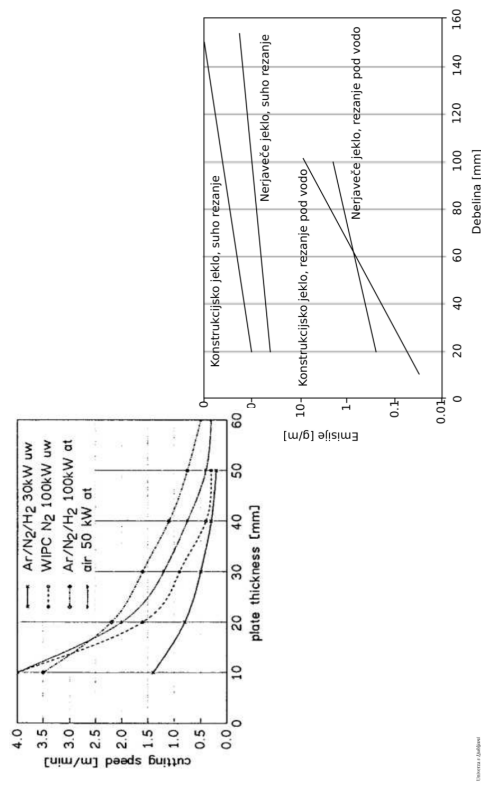
167

Načini rezanja s plazmo



166

Suho rezanje in rezanje pod vodo



168

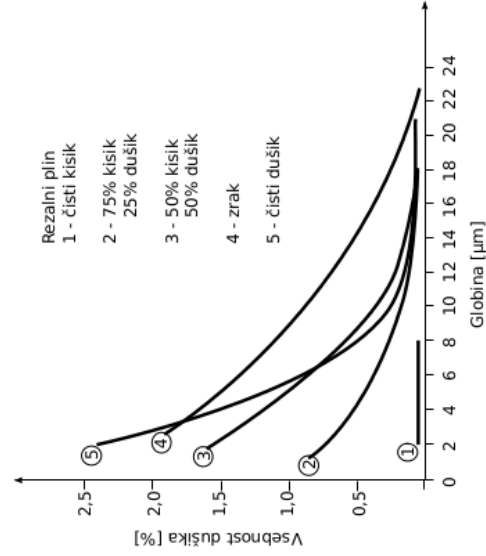
Rezalni plini

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

169



Globina vsebnosti dušika glede na rezalni plin



170



Kombinacije rezalnega in zaščitnega plina

Rezalni / zaščitni plin.	Konstrukcijsko 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

171



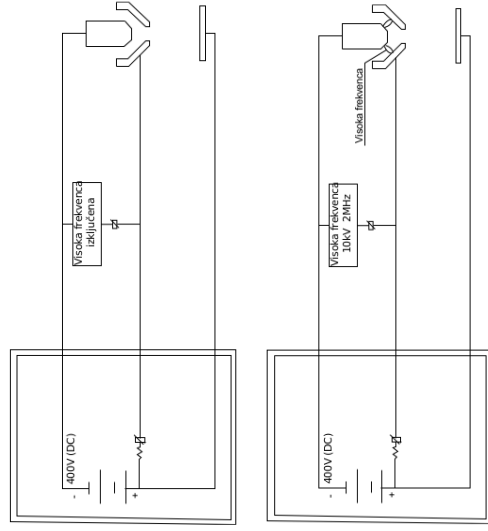
Izbira plina glede na material obdelovanca

Material in debelina	Rezalni plin	Zaščitni plin	Značilnosti obdelave
Konstrukcijsko jeklo od 0.5 to 8 mm	Kisik	Kisik, kisik+dušik, dušik	Pravokotnost reza primerljiva z laserski rezanjem, gladek rez brez srha
Konstrukcijsko 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+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 (AIMe3), 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

172



Vzpostavitev plazemskega obloka – 1. korak



173



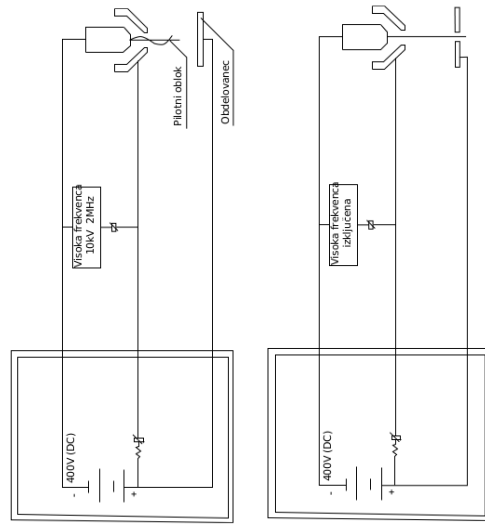
Obraza elektrode



175



Vzpostavitev plazemskega obloka – 2. korak



174



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: velika na moč rezanja → spodjedanje
- Hitrost rezanja:
 - premajhna hitrost → konveksen rez
 - prevelika hitrost → poševen rez, sprijemanje na rešetke
- Tlak plinov usklajen z električnim tokom:
 - prevelik tlak → odpihne oblok
 - premajhen tlak → ne potisne obloka skozi šobo

176



Obdelovalni parametri

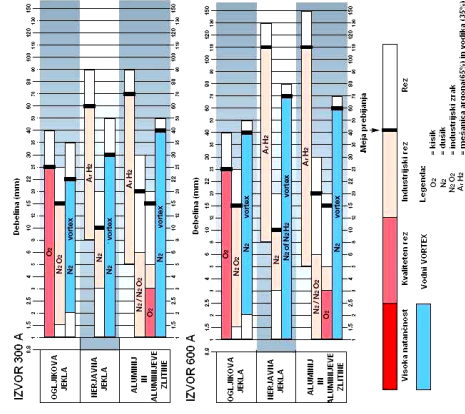
- Hidrostatični tlak vodnega stožca (1 bar)
 - premajhen tlak → razpršen oblok
 - prevelik tlak → preveč stisnjen oblok, konkaven rez (B) v zavojih pri rezanju večjih debelin
- 
- Hlajenje elektrode v rezalni glavi
 - Električna prevodnost vode (0 do 10 S/cm)

Značilnosti obdelave

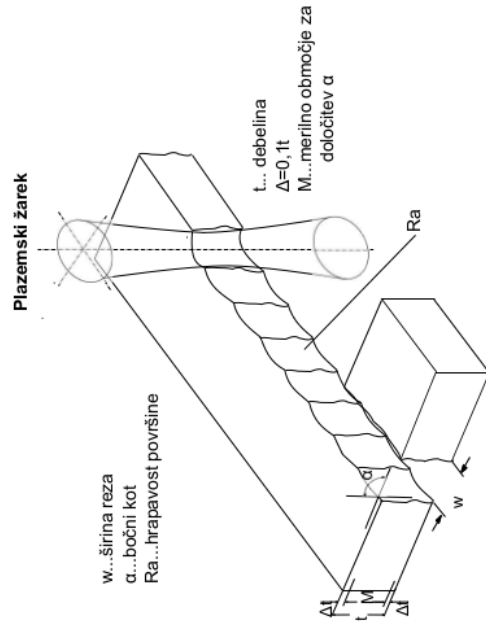
- Režemo predvsem elektropredvodne materiale. Možno je tudi nepredvodne ob neprenesnem obloku.
- Velike hitrosti rezanja, posebno pri tankih pločevinah.
- Posledica velike koncentracije energije plazemskega obloka so majhne deformacije obdelovanca pri rezanju.
- Relativno majhni stroški pri uporabi cenenih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

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.

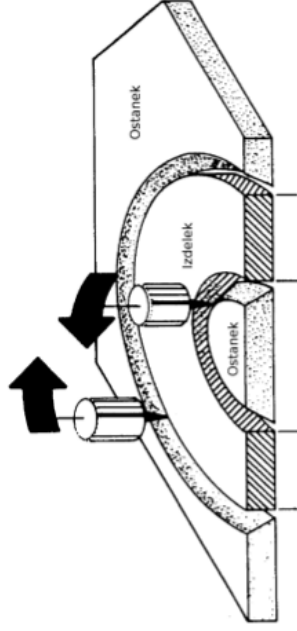


Kakovost plazemskega reza



Rezalni kot

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



181

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



183

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

182

Toplotno vplivano področje

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

Konstrukcijsko jeklo St 52 debeline 3,5 mm

Rezalni postopek	TPP mm ²	Širina reza mm
Plazemsko rezanje	3,2	1
Rezanje s plazmo	0,25	1,5
Rezanje z laserjem	0,06	0,2

St 37-2
10 mm

plazemsko plazemsko lasersko

184

Področja uporabe

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

Plazemska tehnologija – izdelki



Rezanje stranice avtomobila (VW "Caddy")



- Visokoprecizna plazma
- Robotska aplikacija

Primeri plazemskega rezanja



Nekonvencionalni procesi

Plamensko rezanje

Plamensko rezanje

Zahteve za obdelovanec:

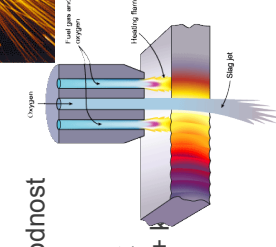
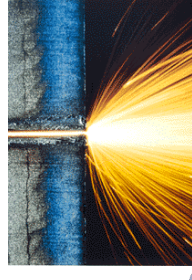
- $T_{\text{vnetišča}} < T_{\text{tališča}}$
- $T_{\text{tališča oksidov}} < T_{\text{tališča}}$
- Nizka toplotna prevodnost

Plini:

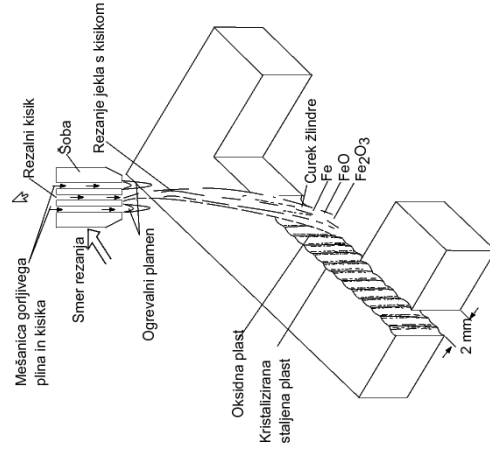
- acetylen + kisik
- propan-butan + kisik

$$C_{\text{ekv}} < 0,3$$

$$C_{\text{ekv}} = C + 0,16 \cdot Mn + 0,3 \cdot Si \cdot (Si + Mo) + 0,4 \cdot Cr + 0,2 \cdot V + 0,04 \cdot (Ni + Co)$$



Shema plamenskega rezanja



Princip odhašanja

- V jedru (**primarni plamen**) prihaja do oksidacije gorilnega plina. Acetylen najprej disocira:



- Nato sledi gorenje:



- V zunanjem delu (**sekundarni plamen**) se plamen „napaja“ s kisikom iz okoliškega zraka:



- Najtoplejša točka je na konici primarnega plamena
- Obdelovanec na mestu reza oksidira, s tem nastaja dodatna toplota, ki povzroča taljenje.

Gorilni plini

Gorilni plin	Temperatura plamena [°C]	Razmerje		Toplotna gostota plamena [kJ/m ³]	
		kisik:plin	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	

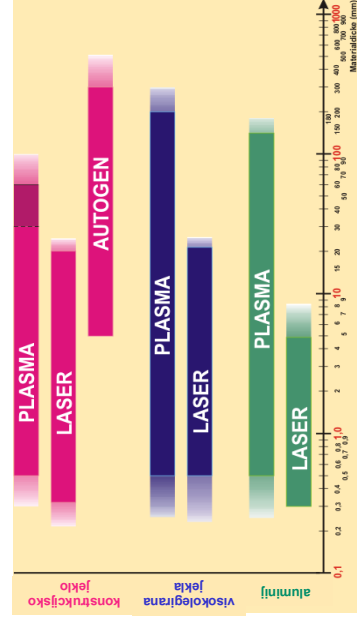
Nekonvencionalni procesi

Primerjava konturnih postopkov rezanja

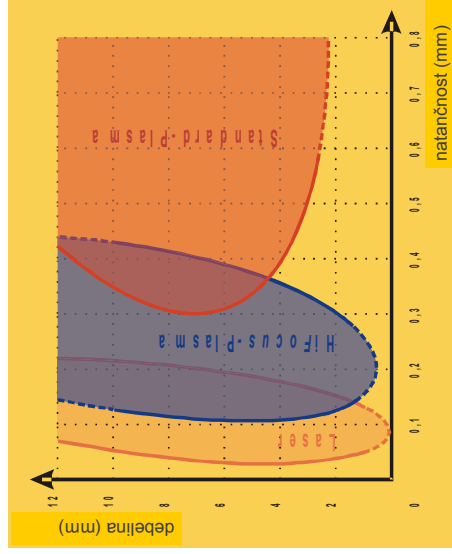
Primer rezanja



Področje uporabe termičnih in elektrotermičnih postopkov rezanja



Primerjava laser - plazma

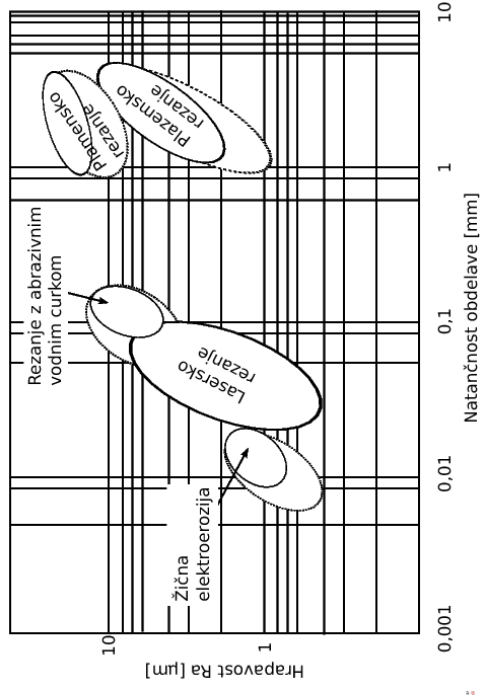


Vr: Kjellberg, 2009

197



Tehnološka okna



199



Primerjava plazemskega rezanja s plamenskimi in laserskim rezanjem

- V primerjavi s plamenskimi rezanjem**
- Rezanje s plamenom je omejeno predvsem na konstrukcijska jekla.
 - Plamensko rezanje povzroča večji vnos toplote v material kot pri plazmi
 - Potrebno je predgrevanje
 - Naprava za plazemsko rezanje je investicijsko in obratovno dražja

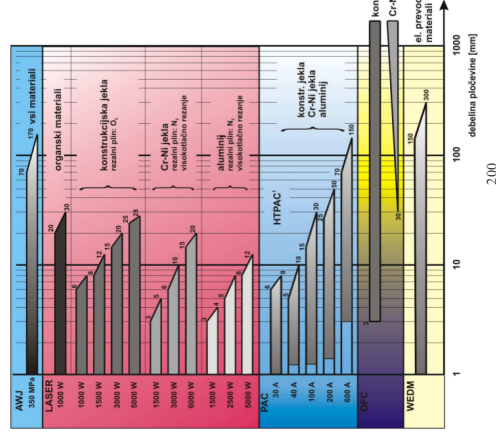
- V primerjavi z laserskim rezanjem**
- Primerljiva kvaliteta rezanja
 - Vrsta jekla ne vpliva znatno na rezanje s plazmo.
 - Plazma ne potrebuje značne predpriprave (pločevina je lahko umazana/mastna)
 - Znatno manjša investicija in delovni stroški
 - Investicija delovna miza (1.500 x 3.000 mm)
Laser: 500.000 do 700.000 €
Plazma: 80.000 do 150.000 €

Vr: Kjellberg, 2009

198



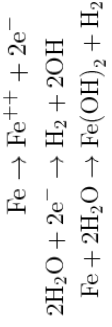
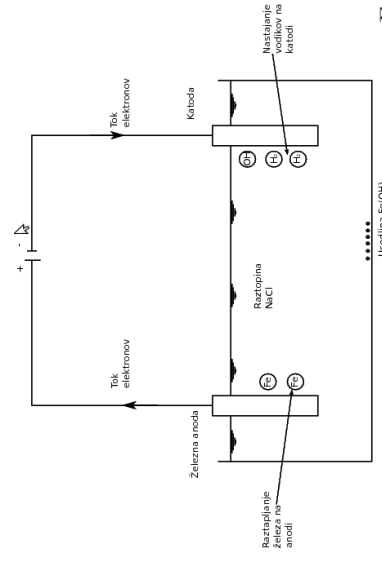
Primerjava konturnih postopkov rezanja



Izbira primernega konturnega postopka rezanja

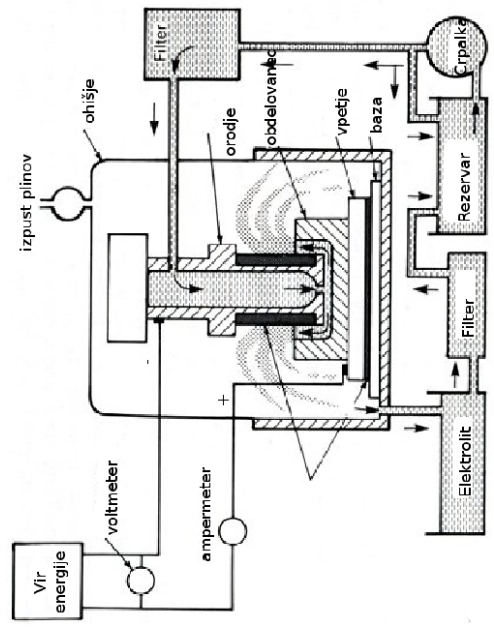
	Lasersko rezanje	Rezanje z abrazivnim vodnim curkom	Plazemsko rezanje	Plazemsko rezanje	Žična elektroerozija	
Debelina t [mm]	Nizkoogljena jekla	20	150	5 < t < 150	150	
	Orodna jekla	15	150	-	150	
	Nerjavna jekla	12	150	-	150	
	Aluminij	8	150	-	150	
	Baker	-	150	-	150	
Tolerančni razred IT	Najlon	25	150	-	-	
	Vežan les	25	150	-	-	
	Nizkoogljena jekla	11	12	16	16	6
	Orodna jekla	11	12	16	16	6
	Nerjavna jekla	11	12	16	16	6
Globlino toplotno vplivnega področja HAZ [mm]	Baker	11	12	16	16	6
	Najlon	11	12	-	-	-
	Vežan les	11	12	-	-	-
	Nizkoogljena jekla	0,05 · t	0	$t < 20$: 0,1 + 0,05 · t $t \geq 20$: 0,75 + 0,015 · t	$t < 20$: 0,3 · t $t \geq 20$: 0,6 · t	0,02
	Orodna jekla	0,2 · t	0	-	$t < 20$: 0,4 · t $t \geq 20$: 0,8 · t	0,02
Aluminij	Nerjavna jekla	0,02 · t	0	-	$t < 20$: 0,2 · t $t \geq 20$: 0,2 · t	0,02
	Aluminij	0,02 · t	0	-	$t < 20$: 0,2 · t $t \geq 20$: 0,2 · t	0,02
	Baker	-	0	-	$t < 20$: 0,2 · t $t \geq 20$: 0,2 · t	0,02
	Najlon	0	0	-	$t < 20$: 0,2 · t $t \geq 20$: 0,2 · t	0,02
Vežan les	0	0	-	-	-	

Elektrolitsko raztapljanje železa



Nekonvencionalni procesi

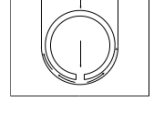
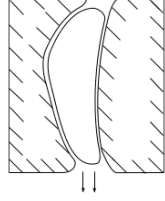
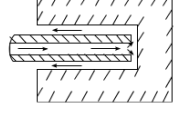
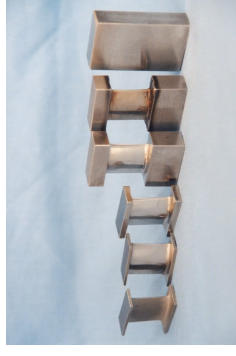
Elektrokemijska obdelava



Elektrodni materiali

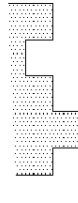
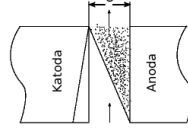
Material elektrode	Cena	Odpornost na iskre	Opomba
Baker	srednja	slaba	Nizka upornost
Medenina (60Cu-39Zn)	nizka	slaba	Najboljša elektroda za splošno rabo
Bron	srednja	slaba	
Austenitno jeklo	srednja	dobra	Dobra
Sintran volfram-baker	zelo visoka	zelo dobra	Ko je potrebno preprečiti iskre
Volfram	zelo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

Primeri izdelkov

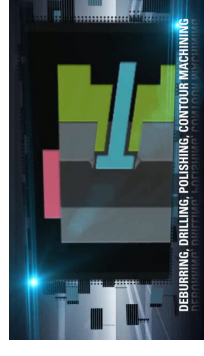


Značilnosti obdelave

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



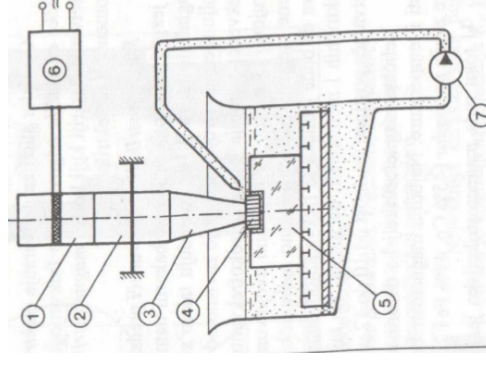
Primeri obdelave



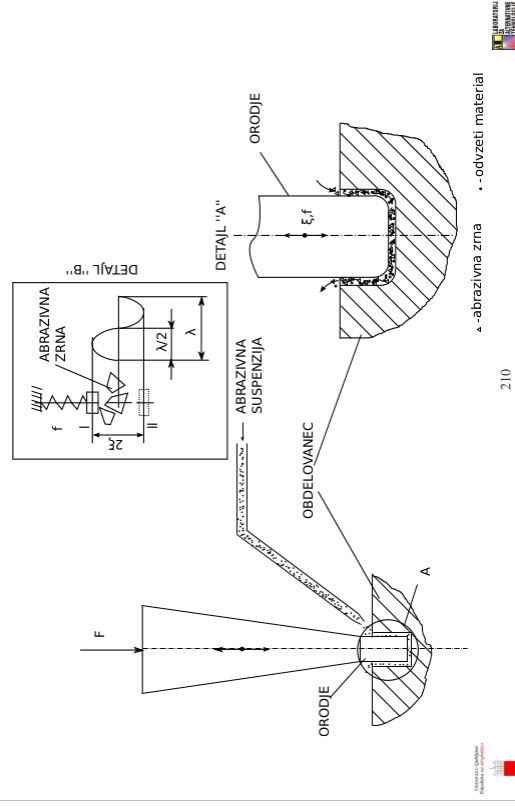
Nekonvencionalni procesi

Ultrazvočna obdelava

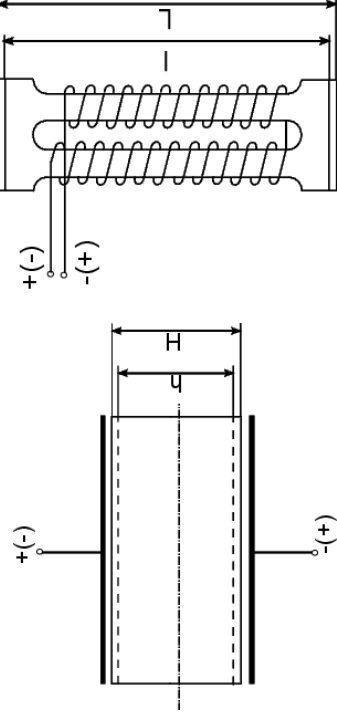
Shema stroja za ultrazvočno obdelavo



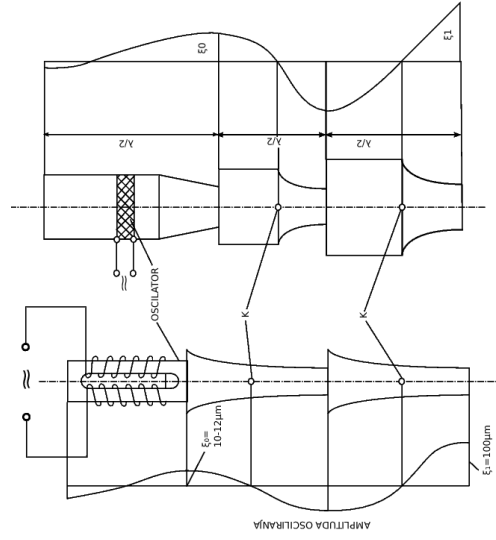
Princip odnašanja



Oscilator



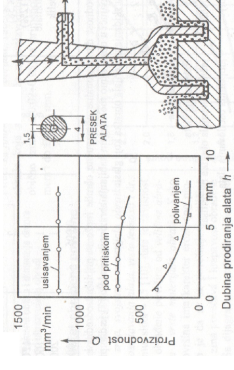
Ojačevalec



213

Značilnosti obdelave

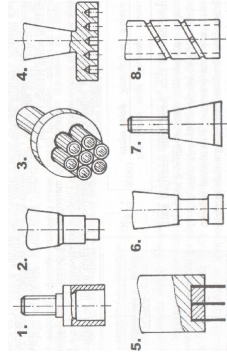
- Hitrost obdelave raste z večanjem frekvence in amplitude nihanja ($\xi < 0,1 \text{ mm}$) ter z večanjem abrazivnih zrn. Optimalno razmerje med amplitudi in velikostjo zrn je $\xi : d_{\text{sr}} = 0,6 \text{ do } 0,8$. Največje hitrosti se dosega z delci iz borovega karbida. Uporabljajo se tudi silicijev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



215

Orodja

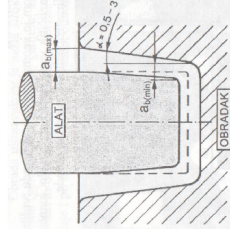
- Orodje: velika elastičnost in žilavost → največkrat konstrukcijsko jeklo
- Obdelovanec: trd in krhek
- Obraba vedno prisotna: čelna in volumnska obraba



214

Značilnosti obdelave

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

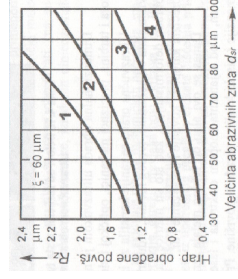


$$a_e = 1,5 \cdot d_{\text{sr}}$$

216

Značilnosti obdelave

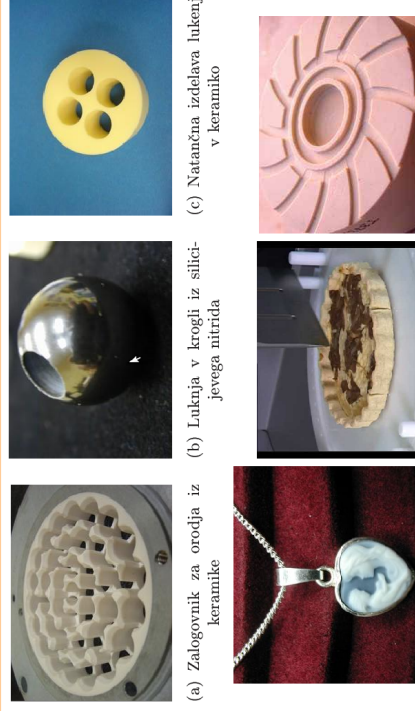
- Hrapavost površine:
 - velikost abrazivnih zm
 - amplituda nihanja
 - material obdelovanca



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.

Uporaba



(a) Zalogovnik za orodja iz keramike
(b) Luknja v krogli iz silicijevega nitrida
(c) Natlačna izdelava lukenj v keramiko

(d) Obsek iz poldragih kamnov obdelanih z ultrazvočno obdelavo

(e) Rezanje živil
(f) Obdelava keramike

(f) Obdelava ležajne keramike