

ŠTUDIJSKO GRADIVO

Predmet: Izdelovalne tehnologije 2 3. letnik RRP programa

Mihael Junkar in Joško Valentinčič

Ljubljana 2012



1



Vsebina predmeta Izdelovalne tehnologije 2 Sklop Nekonvencionalne tehnologije

- Trendi sodobnih izdelovalnih sistemov:
 - Predstavitve inženirskih dejavnosti, Smernice razvoja izdelovalnih sistemov - od klasičnih strojev do sodobnih mehanotronskih sistemov
 - Vloga tehnologa v proizvodnem procesu, sočasno inženirstvo
 - Vloga tehnologa v proizvodnem procesu, sočasno inženirstvo
- Načrtovanje tehnologij iz vidika soodvisnost materialov, tehnologij -in dizajna:
 - Funkcionalnost izdelka: tehniška in estetska funkcionalnost
 - Integriteta površin, geometrijska natančnost in topografija
 - Tehnološko vrednotenje izdelave, razpoložljivosti in zmožnosti izdelovalnih postopkov
- Delitev in lastnosti nekonvencionalnih izdelovalnih tehnologij:
 - Primerjava uporabnosti konvencionalnih in nekonvencionalnih postopkov z vidika njihovih tehnoloških prednosti
 - Specifične lastnosti nekonvencionalnih postopkov (mehanski, elektrotermični, kemični in elektrokemični)
- Osnovni nekonvencionalni izdelovalni postopki z vidika ključnih atributov:
 - Elektroerozijska obdelava, Laserska obdelava, Plazemska obdelava
 - Obdelava z vodnim in abrazivnim vodnim curkom
- Ekonomsko vrednotenje ob upoštevanju relevantnih kriterijev:
 - Vpliv velikosti serije na izbiro tehnologije, Kvaliteta, stroški in čas izdobe, Kalkulacije stroškov nekonvencionalnih tehnologij



2



Načrtovanje tehnologije

1. "Inženirstvo je poklic, pri katerem je znanje matematike in naravoslovja pridobljeno s študijem, izkušnjami in prakso, predvarno uporabljeno za ekonomično izrabo naravnih dobrin v dobrobit človeštva."

ZVEZA INŽENIRJEV USA

2. "Inteligenca je razpoložljiva zmožnost izrabe lastnega znanja v novih okoliščinah in za reševanje novih problemov, učenje, predvidevanje problemov, uporabo simbolov ali povezav in abstraktno razmišljanje."

SLOVAR: WEBSTER DICTIONARY



3



Nekaj pojmov

Tehnologija

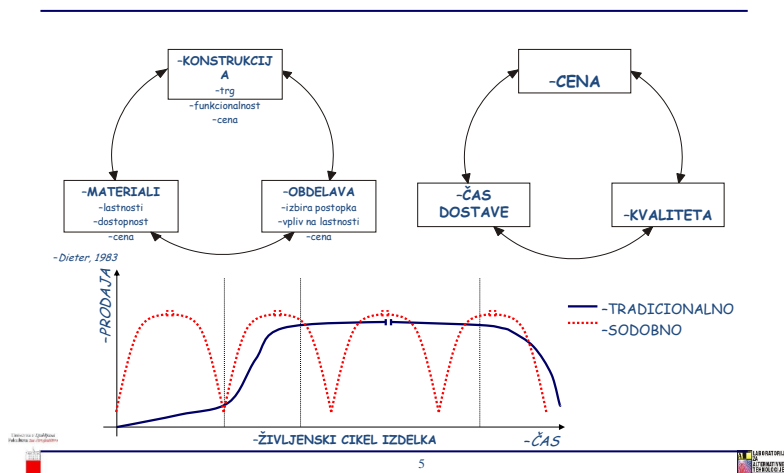
- Veda o pridobivanju surovin, obdelavi, predelavi materiala v izdelke. (SSKJ)
- Skupek postopkov takega pridobivanja, obdelave, predelave od začetka do končnega izdelka. (SSKJ)
- The practical application of science to commerce or industry [syn: {engineering}]. (Webster dictionary)
- The discipline dealing with the art or science of applying scientific knowledge to practical problems. (Webster dictionary)
- Technology is not an independent science, having a set of doctrines of its own, but consists of applications of the principles established in the various physical sciences (chemistry, mechanics, mineralogy, etc.) to manufacturing processes.



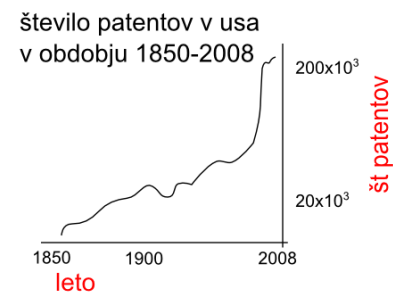
4



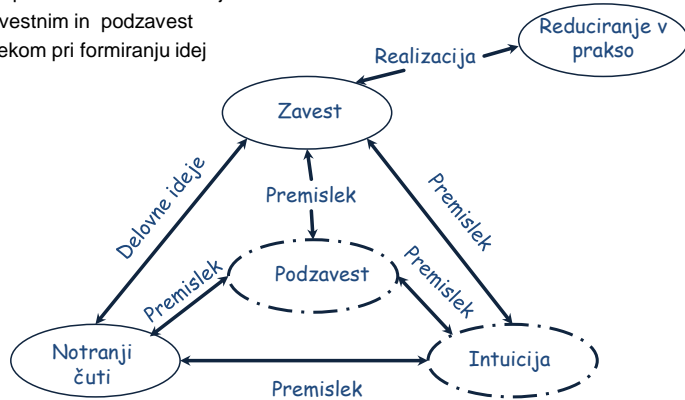
Dejavniki sodobne proizvodnje



Od ideje do izdelka dobra ideja:
Enostavna, adaptivna, lahka
poraba, zanesljiva univerzalna,
elegančna



Kreativni proces: stalna interakcija med zavestnim in podzavest razmislekom pri formiranju idej

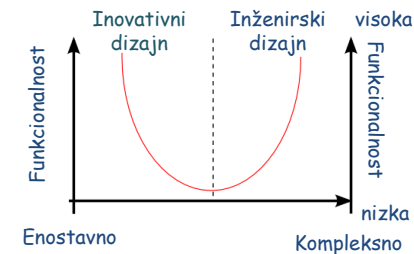


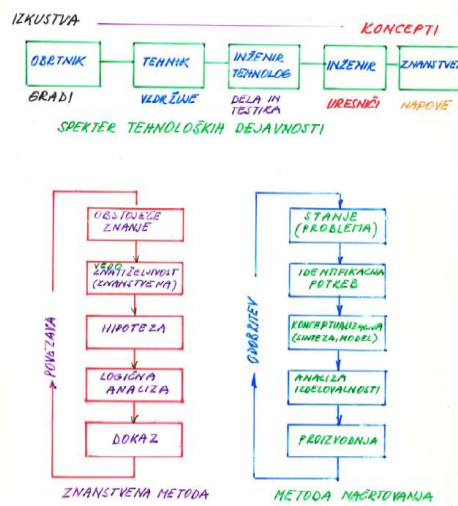
Osnovne lastnosti dobre ideje oziroma izdelka

1. Enostavnost
2. Eleganca
3. Zanesljivost

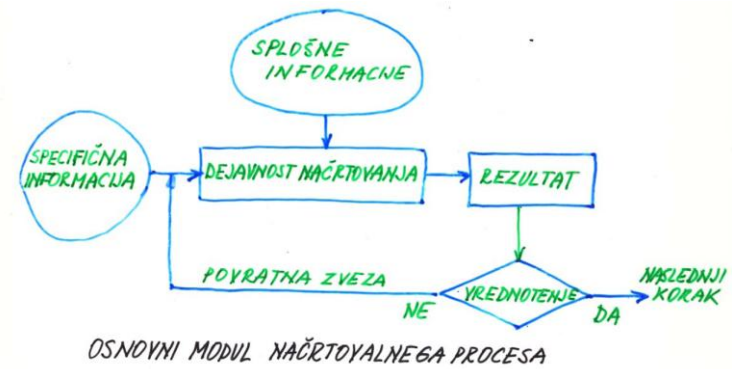
Od enostavnost -do- kompleksnosti

- kISS (paradigma)
- keep it
- simple
- stupid

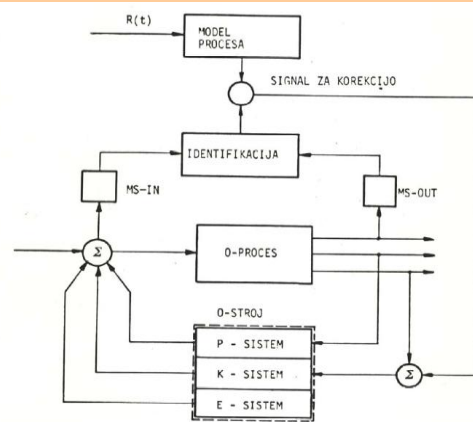




9



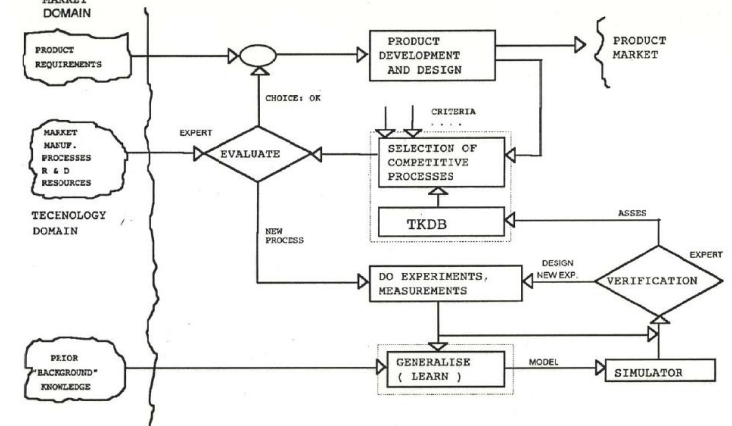
10



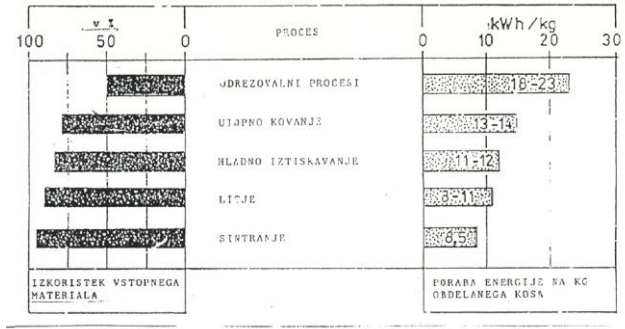
Slika 2.1: AC-obelovalni sistem z referenčno transferno funkcijo /19/

11

Block diagram of the decision making loop for process selection



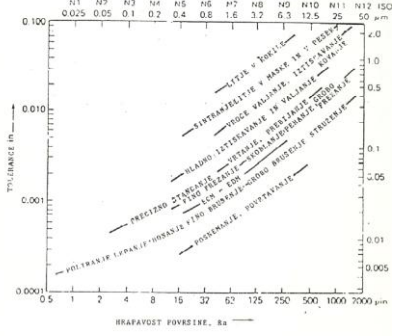
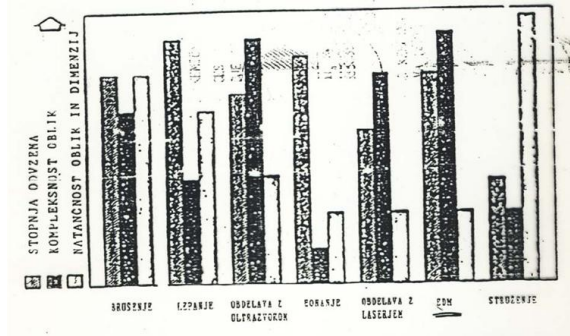
12



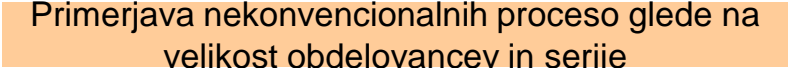
O.P. IZLAKE 89
PRIMERJAVA EFEKTIVNOSTI PROCESOV
Z VIDIKA IZKORISTKA MATERIALA IN
ENERGIJE



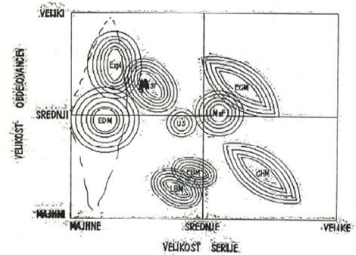
Material-Keramika



O.P. IZLAKE 89
SPOSOBNOSTI PROCESOV Z VIDIKA
OSEKANJA TOLERANC IN HRUAVOSTI



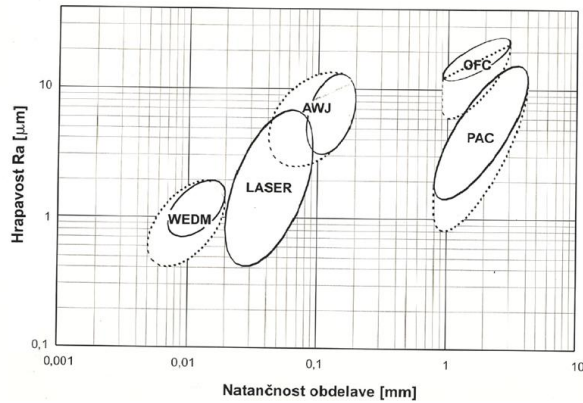
Primerjava nekonvencionalnih procesov glede na velikost obdelovancev in serije



- EDM - ODBELAVA Z ELEKTRONSKIM ZARKOM
- LBM - ODBELAVA Z LASERSKIM ZARKOM
- EDM - ELEKTROEROZIJSKA ODBELAVA
- ECM - ELEKTROKEMICNA ODBELAVA
- US - ULTRAZVOČNA ODBELAVA
- CHM - KEMIČNO ODVZEMANJE
- HSF - PREOBLIKOVANJE Z VELIKO HITROSTJO
- MAF - MAGNETNO PREOBLIKOVANJE
- EPI - PREOBLIKOVANJE Z EKSPLOZIJU

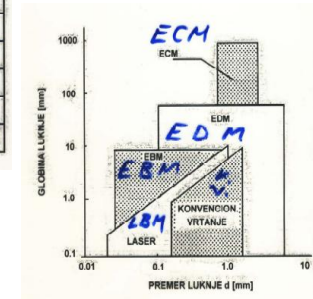


.Primerjava postopkov konturnega rezanja s stališča natančnosti in hrapavosti obdelave

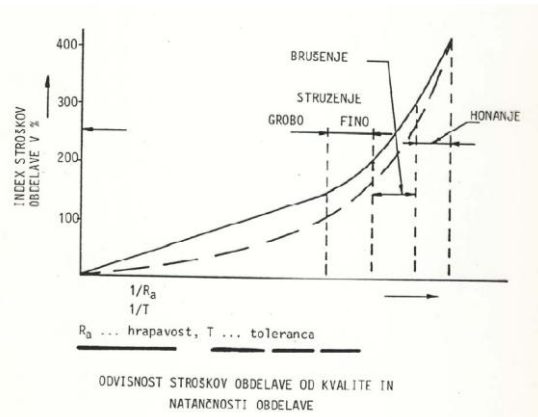


17

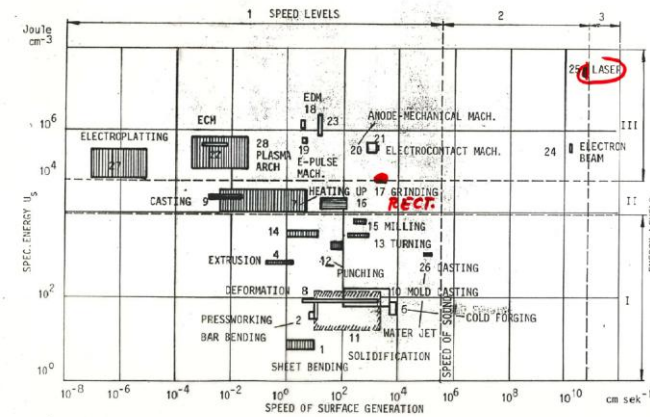
	DOSEGLJIVA NATANČNOST	HITROST OBDELAVE
EDM	0,01 mm	[Bar chart showing low speed]
KONVENCON. VRTANJE	> 0,02 mm	[Bar chart showing medium speed]
ECM	0,1 d	[Bar chart showing high speed]
LASER	0,06 d - 0,02 d	[Bar chart showing high speed]
EBM	0,05 d - 0,1 d	[Bar chart showing high speed]



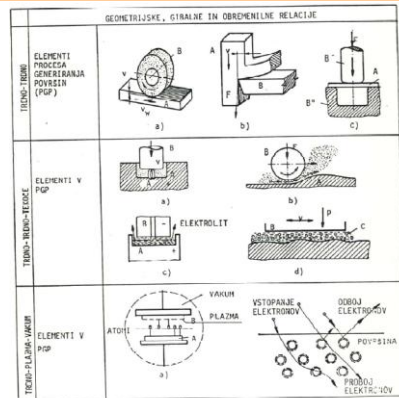
18



19



20

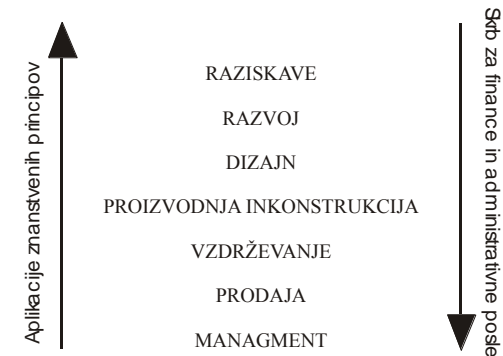


Slika 5.33: Medtokovni stiki pri procesih generiranja površin (POP)

POP - Proces generiranja površine

21

Spekter inženirskih aktivnosti



22

• Razvoj – tri industrijske revolucije

1. Parni stroj – izvor energije in stroj skupaj
2. Elektromotor – poveča se fleksibilnost in ekonomičnost proizvodnje
3. Informacija – postane del obdelovalnega sistema. Pretvori proizvodnjo iz ročne v operacijo na bazi znanja

• Razvite družbe

- 1/3 narodnega dohodka predstavlja proizvodnja
 - 2/3 servisne dejavnosti, ki v glavnem njej služijo
- Dohodek sloni na ekonomski učinkovitosti proizvodnje

• Avtomatizirana proizvodnja – integracija CIM

- 25% izdelkov velikoserijske avt. proizvodne linije
- 75% izdelkov maloserijske proizvodnje do 50 kosov
- 5% časa je izdelek v proizvodnem procesu ostalo čaka, od teh 5% le 30% časa je aktivna obdelava, 70% časa je vpenjanje, izpenjanje, pozicioniranje.

Sodobne metode (roboti, kontrola zalog, logistika, ...) povečajo čas aktivne obdelave od 5 – 90 %

24

- **Obdelovalna tehnika:** ena od dejavnosti industrije
- **Pri obdelavi se poveča vrednost surovca** – manjši stroški obdelave, cenejši izdelek – konkurenčen
- **Načrtovanje** – izbira obdelovalnih procesov za prehod surovca – izdelek. Upoštevati mora zahteve dizajna izdelka in jih vskladiti z zmožnostmi obdelovalnih procesov.
- **Banka podatkov o zmožnostih** – lastnih procesov. Sestoji iz atributov:
 - Oblike in velikosti, ki jih lahko zagotovi,
 - Dimenzijskih in geometričnih toleranc,
 - Kvalitete površine (dosegljive),
 - Velikost odvzema,
 - Relativni stroški,
 - Druge rezalne karakteristike in omejitve.



25



Povezava dizajn (**CAD**) – proizvodnja (**CAM**) je ključna zaradi hitrega razvoja novih tehnologij – fleksibilnost (primer: *design for manufacturing* upošteva "zaradi" pravila. Alternativni procesi – kompetitivnost v luči stroškov.

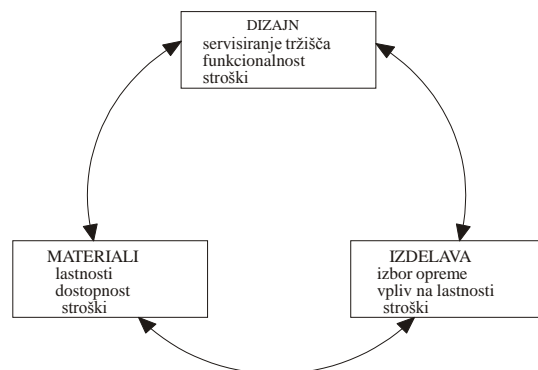
- Nobena rešitev ni dokončna, niti funkcionalnost izdelka!
- **Načrtovanje** (Experienced Based Planing):
 - Variantno; Sloni na podobnosti predhodnika
 - Generativno; Sloni na informacijah o procesu in jih sintetizira vedno znova
 - AI; Sloni na zmožnostih sistema, da izvaja funkcije človeka: sklepanje, načrtovanje, reševanje problemov



26



Medsebojne povezave dizajna, izdelave in materiala



27



Osnovna naloga pri obdelavi komponente je v izpolnitvi inženirskih zahtev po: dimenzijski natančnosti, obdelavi površin (Ra) in integriteti površin.

Tehnološke zahteve so lahko izpolnjene ob različnih stroških, ki bistveno vplivajo na konkurenčnost.

Konstruktor (dizajner) že v fazi načrtovanja komponente razmišlja o: alternativnih tehnoloških rešitvah, kompetitivnosti postopkov obdelave in vpliva materiala na funkcionalnost in glede na to prilagodi konstrukcijo.



28



Osnovna pravila v fazi načrtovanja so

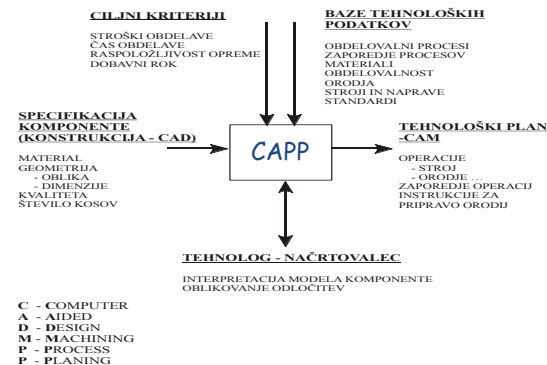
- Specificirati najširše možne tolerance in površino, ki še zadosti funkcionalnosti komponente;
- V posvetu z razgledanimi strokovnjaki raziskati alternativne izvedbe komponente, ki jo preje oklestiti nepotrebnih omejitev,
- Majhna sprememba v obliki izdelka, debelini stene ali radija bistveno poceni obdelavo
- Raziskati relacije med deli: komponento iz več delov je enostavnejše izdelati kot v celem.



29



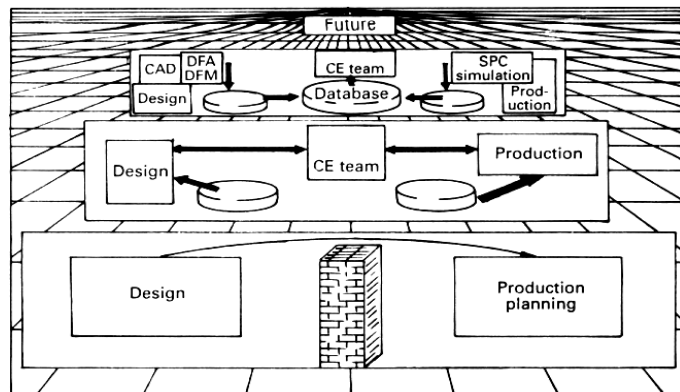
Aktivnosti računalniško podprtega načrtovanja proizvodnje



30



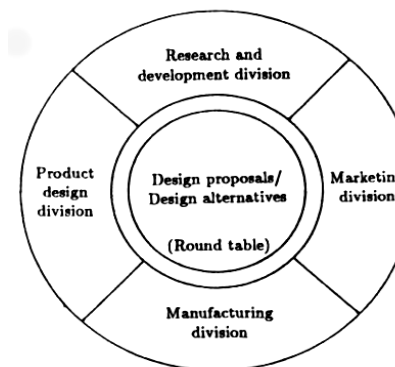
Stopnje razvoja načrtovanja



31



Izvajanje sočasnega inženiringa



32



Primerjava odvzema in toleranc za konvencionalne in nekonvencionalne procese obdelave

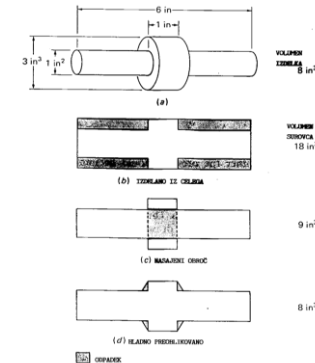
OBDELOVAL PROCES	MAX. STOPNJA ODVZEMA (cm ³ /min)	OBIČAJNA PORABA MOČI (kW/cm ³ /min)	HITROST OBDELOVAN. (m/min)	OBIČAJNA GLOBINA PRODIR. NA MIN (mm)	NATANČNOST		OBIČAJNA MOČ STROJA (kW)
					DOSEGLJIVA (mm)	PRI MAX. STOPNJI ODVZEMA (mm)	
Struženje	3300	0,046	76	-	0,005	0,13	22
Brušenje	820	0,46	30	-	0,0025	0,05	20
CHM	490	-	-	0,025	0,013	0,075	-
PBM	164	0,91	15	254	0,5	2,54	150
ECG	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
LBMLBT	0,0049	2,731	-	102	0,013	0,13	1,5



33



Vpliv dizajna in obdelovalnih procesov na porabo materiala



34



Inženirska ekonomika

.Vloga inženirja pri ekonomskih odločitvah in odločitvah o ekonomičnosti v podjetju in v proizvodnji

- **EKONOMIJA** je skrb za varčno izrabo dobrin
- **EKONOMIKA** je skrb za finance

Inženirski poklic v uveljavljanju na dveh nivojih:

- nivo podjetja,
- nivo proizvodnje.

Na nivoju podjetja se skrb za ekonomijo in ekonomiko kaže v vključevanju pri strateških odločitvah, kot so:

- zasledovanje trga,
- razvoj novih izdelkov,
- uvajanje novih tehnologij.



35



Na nivoju proizvodnje se ukvarja s konkretnimi problemi v verigi dejavnosti CAD/CAPP/CAM (konstrukcije tehnološkega načrtovanja in izdelave).

Te dejavnosti so tesno povezane s produkcijskimi faktorji:

- delo,
- delovna sredstva,
- kapital.

DELO - skrb za delo - sestoji iz resursov delovne sile, ki jo opišemo z kvalitativnimi in kvantitativnimi atributi:

- kvalitativni atributi - znanje, motivacija, ...
- kvantitativni atributi - število delavcev, število delavnih ur, ...

DELOVNA SREDSTVA - skrb za delovna sredstva - so v obliki zemlje, stavb, strojev in orodij.

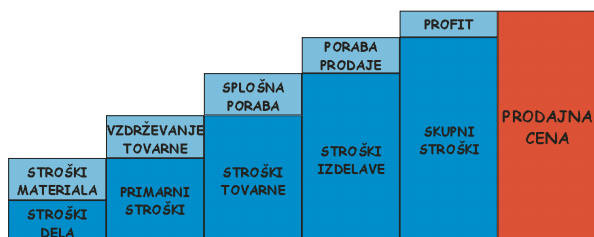
KAPITAL - skrb za kapital-tu je posredna skrb za kapital, preko preišljene uporabe tehnologij in ekonomičnosti proizvodnje ob uporabi kalkulacij stroškov izdelave in upoštevanju alternativnih rešitev.



36



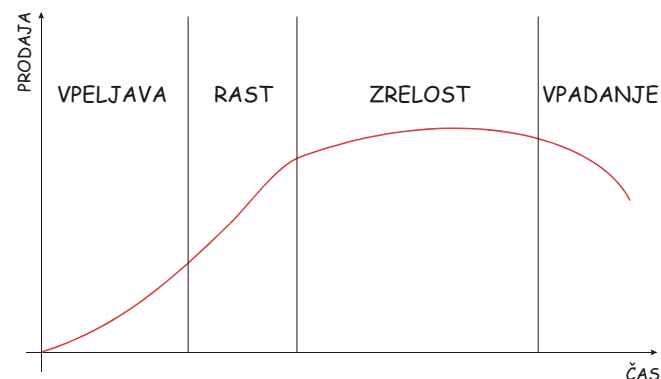
Postavke stroškov, ki določajo končno ceno izdelka



37



Življenjski cikel izdelka



ŽIVLJENJSKI CIKEL IZDELKA



38



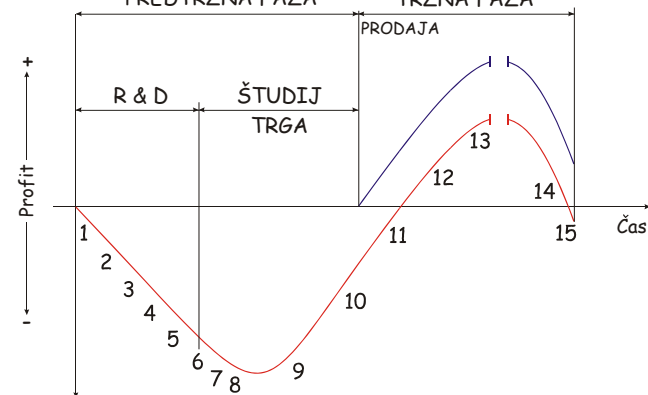
PREDTRŽNA FAZA	TRŽNA FAZA
1. Generiranje ideje	9. Vpeljava proizvoda
2. Vrednotenje ideje	10. Razvoj - širitev
3. Analiza izdelovalnosti	11. Hitra rast
4. Tehnični R & D	12. Kompetitivnost trga
5. Izdelkovni (tržni) R & D	13. Zrelost
6. Predhodna proizvodnja	14. Upad
7. Test trga	15. Opustitev
8. Komercialna proizvodnja	



39



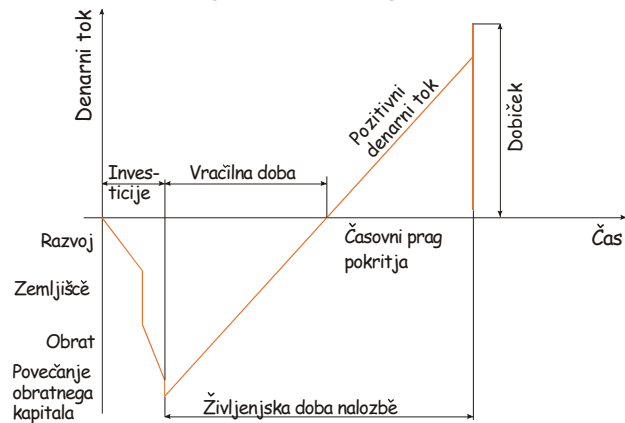
PREDTRŽNA FAZA TRŽNA FAZA



40

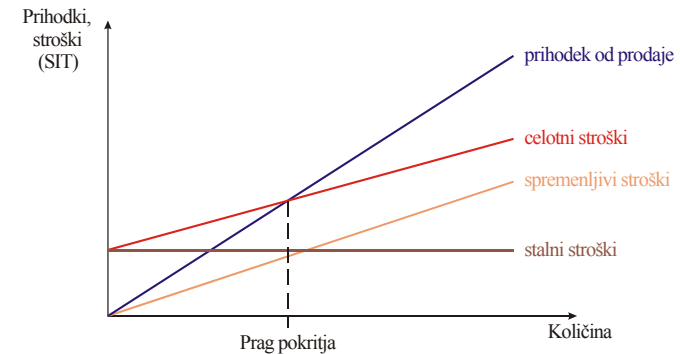


Značilen potek denarnega tokapri naložbi v postavitev novega proizvodnega obrata



41

Prag pokritja

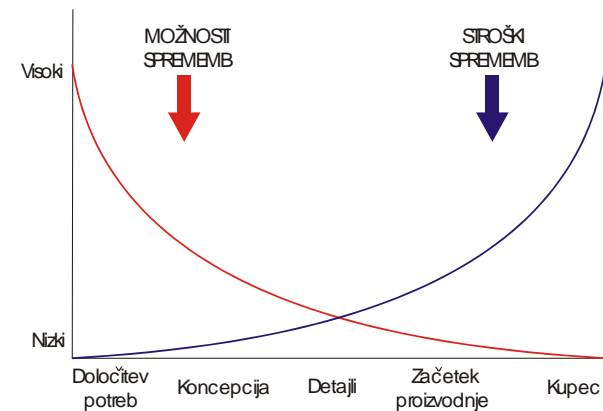


42

- Osnovna naloga pri obdelavi komponente je v izpolnitvi inženjerskih zahtev po:
 - dimenzijski natančnosti,
 - obdelavi površin (Ra) in
 - integriteti površin.
- Tehnološke zahteve so lahko izpolnjene ob različnih stroških, ki bistveno vplivajo na konkurenčnost.
- Konstruktor (dizajner) že v fazi načrtovanja razmišlja o:
 - alternativnih tehnoloških rešitvah,
 - kompetitivnosti postopkov obdelave in
 - vpliva materiala na funkcionalnost in glede na to prilagoditi konstrukcijo.

43

Možnosti sprememb na vходу izdelave proizvoda



44

Mesta in vzroki nastajanja stroškov

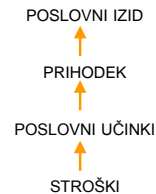
(vir: Ekonomika poslovanja, MIRAN Mihečič, ISBN 961-6209-00-0)

Stroške razporejamo na **STROŠKOVNA MESTA** in na **STROŠKOVNE NOSILCE**.

STROŠKOVNA MESTA

Stroškovna mesta so zaokrožene funkcionalne, poslovne ali prostorske enote na katerih nastajajo stroški in za katere vemo izvor odgovornosti.

Stroški morajo opravičevati poslovni izid (izdelek ali storitev)



45

Primeri stroškovnih mest:

- Funkcionalno opredeljena stroškovna mesta (prodajna služba, razvojna služba, ...)
- Prostorsko opredeljena stroškovna mesta (obrat livarne – Škofja Loka, obrat valjarne – Jesenice, zastopstvo Ljubljana)
- Stvarno opredeljena stroškovna mesta (modulna hiša, kontejner, ...)

Namen opredelitve stroškovnih mest je predvsem v:

- Pregled nastajanja stroškov glede na stroškovna mesta
- Določitev natančnega izvora stroškov – kdo je strošek povzročil

Stroškovna mesta delimo na :

- Proizvodna (glavne, stranske in neindustrijske dejavnosti)
- Režijska in neproizvodna stroškovna mesta

Stroškovni Nosilci

Glede na razporejanje stroškov na stroškovna mesta ločimo:

- **IZVIRNE STROŠKE**: te lahko neposredno pripišemo posameznemu stroškovnemu mestu – npr. stroški dela, vzdrževanja določene opreme, amortizacije, potnih stroškov, ...
- **POSREDNE STROŠKE**: pri teh uporabljamo dogovorjene ključne za porazdelitev na posamezna stroškovna mesta (porabljena energija, površina delovnega prostora, ...)

Izvirne stroške določimo po enačbi:

$$VIST = NEPOSREDNI\ STROŠKI\ S.\ MESTA + (B/C) * D$$

VISTvsi izvorni stroški mesta

B posredni stroški

C ključ oz. dogovor za razdelitev posrednih stroškov v združbi kot celoti

D podlaga ali dogovor za razdelitev posrednih stroškov pri določenem stroškovnem mestu SM

47

- Vsi stroški, ki nastajajo na stroškovnih mestih, nastajajo zaradi končnega proizvoda, ki je lahko idelek ali storitev. Izdelki ali storitve morajo nastale stroške upravičiti oz. prenesti (v končni fazi se prenesejo na prodajno ceno).

- Poslovne učinke – izdelke ali storitve imenujemo stroškovne nosilce. Glede na način nastajanja jih delimo v:

- Začasni stroškovni nosilci – ti še ne zapuščajo združbe (vmesni polizdelki, ki še nadaljujejo pot obdelave)
- Končni stroškovni nosilci – ti zapuščajo združbo z odprodajo (končni izdelki v katere so vgrajeni tudi polizdelki)

- Poznavanje stroškov po stroškovnih nosilcih je ključnega pomena za:

- Določanje cene s katero bomo nastopili na trgu
- Določanje alternativ proizvodnje
- Določanje strategije pri nakupu novih tehnologij ali naprav (odločanje na nivoju investicijsko-tehničnih odločitev)

48

Določanje polne lastne cene izdelka ali storitve

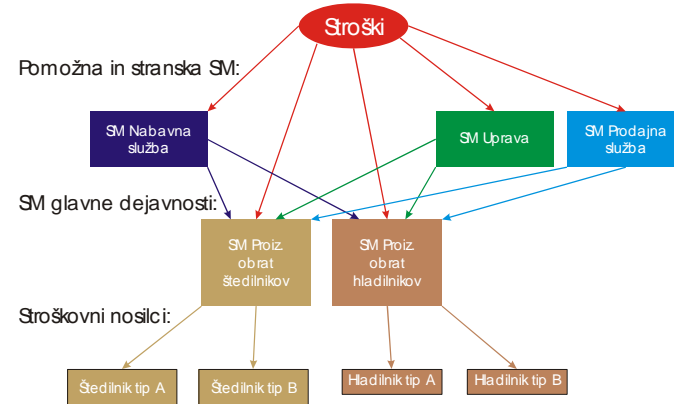
- Za vrednotenje polne lastne cene izdelka ali storitve porazdelimo vse v nekem obdobju nastale stroške na enoto izdelka ali storitve. Pri tem upoštevamo:
 - Neposredne materialne stroške
 - Neposredne osebne dohodke
 - Posredne ali splošne stroške vezanih na pridobivanje poslovnih učinkov (proizvodna režija – izdelkov ali storitev)
 - Posredni ali splošni stroški izven funkcije pridobivanja poslovnih učinkov (režija uprave)



49



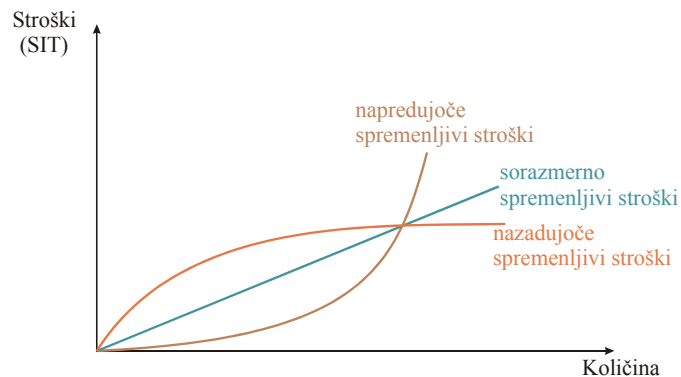
Razporejanje stroškov na stroškovna mesta in prenašanje stroškov na glavna stroškovna mesta ter iz njih na stroškovne nosilce



50



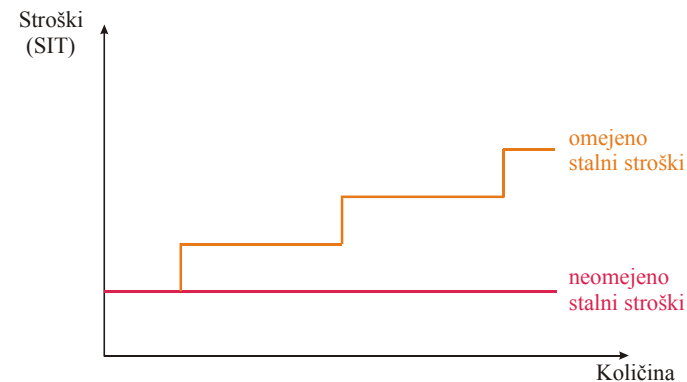
Spremenljivi stroški



51



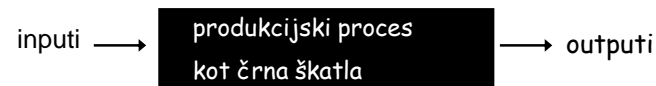
Stalni stroški



52



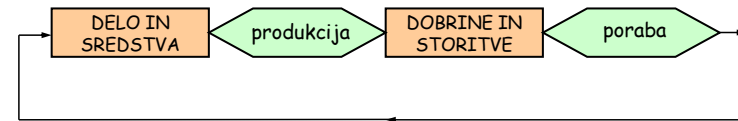
Produkcija kot tehnični in družbeni proces



53



Proces materialne reprodukcije



54



Dobrine, ki jih potrebujemo večinoma ne izhajajo iz narave temveč jih proizvajamo. Pri proizvodnji pa gre za tri temeljna vprašanja:

1. Kaj in v kakšnih količinah prizvajati ?
2. Kako producirati – kdo in s kakšno tehnologijo ?
3. Za koga producirati dobrine ?

Proizvajati je torej potrebno gospodarno ob upoštevanju sledečih prvin:

- » Človeške potrebe
- » Omejenost sredstev za zadovoljitev potreb
- » Zavestna dejavnost za zmanjšanje omejenosti sredstev

Proces produkcije se nenehno obnavlja zaradi vse večjih in novih zahtev po dobrinah. To obnavljanje imenujemo reprodukcijski proces.

Proces materialne reprodukcije je obnavljanje produkcije dobrin in storitev v katerem se porabljajo delo in sredstva ob udeležbi kapitala.



55



Družbeni reprodukcijski proces vključuje ljudi, ki v njem nastopajo v okviru produkcijskih odnosov. Poleg informacijskih tokov, ki popisujejo te odnose pa v produkciji prihaja tudi do materialnega toka katerega obliko in uspešnost opredeljuje razvitost tehnologije.

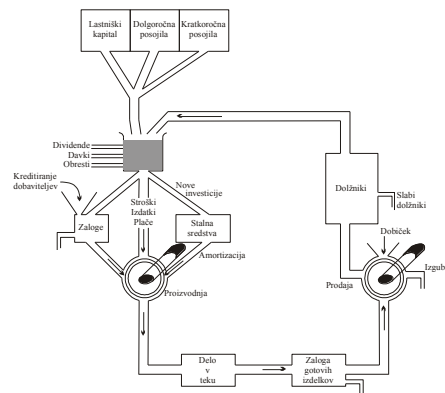
Medsebojne odnose ter materialni tok je voden s pomočjo ekonomskega koordinacijskega mehanizma. Ta mehanizem je značilen za posamezne družbe s čimer so podane osnove za alternativno izbiranje odločitev. Uspešnost koordinacijskega mehanizma odražadobrobit celovite družbe in kakovosti življenja.



56



Shema poslovnih tokov



57

Vrste podjetij in struktura

Po velikosti so: mikro (10 zap.), mala (125 zap.), srednja (500 zap.), velika (>500 zaposlenih).

VRSTA PODJETJA	Prednosti	Pomankljivosti
individualni lastnik	majhno podjetje potreben mali kapital hitro odločanje močna spodbuda neodvisnost dobička povečanje premoženja	neomejena odgovornost veliko tveganje omejena proizvodnja višje cene žrtvovan prosti čas
družabništvo (partnerstvo)	pridobivanje kapitala vključitev družine dopolnjuječi partnerji delitev odgovornosti večje poslovne možnosti	neomejena odgovornost spori z družbeniki omejeno število partnerjev
družba (podjetje) z omejeno odgovornostjo	hitrejša kapitalizacija omejena odgovornost prilagodljivost lažji razvoj večje poslovne možnosti delniška lastnina	delnice (n)so na borzi omejeno kapitalizacije zunanjji nadzor
delniška družba (korporacija)	omejena odgovornost hitra kapitalizacija velika proizvodnja lažje financiranje specializirani menadžment	dražje ustanavljanje počasno prilagajanje hierarhična uprava javna poslovanje delitev lastnikov in menadžerjev

58

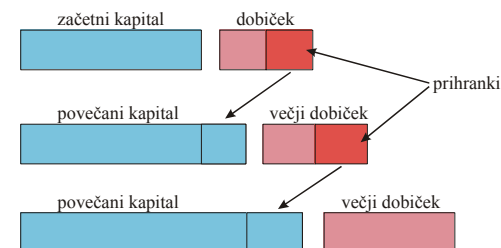
Ekonomski koordinacijski mehanizem



59

Vlaganje dobička v kapital - dva vzroka

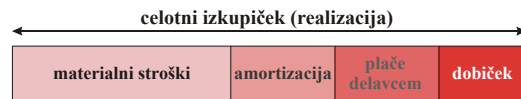
1. Konkurenca
2. Kapital povečuje dobiček



60

Produksijski faktorji

1. Narava
2. Delo
3. Kapital



61

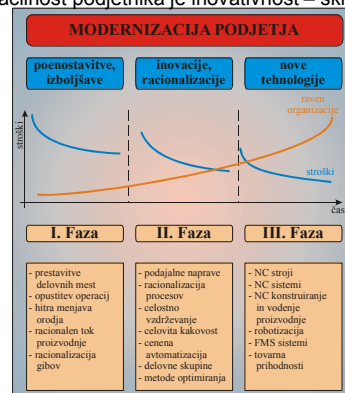


62



Podjetništvo in inovacije

Poglavitna značilnost podjetnika je inovativnost – skrb za preživetje.



63



Nekonvencionalni postopki

Principi in modeli odnašanja

Vsebina:

- *uvod*
- *mehanski procesi*
- *elektro termični procesi*
- *kemični in elektro kemični procesi*



64



Uvod

- Vse trši in težko obdeljivi materiali z zahtevano natančnostjo, so povzročili potrebo po novih orodjih na osnovi energijskih žarkov.
 - Ločimo tri vrste odnašanj s pomočjo energijskih žarkov:
1. Obdelava z energijskimi,
 2. Odnašanje z atomskim ali molekularnim energetskim žarkom
 3. Odnašanje s plazemskim žarkom



65



1. Obdelava z energijskimi žarki

Energy beam processing – ni trdnega orodja, ni obrabe, procesirana energija v raznih oblikah je neposredno dovedena v tok obdelave v obliki žarka:

- Fotonski žarek
- Elektronski žarek
- Ionski žarek
- Atomski molekularni žarek
- Plazemski žarek
- Kemični, elektrokemični reaktivni reakcijski energijski obdelovalni žarek



66



2. Odnašanje z atomskim ali molekularnim energetskim žarkom

- Sestoji se iz nevtralnih atomov ali molekul pridobljenih s termičnim uparjanjem v sled gretja z elektronskim žarkom v vakumski cevi ($10^{-7} - 10^{-8}$ pa)
- Kinetična energija atomov ali molekul je majhna (1ev). Rezultat uparjanja je nanos tankega filma



67



3. Odnašanje s plazemskim žarkom

- Plazma je električno prevodno stanje plina z enakim številom ionov in elektronov
- Pri atmosferskem tlaku se plazma pojavi v obločni razelektritvi plina pri temperaturi plina 10 000 do 20 000 k. Atomi inertnega plina, H₂ in O₂ itd.. Sprva razpadejo na ione in elektrone in se pod vplivom bombardiranja s prostimi elektroni pospešijo v plinski razelektritvi.



68



Nekonvencionalni postopki

Izraz **nekonvencionalni postopki** je na področju obdelovalnih tehnologij najbolj razširjen ter združuje postopke, ki imajo sledeče fizikalne ter tehnološke značilnosti:

- Visoko hitrost generiranja površine,
- visoko specifično energijo pri odvzemanju materiala,
- odzvem je posledica kompleksnih fizikalnih in kemijskih procesov,
- njihov razvoj in aplikacije so v stalnem vzponu,
- uporabni so za trde, krhke in tako imenovane eksotične materiale,
- uporabni so za obdelavo zelo kompleksnih oblik,
- prikladni so za avtomatizacijo in zajemanje podatkov,
- izpolnjujejo zahteve po visoki integriteti površin in natančnosti,
- primerni so za izdelavo miniaturnih izdelkov,
- ni neposrednega vpliva obrabe orodja na proces.



69



Velikostni red enote odnešenega materiala

e – specifična energija

s; za odrezek se močno razlikuje zaradi vzrokov nastanka odrezka ki so pogojeni z defekti zasnovanimi v področju med površinskega stika (processing unit size – velikost procesirne enote)

MEHANSKA OBDELAVA

pri konvencionalni obdelavi igra poglavitno vlogo zrušilna trdnost generirana na rezalnem robu trdnega orodja; posledica tega pa je odrezek.

OBDELAVA Z ŽARKOM

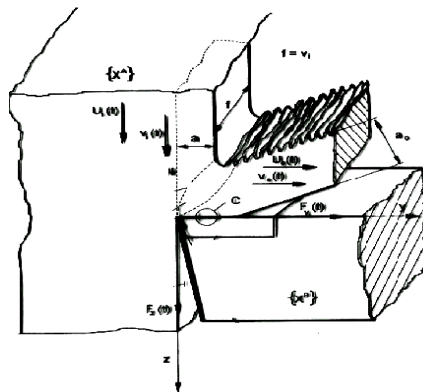
odnašanje nastaja zaradi povečanja notranje energije atomov v obdelovancu. posledica: odnašanje atom po atom" atomic scale processing" nanotehnologija, mikrotehnologija, majhne obremenitve, majhen HAZ - "heat affected zone"



70



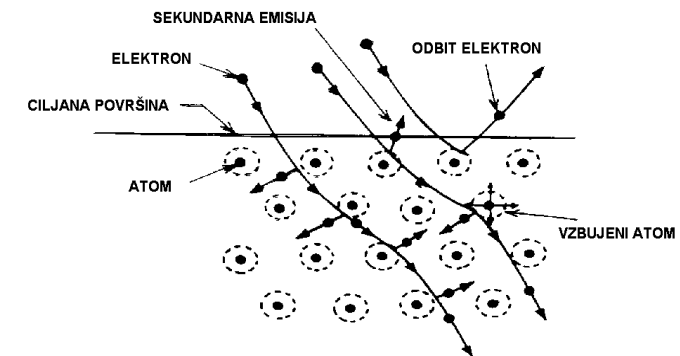
Razmere pri odrezovanju



71



Razmere pri nekonvencionalnih postopkih



72



Odnašanje z ionskim žarkom

Ločimo: dinamično (bombardiranje) in reaktivno odnašanje

dinamično – ionski žarek se setoji iz visoko energetskih pospešenih ionov inertnega plina (argon). odnašanje se vrši z izbijanjem atomov iz površine ob elektroelastičnih trkih in odskopih usmerjenih ionov in ciljanih atomov – ionsko špricanje.

za razliko od elektronskega deluje ionski žarek deluje na površinske atome.



73



Odnašanje s kemičnimi ali elektrokemičnimi reaktivnimi energetskimi žarki

Odnašanje se odvija z žarkom kemičnega ali elektrokemičnega reagenta v plinskem ali tekočem stanju.

Odnešene delce spira prisilni tok sicer bi spirali reakcijo:

$$U = g + h + e_e + e_k$$

G...Prosta energija vezana na reakcije

Osnovni proces reakcije je vezana na molarno aktivacijsko energijo q_a (j/m) in začetnega g_i in končnega g_8 gibsove molarne energije

$$\Delta G = G_I - G_8$$



74



Odnašanje s fotoni na tri načine

- 1) TOPLOTNO: Energija žarka se absorbira kot termična vibracija atomov v površini nepropustne snovi (opaque material) sprememba ftonske energije v toplotno premer žarka $10\mu\text{m}$, moč 10^6 do 10^7 MW/m²
- 2) Fotonska energija v toplotno širšem območju s prenosom toplote
- 3) Fotonska energija aktivira reaktivno substanco v površini transparentne snovi



75



Odnašanje z elektronskim žarkom

Ločimo odnašanje s termičnim, kemičnim in elektrokemičnim delovanjem

UPORABLJEN: VISOKONAPETOSTNI POSPEŠEN (10kv)
Elektronski žarek nizkega toka (1a)
Premer žarka $1\mu\text{m}$, gotota energije 10^4 mW/m²

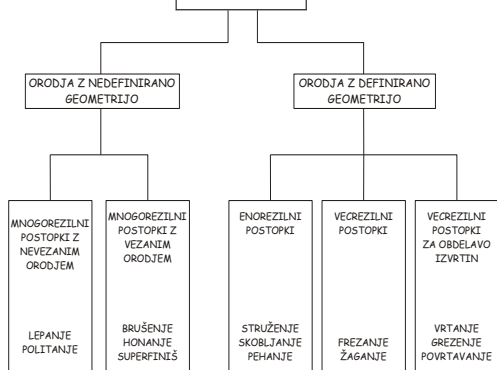
- Reintegracija ionov in elektronov je karakteristična; rezultirajoča energija (združitve) se pretvori v toplotno vibracijsko tako združenega atoma – ali pa se sprosti v obliki fotona.



76



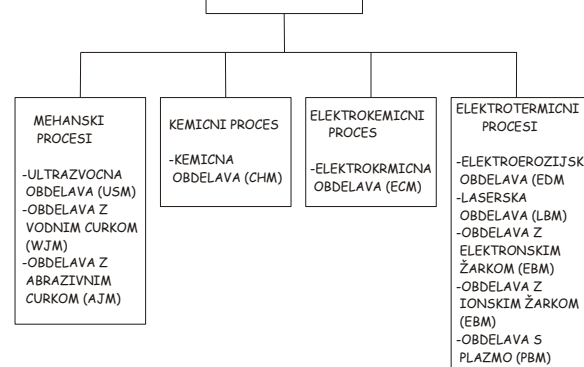
ODREZAVANJE



77

NEKONVENCIONALNI POSTOPKI

ODNAŠANJE

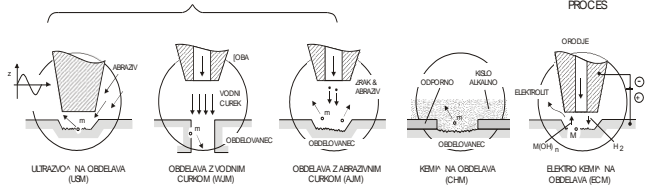


78

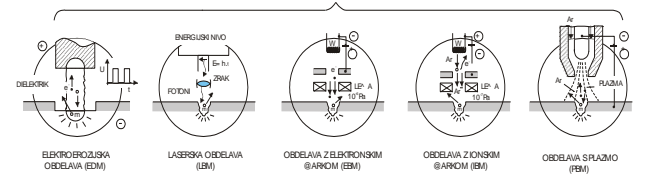
MEHANSKI PROCES

KEMIA NI PROCES

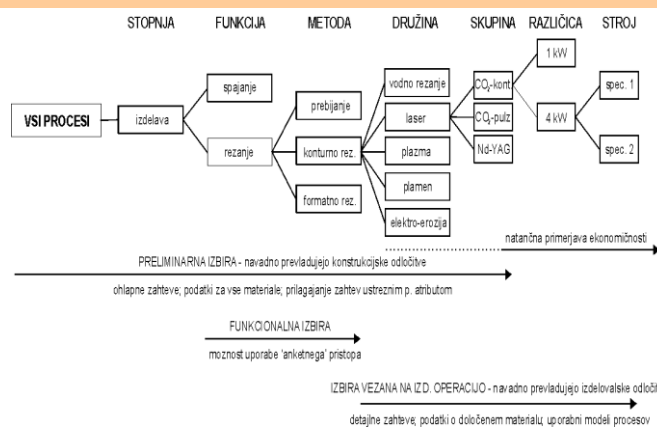
ELEKTRO KEMIA NI PROCES



ELEKTRO TERMIA NI PROCES

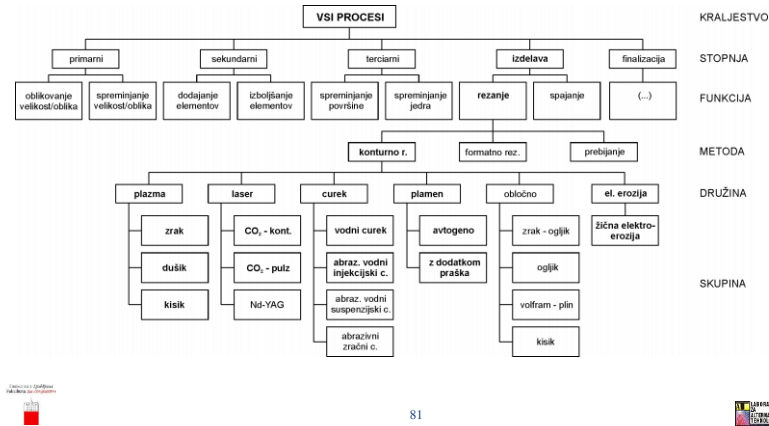


79



80

Delitev procesov



81

Mehanski nekonvencionalni postopki obdelave

Obdelava z abrazivnim curkom

Obdelava z abrazivnim tokom

Obdelava z vodnim curkom (VC)

Obdelava z abrazivnim VC (AVC)

Obdelava polne oblike

82

Obdelava z vodnim curkom (AVC)

Water Jet Machining (WJM)

stik: **tekoče-trdno**

aplikacije:

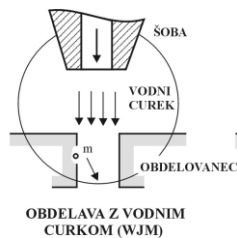
razrez, površinska obdelava – vnos zaostalih napetosti, odstranjevanje srha

princip:

visokohitrostni vodni curek zadeva ob površino obdelovanca povečuje razpoke in odnaša material.

integriteta površine:

tekstura: naključna, brazdava
HAZ: ni
zaostale napetosti: pri rezanju zanemarljive



83

Obdelava z abrazivnim vodnim curkom

Abrasive Water Jet Machining (AWJ)

stik: **tekoče-trdno**

aplikacije:

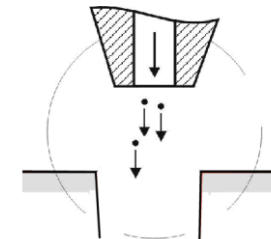
razrez

princip:

visokohitrostni vodni curek z dodanim abrazivom zadeva ob površino obdelovanca in odnaša material.

integriteta površine:

tekstura: naključna, brazdava
HAZ: ni
zaostale napetosti: pri rezanju zanemarljive



84

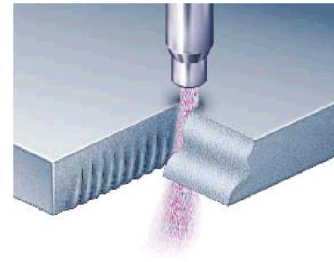
Uporaba: za razrez zahtevnih oblik in večjih debelin



85



Značilnosti obdelave z AVC



visokohitrostni vodni curek pomešan z abrazivom odnaša material

razrezujemo lahko tako krhke, kot tudi žilave materiale

rezanje z AVC ne povzroča toplotno prizadete cone

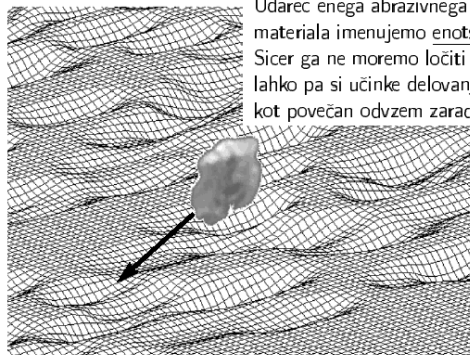
značilna tekstura in koničnost reza sta posledici dinamike procesa in omejujeta uporabnost



86



Fizikalni principi-enotski dogodek procesa



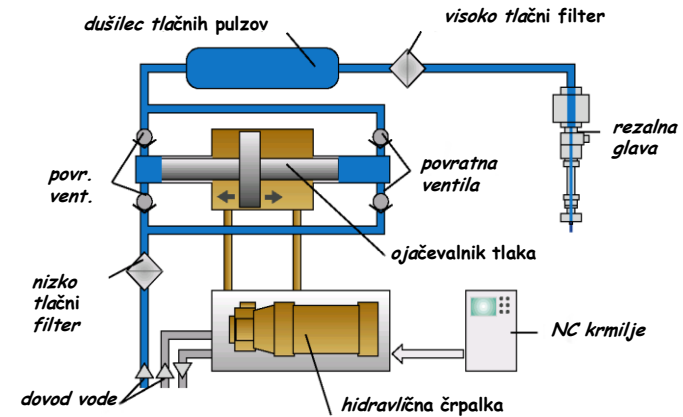
Udarca enega abrazivnega zrna ob površino materiala imenujemo enotski dogodek. Sicer ga ne moremo ločiti od delovanja vode, lahko pa si učinke delovanja vode predstavljamo kot povečan odvzem zaradi udarca abrazivnega zrna.



87



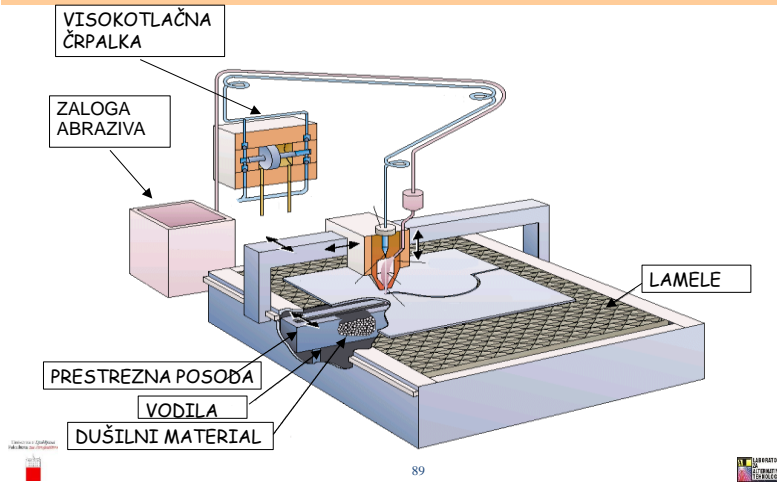
Shema generatorja visokega tlaka



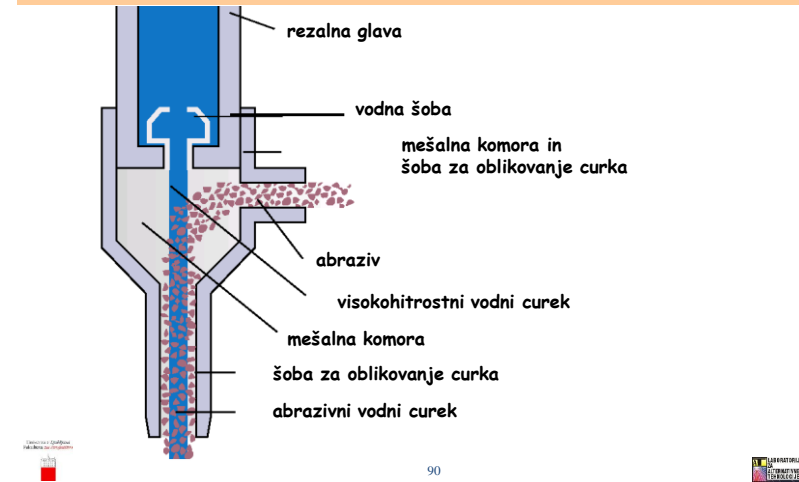
88



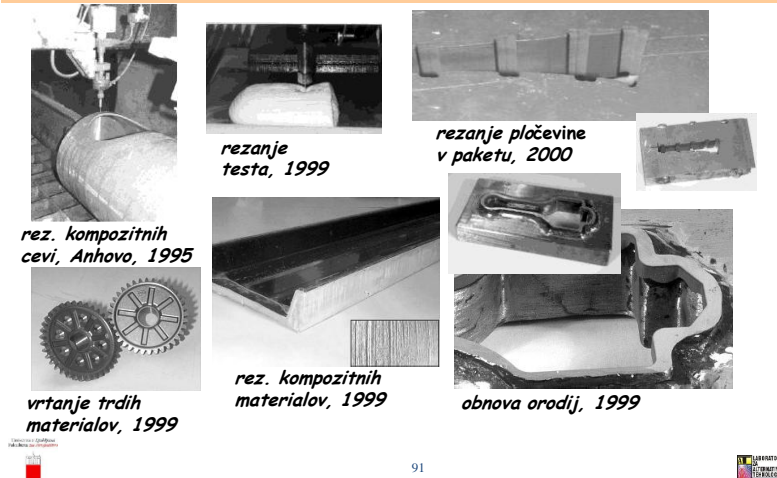
Naprava za rezanje z AVC



Shema rezalne glave

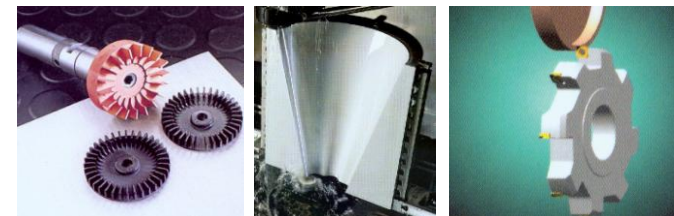


Paleta izdelkov izdelanih v lat

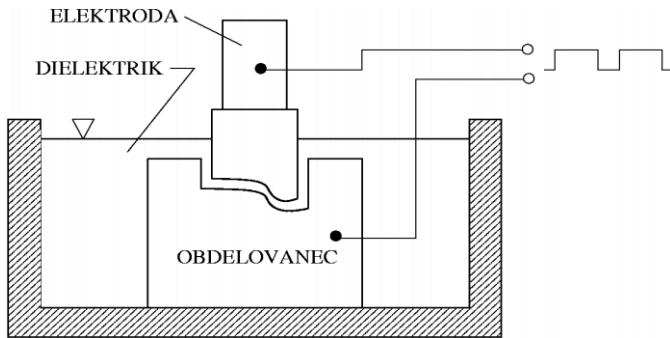


Elektroerozijski postopki obdelave

- Potopna elektroerozija (SEDM)
- Žična elektroerozija (WEDM)
- Elektroerozijsko brušenje (EDG)



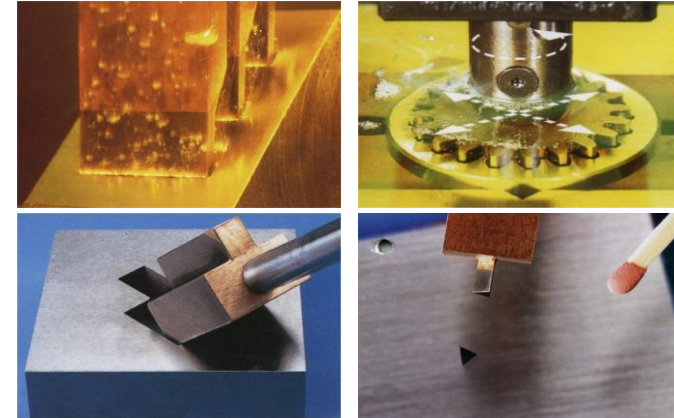
Princip elektroerozijske obdelave



93



Primeri SEDM obdelave



94



Karakteristike EDM procesa (1/2)

- Na nekaterih strojih je mogoče izdelati zrcalno gladke površine (**$Ra=0,04 \mu m$**). Obdelava lahko traja tudi nekaj dni, zato se ponavadi obdela do hrapavosti $Ra=2-3 \mu m$, do zahtevane hrapavosti pa se nadalje obdela s poliranjem.
- Dosega se relativno majhne volumnske odvzeme (**$0,3 \text{ cm}^3/\text{min}$** pri grobi obdelavi).
- Na površini ostane toplotno prizadeta plast (HAZ), ki je trša od osnovnega materiala (60 HRC) vendar izredno krhka in polna razpok. Njena debelina je odvisna od parametrov obdelave (**$1-40 \mu m$**). Za dolgo življensko dobo orodij moramo to plast odstraniti s finim brušenjem ali poliranjem.



95



Karakteristike EDM procesa (2/2)

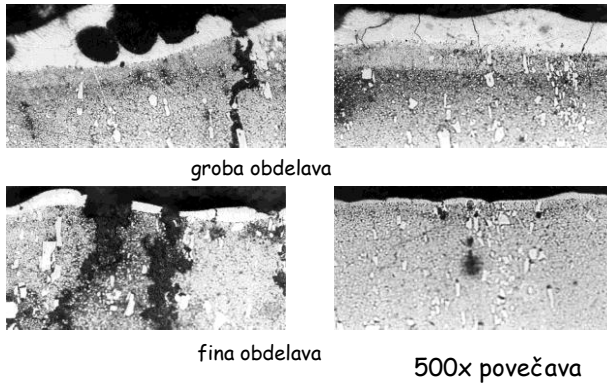
- Natančnost obdelave je **$0,01 \text{ mm}$** (do $2,5 \mu m$).
- Obdeluje se vse električno prevodne materiale; s posebnim postopkom je mogoče obdelati tudi neprevodne materiale, kot so neprevodna keramika, diamant.
- Mehanske lastnosti materialov imajo zanemarljiv vpliv na obdelovalnost.
- Dielektrik je pri SEDM obdelavi mineralno olje, pri WEDM pa deionizirana voda.



96



Primeri toplotno prizadete plasti



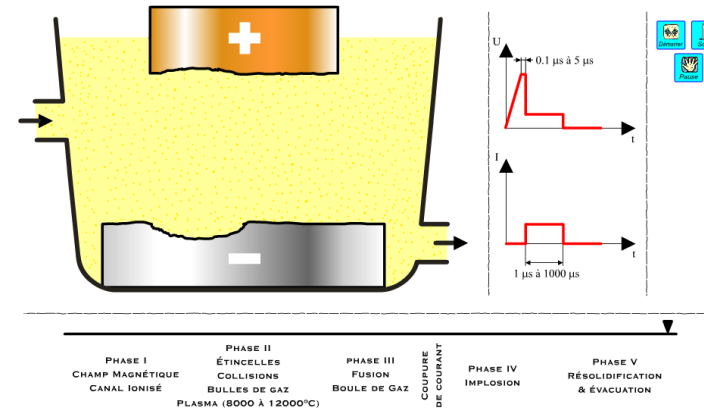
groba obdelava

fina obdelava

500x povečava



97



PHASE I
CHAMP MAGNÉTIQUE
CANAL IONISÉ

PHASE II
ÉTINCELLES
COLLISIONS
BULLES DE GAZ
PLASMA (8000 à 12000°C)

PHASE III
FUSION
BOULE DE GAZ

PHASE IV
IMPLOSION

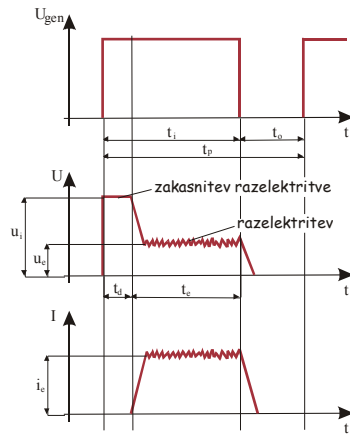
PHASE V
RÉSOLIDIFICATION
& ÉVACUATION



98



Parametri razelektritev

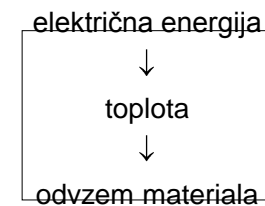


99



Pri eni razelektritvi (enotni dogodek) obravnavamo štiri fenomene

1. Električni preboj dielektrika
2. Porazdelitev električne moči
3. Prenos toplote
4. Odvzem materiala



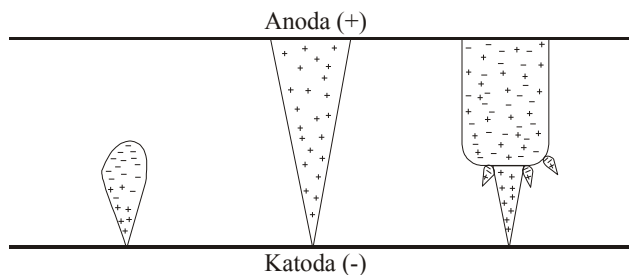
Posebej bomo obravnavali dodatne efekte.



100



Preboj izolacijske plasti dielektrika med katodo in anodo

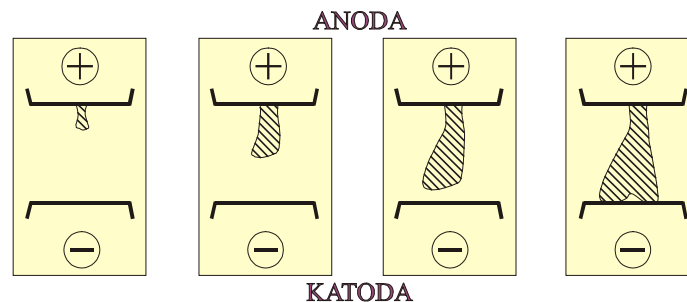


101



Preboj – druga faza

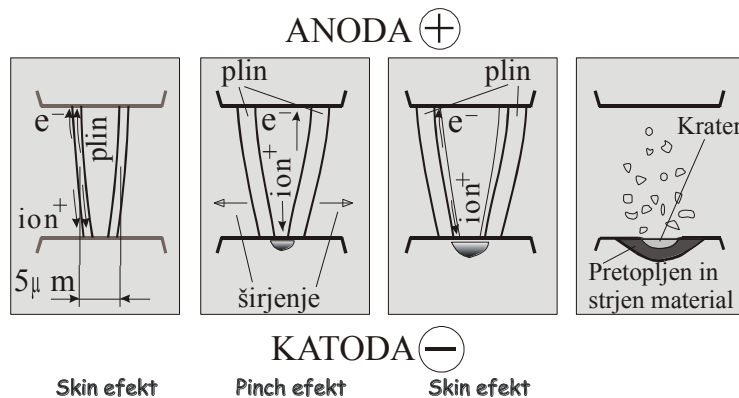
- Zaradi fotoionizacije nastane sekundarni plaz ionov(+) iz anode imenovan tudi pozitivni žarek.
- Znak za začetek formiranja žarka je svetloba na anodi



102



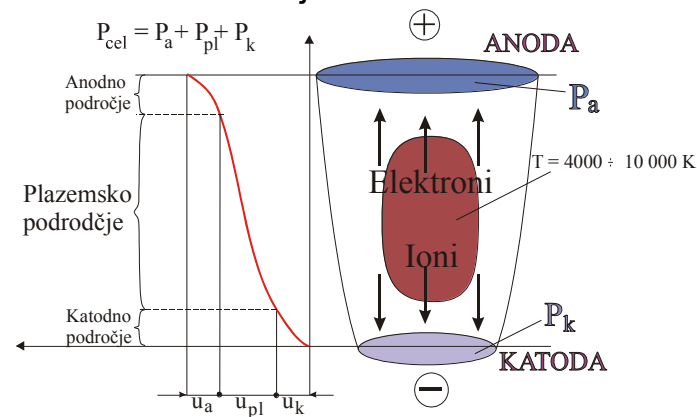
Kanal plazme med razelektritvijo



103



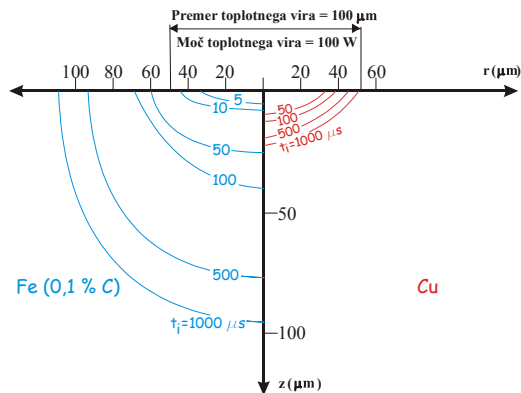
Področja razelektritve



104



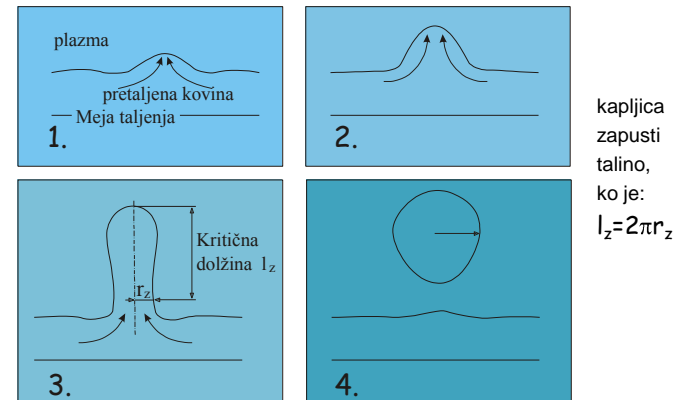
Meje taljenja materiala



105



Tvorba kapljice



106



Povzetek o fenomenih pri razelektritvi (1/3)

- Inicijacija razelektritve:
 - 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.



107



Povzetek o fenomenih pri razelektritvi (2/3)

- Segrevanje:
 - Tok elektronov in ionov povzroča segrevanje anode in katode, za kar se porabi večina električne moči. Temperatura elektrod in gostota električnega toka vplivata na razmerje toka ionov in elektronov, kar nadalje vpliva na distribucijo električne moči.
 - Volumen pretaljenega materiala je odvisen od velikosti toplotnega vira (premera kanala plazme) in prenosa toplote.



108



Povzetek o fenomenih pri razelektritvi (3/3)

- Odvzem:
 - Glavni mehanizem odvzema je izmet taline iz kraterja, ki se vrši:
 - na začetku razelektritve zaradi
 - elektromagnetnih sil in
 - vrenja pregrete taline (pogojeno s spremembo tlaka) ter
 - na koncu razelektritve zaradi
 - vrenja pregrete taline. Vrenje taline nastopi zaradi padca tlaka na koncu razelektritve.



109



Zaključki

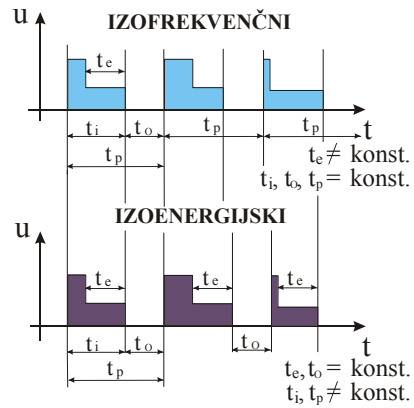
- Temperatura na elektrodi je pogojena s termo efektom med kanalom plazme in površino elektrode, ki je v kontaktu s plazmo.
- Odvzem nastopi
 - v prvih mikrosekundah razelektritve in
 - na koncu razelektritve.
- 90 % toplote se absorbira v elektrodah, kar povzroča taljenje materiala elektrod. Le 1-10 % nataljenega materiala zapusti površino elektrod.



110



Tipi generatorjev



111



Tipi razelektritev



112



Nadzor in krmiljenje SEDM naprave

Boljše SEDM naprave imajo poleg osnovnih sklopov, prigrajene dodatne sklope za nadzor in krmiljenje procesa. S tem se dosega:

- krajše obdelovalne čase,
- manjšo obrabo elektrode,
- lažje upravljanje s strojem.

Pogosto so vgrajeni:

- sklop za protibločno zaščito,
- CNC krmilnik,
- sklop za določitev učinkovite površine erodiranja.



113



Protibločna zaščita

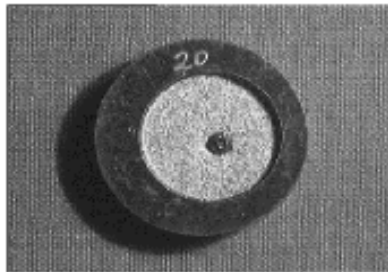
- Preveliko število zaporednih obločnih razelektritev vodi do t.i. obžiganja površine. Taka poškodba površine je pri fini obdelavi v večini primerov težko popravljiva.
- Proizvajalci SEDM naprav sledijo dveh principom preprečevanja obžiganja:
 - predikcija obločnih razelektritev in prekinitev toka, dokler se razmere v reži ne popravijo,
 - zasledovanje serije razelektritev in prekinitev toka šele, ko se zaporedoma pojavi več obločnih razelektritev.
- Protibločna zaščita je zelo pomemben sklop SEDM naprave.



114



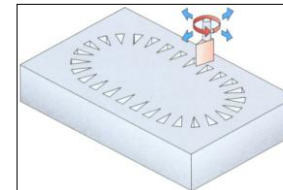
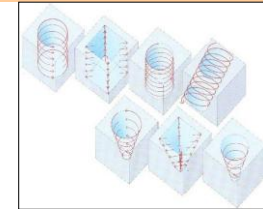
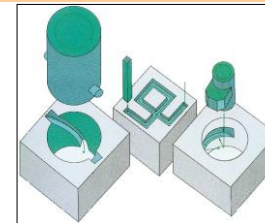
Posledica obžiganja



115



Primeri izdelave na CNC-SEDM napravi



116



O strojih na tržišču

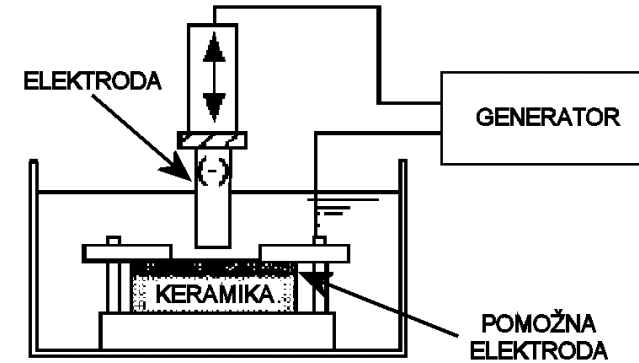
- Enostavne in poceni (3 mio. SIT) SEDM naprave omogočajo obdelavo samo v z-osi in imajo integrirane samo osnovne sklope. Upravljanje s tako napravo zahteva veliko operaterjevega znanja o SEDM procesu.
- Na takšne naprave se naknadno prigranjuje adaptimate, ki znatno izboljšajo karakteristike stroja (2 mio. SIT).
- Sodobne naprave imajo prigraven CNC krmilnik (smiselne so 4 interpolirane osi), protiobločno zaščito ter ostale module, ki omogočajo hitrejšo in lažjo izdelavo. Njihova cena je ranga (30 mio. SIT)



117



Obdelava električno neprevodne keramike



118



Tehnologija oplastenja z elektroerozijo

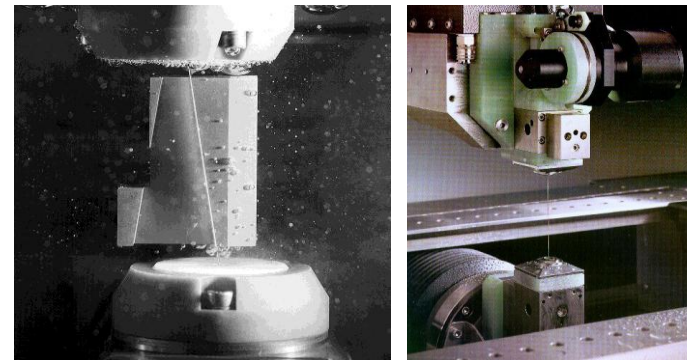
- titanov karbid (TiC):
 - sintrana titanova elektroda
 - dielektrik na bazi ogljika
- volframov karbid (WC):
 - prva elektroda: kompozit volframov karbid - kobalt (WC/Co)
 - druga elektroda: baker (Cu)
 - dielektrik na bazi ogljika
- nikelj silicijeva prevleka
 - sintrana nikelj silicijeva elektroda (Ni/Si)
 - fin obdelovalni režim in elektroda na negativnem polu.



119



Primer WEDM izdelave



120



Mikro elektroerozija

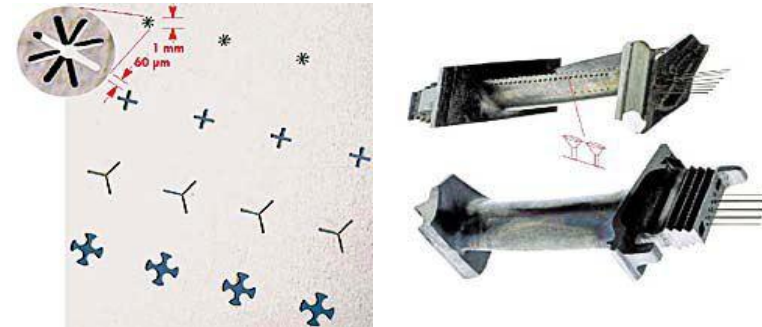
- Za obdelavo z mikro elektroerozijo se uporablja bakrene elektrode premera od 0,045 mm do 3 mm.
- Izdelati je mogoče tudi manjše dimenzije (do 0,020 mm).
- Dosega se majhno površinsko hrapavost ($Ra=0,05 \mu m$) in skoraj nič toplotno prizadete cone.
- Primer: izdelava luknje $\varnothing 0,6 \text{ mm}$, $h=40 \text{ mm}$, čas izdelave 2,5 min.



121



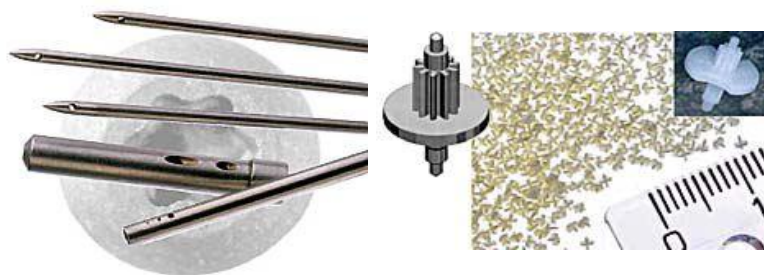
Primeri izdelave majhnih lukenj z μ EDM (1/2)



122



Primeri izdelave majhnih lukenj z μ EDM (2/2)



123



Primer brušenja orodja z EDG



124

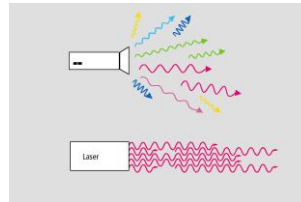


Laserska obdelava

- Fizikalni princip:
L-ight **A**-mplification by **S**-timulated **E**-mission of **R**-adiation (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**.

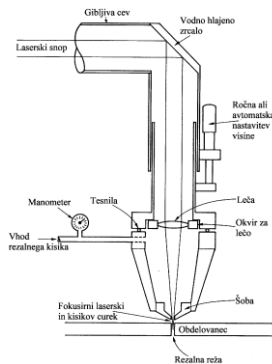
Slika: Primerjava različnih virov svetlobe



125



Karakteristike tehnologije laserskega rezanja



- moč: nekaj 10W - nekaj kW
- natančnost: ± 0.025 mm
- hrapavost Ra: 2-25 μ m
- debelina obd.: 0.1-25 mm
- širina reza: 0.1-0.4 mm

Učinkovitost laserske obdelave je odvisna od termičnih in v določeni meri optičnih lastnosti in ne od mehanskih lastnosti obdelovanega materiala. Tako lahko obdelujemo krhke, trde in mehke material, ki imajo ustrezne termične lastnosti, kot npr. nizka toplotna prevodnost. Prav obdelava širokega spektra materialov odlikuje lasersko rezanje.



127



Osnove rezanja z laserjem (lbc)

Lasersko rezanje je termičen postopek, podobno kot plamensko in plazemsko rezanje. Razlika je v izvoru toplote in porazdelitvi energije na površini obdelovanca.

Žarek, kot vir sevalne energije, je fokusiran na površini obdelovanca; tako dosežemo zadostno površinsko gostoto moči, da se material segreje, stali in v končni fazi upari. Material namreč na splošno del energije v obliki svetlobe določene valovne dolžine (odvisno od laserskega medija) absorbira v obliki toplote, del jo odbije, del pa jo lahko tudi prepusti skozi.

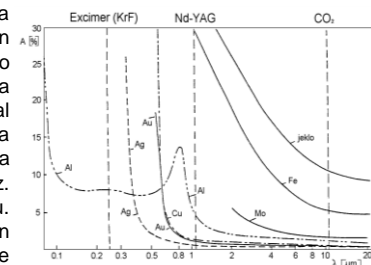
Absorbirana energija žarka je transformirana v toploto preko vibracij molekularne zgradbe (kristalne rešetke) v materialu na erozijskem čelu reza. Vibracije v kristalni rešetki namreč povzročijo povišanje temperature na tem mestu.



126



Odločilni dejavniki so gostota vpadlega svetlobnega toka, kvaliteta žarka in absorpcijski koeficient materiala. Ko presežemo gostoto svetlobnega toka okoli 10^6 W/cm², se formira rezalni kanal v katerem se zaradi večkratnega odboja svetlobe od njegovih sten znatno poveča izkoristek svetlobnega toka oz. absorpcija laserske svetlobe v materialu. Ko temperature dosežejo tališče in vrelišče materiala se pojavijo fazne spremembe.



Nekaj absorbirane energije se lahko prenese preko vibracij tudi v notranjost materiala; to imenujemo prenos toplote s prevajanjem.

Prevodnost toplote nam tako zmanjšuje toplotno energijo, ki bi se drugače porabila za lokalno taljenje oz. uparjanje.



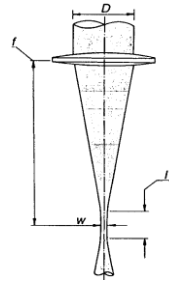
128



Struktura 2D laserskega sistema

Realni profil žarka in optične popačitve v leči nekajkrat povečajo premer pike v gorišču, tako da je tipično v velikostnem razredu nekaj desetink mm, vendar v vsakem premeru sorazmeren goriščni razdalji leče.

Gostota moči žarka v gorišču je s kvadratom obratno sorazmerna goriščni razdalji leče.



D – premer žarka na mestu vstopa v lečo

f – goriščna razdalja leče

w – premer fokusiranega žarka (grlo)

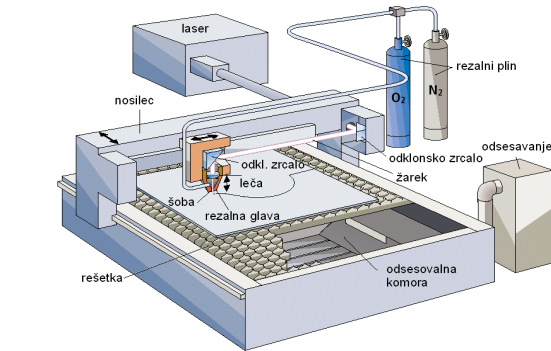
l – fokusna dolžina

λ – valovna dolžina laserske svetlobe

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



129



130

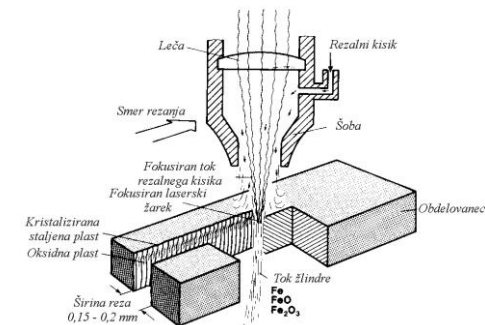


Mehanizem odnašanja pri laserskem plamenskem rezanju

- Pri laserskem rezanju v procesu sodeluje curek rezalnega plina. Navadno ga dovajamo soosno z žarkom, v posebnih primerih pa tudi od strani ali s spodnje strani obdelovanca.
- Curek plina ima poleg fizikalno kemijskega učinka nalogo izpihanja raztaljenega gradiva iz rezalnega kanala. Zaradi pretoka plina prav tako lahko izgubimo del absorbirane toplote v obliki konvekcije.
- Slika v nadaljevanju prikazuje poenostavljen mehanizem odnašanja laserskega rezanja.



131



132



Vpihujemo oksidant (O_2) ali reducente (N_2 , CO_2) oz. interne pline (Ar, He).
Prav kombinacije intenzitete žarka in vrste ter tlaka rezalnega plina nam določajo tri osnovne načine laserskega rezanja:

A 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 prizadeta cona (HAZ)
(les, papir, širok spekter umetnih materialov od kompozitov do keramike)
- nizka hitrost podajanja
- potrebna je visoka energija
(npr. jeklo : izparilna toplota = 25 x talilna toplota)



133



B LASERSKO TALILNO REZANJE

Material je segret in staljen z laserskim žarkom ter odnešen s tokom plina, pri tem ne pride do eksotermne reakcije med plinom in obdelovancem. Za rezalni plin se uporablja predvsem dušik in argon pod visokim tlakom (1 do 2MPa);

- + neoksidirana površina reza
(visoko legirana jekla, nikljeve legure, titanove zlitine)
- večja hrapavost površine reza zaradi staljenega materiala
- žareča HAZ zaradi prevoda toplote v osnovni material
- nizka hitrost podajanja, vendar večja, kot pri sublimacijskem rezanju



134



C LASERSKO PLAMENSKO REZANJE

Uporaba reaktivnega asistenčnega plina za povečanje eksotermne reakcije in oksidacije (gorenja) materiala segretega z laserjem.

- + visoka hitrost rezanja
(rezanje jekel s kisikom : oksidacija železa zviša absorpcijski koeficient za sevanje CO_2 laserja na 90 %, eksotermno gorenje daje 70 % procesne energije)
- rezultati rezanja
(jeklo : oksidna plast na površini reza)



135



136



Ponovljivost rezanja zagotavljajo parametri iz tabele:

VRSTA PARAMETROV	KONTINUIRANO REZANJE	PULZNO REZANJE
Procesni parametri	debelina plošče material podajalna hitrost kvaliteta reza	debelina plošče material podajalna hitrost kvaliteta reza
Laserski parametri	moč modus TEM_{pq} polarizacija divergenca	pulzna moč P_p dolžina pulza t_p pulzna frekvenca Y_p modus TEM_{pq} polarizacija divergenca
Fokusni parametri	fokusna dolžina premer fokusa lega fokusa globina fokusa vrsta leče	fokusna dolžina premer fokusa lega fokusa globina fokusa vrsta leče
Plinski parametri	oblika šobe dimenzije šobe oddaljenost šobe od obd. pritisk plina vrsta plina	oblika šobe dimenzije šobe oddaljenost šobe od obd. pritisk plina vrsta plina

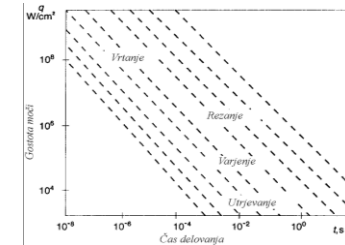
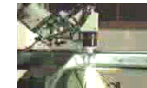


137



Druge aplikacije laserske obdelave:

- gretje – termična obdelava,
- taljenje in pretaljevanje v primeru različnih materialov zlitje,
- varjenje,
- graviranje in označevanje,
- vrtanje
- izdelava prototipov

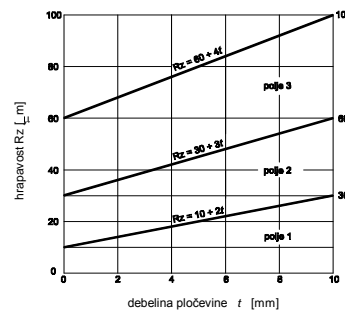


138



Geometrijske karakteristike pri lbm

Hrapavost pri obdelavi z laserjem je zelo odvisna od materiala. Od materiala je odvisno, kakšen način laserskega rezanja izberemo (sublimacijski, talilni ali plamenski). Še posebej pa na hrapavost vpliva debelina materiala, kar nazorno prikazuje slika. Standard definira kakovostna polja glede na hrapavost Rz. Iz diagrama je tudi razvidno območje hrapavosti Rz pri laserskem rezanju. Ra se giblje nekje v rangi med 1 do nekaj čez 10 μm , v izjemnih primerih tudi pod 1 μm (sublimacijsko rezanje polimerov).



Razdelitev področja hrapavosti Rz na kakovostna polja



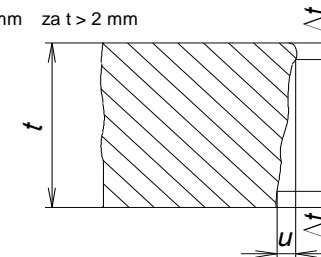
139



Koničnostnost reza u oz. taper je definirana z odstopanjem realne konture reza od idealne pravokotne. Z DIN 2310 standardom je določeno tudi merilno področje na rezu.

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

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



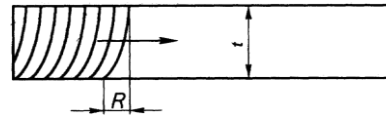
Merilno območje za določitev koničnosti reza



140



Zaostajanje žarka R vpliva na dimenzijsko odstopanje, saj pri rezanju malih radijev prihaja do napake, ki je najbolj izrazita na spodnjem robu pločevine. Pri rezanju tankih pločevin ima zaostajanje majhen vpliv na odstopanje od željenih dimenzij.



Zaostajanje žarka oz. curka

Zaostajanje se pojavlja pri vseh obdelavah z energijskimi žarki oz. curki in je tako prisotno tudi pri AWJ, OFC in PBM.



141



Integriteta površine pri lbm

Laserska obdelava je termičen proces. Na odrezani površini zato nastane **HAZ**, ki je kot pri ostalih termičnih postopkih sestavljena iz pretaljene in nepretaljene plasti.

Material se med obdelavo stali, nato pa ga rezalni plin ne loči od osnovnega trdnega materiala, ampak se sprime nazaj na površino. Če pretok rezalnih plinov med rezanjem ni dovolj velik, potem je **pretaljena plast** debelejša. Tipična debelina je med 20 in 60 μm .

Zaradi hitrega ohlajanja ima pretaljena plast tudi do dvakrat večjo trdoto. Metalografska struktura je v smeri največjega temperaturnega gradienta, običajno prvokotno na rezano površino, dendriška.

Obdelava z laserskim sublimacijskim rezanjem ne pušča pretaljene plasti.

HAZ – Heat Affected Zone (toplotno prizadeto območje)



143



Širina reza b ne vpliva na samo kvaliteto oz. na hrapavost reza, potrebno pa je njeno poznavanje (velikost, stabilnost), da lahko vnaprej predvidimo ustrezno nadmero rezanja.

Širina curka plina ter oksidacija in erozija določajo širino reza, ki je v razredu od nekaj desetink mm za tanke obdelovance, do nekaj manj od mm za debele.

Valovitost reza h je posledica strijavosti površine reza, ki je značilna za vse žarovne postopke. Večjo valovitost rezne površine lahko pripisujemo tudi tresljamem v sistemu za vodenje žarka oz. premikanje obdelovanca.

Velikost srha; srh ali igla je eden izmed indikatorjev procesa. V praksi operater stroja običajno oceni velikost srha in nato korigira nastavitvene parametre rezanja.

Višina srha je pomembna predvsem za nadaljno obdelavo.



142



Struktura **nepretaljene plasti** je odvisna od osnovnega materiala. Material v tej plasti se ne stali, ampak samo segreje do temperature, ki povzroča spremembo materiala.

Debelina nepretaljene plasti je med 100 in 200 μm .

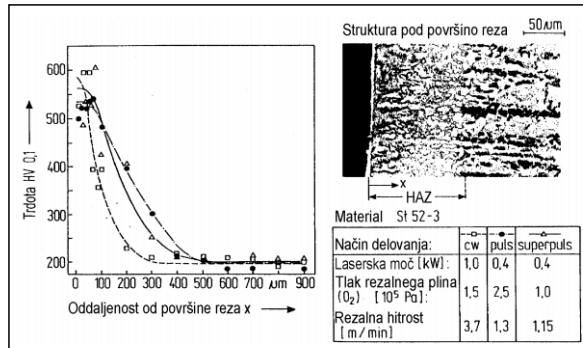
Pri obdelavi s kratkimi pulzi nastane tanjša HAZ.

Kisik kot rezalni plin povzroča večjo HAZ, ker na površini reza osnovni material zgoreva in tako generira dodatno toploto.



144





Sprememba trdote in strukture v toplotno prizadeti coni (HAZ)

145

Preostale tehnološke karakteristike in omejitve pri lbm

V splošnem imajo kovine ugodne termične in optične lastnosti za lasersko obdelavo. Vendar je ekonomičnost uporabe laserskega rezanja odvisna od pravilne izbire tipa in moči laserskega žarka. Termične lastnosti materiala določajo potrebno moč vpadlega žarka, da dosežemo željeno globino reza oz. odvzem materiala.

Pri obdelavi z laserjem je potrebno za konstantne pogoje procesa vzdrževati relativno višino gorišča glede na površino obdelovanca v pasu nekaj desetink mm. Optimalna višina oz. globina je za posamezne primere določena empirično.

Pri določeni moči laserja je globina rezanja omejena, ker z večanjem uporabne globine žarka (to dosežemo z večanjem goriščne razdalje leče) zmanjšujemo površinsko gostoto moči.

147

Mehanizem generiranja **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.

Razpoke na površini obdelovanca, še posebno na pretaljeni plasti so posledica zaostalih napetosti. Praviloma se na površini reza v HAZ pojavljajo natezna napetosti, v notranjosti materiala pa tlačne. V nepretaljeni plasti se natezne napetosti pojavljajo zaradi termičnega cikla segrevanja in ohlajanja.

Natezne obremenitve so večje, tlačne po velikosti manjše, pa delujejo na večjem volumnu.

Poleg faznih sprememb zasledimo pri laserski obdelavi še mnoge druge pojave vezane na kakovost nastale površine, kot so npr. pojav mikro-razpok, v primeru rezanja polimerov in kompozitov pa do razpada molekularne zgradbe in osmojenosti v bližini okolici reza, kot tudi prisotnost plinastih produktov.

146

V celoti velja, da je potrebno za posamezno obdelavo nastaviti in nato vzdrževati čim konstantnejše naslednje parametre:

- zbrati lečo z najprimernejšo goriščno razdaljo,
- nastaviti višino gorišča,
- izbrati šobo z najprimernejšo odprtino in nastaviti višino reže med šobo in površino obdelovanca,
- nastaviti pretok asistenčnih oz. rezalnih plinov,
- nastaviti hitrost pomikanja.

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.

148



Veliki in majhni
močnostni laserji:
CO₂ laser (30kW) in
diodni laser (200W)



149



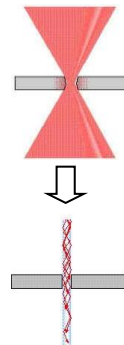
Oprema in naprave – ni
mehanskega kontakta, ni
obrabe.
Fleksibilnost žarka – en izvor in
več obdelovalnih mest,
primeren za avtomatizacijo.



150



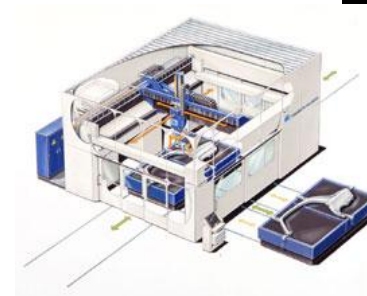
LASER- μ JET



151



3D obdelava preoblikovanih
delov
EMO Orodjarna



152



Industrijske aplikacije - UNIOR - Zreče

AWJ ali lasersko obrezovanje orodja za obrez brade utopno kovanih ojníc



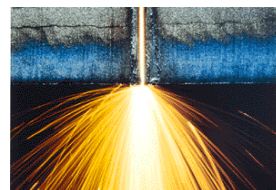
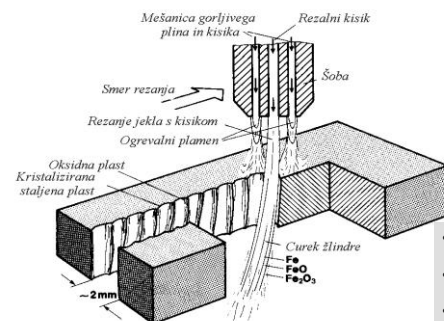
153

Ostali konturni termični postopki rezanja

1. Avtogeno – plamensko rezanje (OFC-Oxygen Flame Cutting)
2. Plazemsko rezanje (PAC-Plasma Arc Cutting)
3. Rezanje z žično erozijo (WEDM-wire electric discharge machining)

154

Mehanizem odnašanja pri OFC

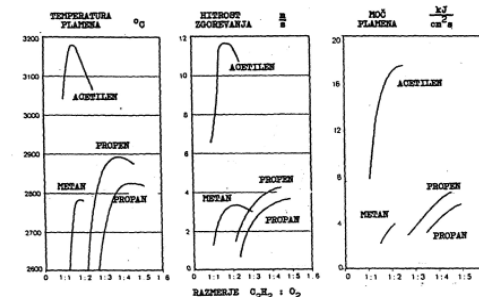


- $T_{vn} < T_t$
- $T_{toks} < T_t$
- *ustrzna toplotna prevodnost*

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

155

Mehanizem odnašanja pri OFC

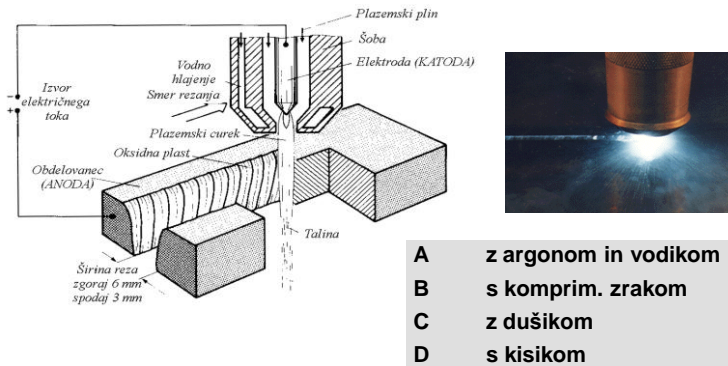


Gorilni plini:
Acetilen
Propan-butan
Metan

Lastnosti gorilnih plinov

156

Mehanizem odnašanja pri PAC



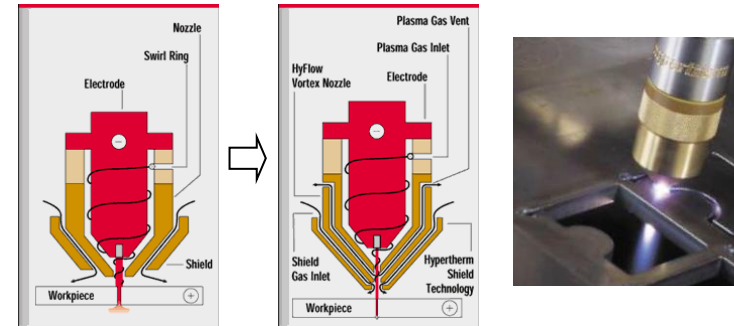
- A z argonom in vodikom
- B s komprim. zrakom
- C z dušikom
- D s kisikom



157



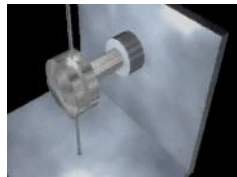
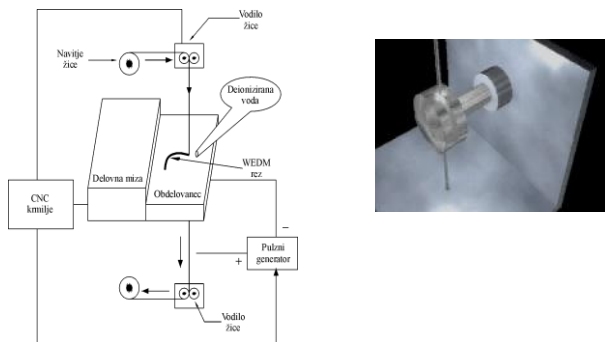
Mehanizem odnašanja pri PAC



158



Mehanizem odnašanja pri WEDM



159



Primerjava WEDM s konvenc. odrezavanjem

<p>1 Programming of the profile: 15'</p> <p>2 Drilling for machining of the slot and the profile: 5'</p> <p>3 Machining of inside and outside profiles: 1 h 45'</p> <p>4 Machining of the slot: 10'</p> <p>• Preparation/setting up: 15min Total time: 2 h 30</p>	<p>1 Milling of the two flats, Roughing and finishing: 12'</p> <p>2 Drilling of the Ø 74 hole: 3'</p> <p>3 Milling to Ø 73.5 (semi-finishing) of the Ø 74 hole: 5'</p> <p>4 Milling of the 3 mm slot: 15'</p> <p>5 Surface finishing for attaining a thickness of 25 mm: 3'</p> <p>6 Deburring of the complete part: 4'</p> <p>• Machining: 1 h 51 + Preparation/setting up: 4 h Total time: 5 h 51</p>
---	---



160



Tehnološke karakteristike

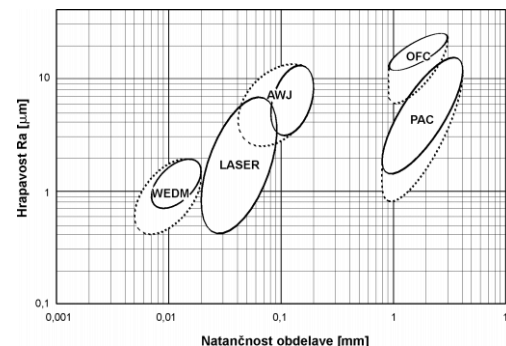
KARAKTERISTIKE	LASER	AWJ	OFC	PAC	WEDM
PROCES					
investicijski stroški	-	o	+	o	+
obratovni stroški	o	-	+	+	+
stopnja odvzema	+	o	O ($t > 100\text{mm}$)	+	-
fleksibilnost	+	+	o	+	o
avtomatizacija	+	+	o	+	-
zapletene oblike	+	+	o	o	+
gnezdenje	+	+	-	o	×
rezanje v paketu	-	+	×	×	+
kovine + nekovine	+	+	-	-	-
vpenjanje	+	+	+	+	-
obrab a orodja	+	+	+	+	o
hrup	+	-	-	-	+
POVRŠINA					
kakovost reza	+	+	-	-	+
širina reza	+	+	o	-	+
distorzija - zvitje	+	+	-	-	+
HAZ	o	+	-	-	o
varljivost reza	+	+	-	-	+



161

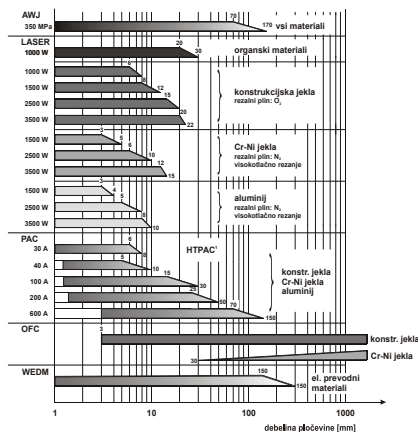


Tehnološko okno: natančnost - hrapavost



162

Uporabna območja konturnih postopkov: material - debelina



163

Tehnološke karakteristike

KARAKTERISTIKE	LASER	AWJ	OFC	PAC	WEDM
PROCES					
vrsta energije	termična	mehanska	termična	termična	el.- termična
natančnost pozicije [mm]	$\pm 0.01^1$	± 0.01	± 0.1	± 0.1	± 0.0025
natančnost obdelave [mm]	$\pm 0.02^1$	$\pm 0.1 (0.03)$	± 1	$\pm 0.8-3$	$\pm 0.01 (0.005)$
hitrost odnašanja $V=v \cdot t$ [mm ² /min]	7000 ^{Fe} 15000 ^{Fe} >50000 ^{org}	1800 do 25000 ¹	<10 ⁴ → $t < 15\text{mm}$ $4 \cdot 10^4$ → $t > 10\text{cm}$	30000 ^{Fe} 25000 ^{CrNi} $2.5-4.5 \cdot 10^4$ Al	500 ^{fino} 1500 ^{grob}
širina mostiča [mm]	1	1	cca. 8	6	1
min. radij [mm]	0,1-0,4 ¹	0,4-1,2	cca. 3	1,5-2	0,02-0,3
min. izvrtina ϕ [mm]	0,5 (0,05) ¹	1,2-3 (0,5)	10	10	-
širina reza [mm]	0,15-0,4	0,6-1,4	1-2	1,5-8	0,-0,35
omejitve: material	↑ absorpt. ↓ topl. prevod.	-	$T_{\text{vne}} < T_{\text{tal}}$ $T_{\text{tal, oks}} < T_{\text{tal}}$	el. prevoden	el. prevoden
debelina t [mm]	do 25 ¹	1-70 (200) ¹	3-1500	1-150	0,2-300 (500)
POVRŠINA					
hrapavost R_a [µm]	0,4-7	3-15	12,5-25 (6)	1,6-8 (0,8)	0,8-1,3 (0,4)
koničnost α [mm]	0,02-0,2	0,1-0,25 (0)	0,1-2	0,1-2	0,001
zaostale napetosti [N/mm ²]	(+)	$\approx 1^1$ 500	(+)	(+)	< (¹) 500
HAZ [mm]	0,05-0,2	-	(0,1) 0,3-5	0,25-4	0,02
zaostajanje R [mm]	0,01 t -0,1 t	0,01 t -0,15 t	0,05 t -0,15 t	0,05 t -0,15 t	-
valovitost h [µm]	1-50	3-100	100-2000	2-50	-
srh [mm]	0,1-0,5	0,03-0,07	0,5-2	0,5-2	-
izgled	bleščeča /ožgana ¹	peskano, mat	ožgana	ožgana	mat



164

Izbira procesa in varianta kombinirane izdelave



Zahteve konstrukcije:

Material: X5CrNi1810

Debelina: $t=5$ mm

Tolerančni razred: IT 7

HAZ: 0,1 mm

Koničnost: $u=0,1$ mm

Min. radij: $r=0,2$ mm

Min. izvrtina: $\phi=8$ mm

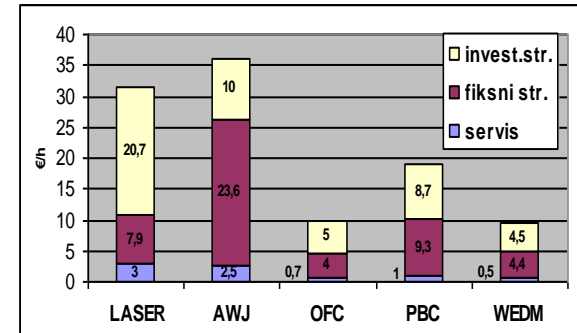
Širina reza: $w=3$ mm



 1 Programming of the profile: 15'	 1 Programming of the profile: 15'
 2 Drilling for machining of the slot and the profile: 5'	 2 AWJ machining of inside and outside profiles: 1h 15'
 3 Machining of inside and outside profiles: 1 h 45'	 3 Milling of the $\phi 74$ hole (finishing): 5'
 4 Machining of the slot: 10'	 4 Slotting of the 5 grooves: 5'
• Preparation/setting up: 15min Total time: 2 h 30	• Preparation/setting up: 20 min Total time: 2 h

165

Investicijski stroški in stroški obratovanja



166