

# 3D-TEHNOLOGIJE

Deja Muck

## LEPLJENJE, SINTRANJE ALI TALJENJE PRAŠKASTEGA MATERIALA

Osnovni proces gradnje predmeta	Generična skupina po standardu ASTM F2792-10	Okrajšave tehnologij
ekstrudiranje materialov	material extrusion <i>ekstrudiranje materiala</i>	FDM, PJP, FFF, FFM, CFF, MEM, MUS, FDMm, FDC ...
proces fotopolimerizacije	vat photopolymerization <i>fotopolimerizacija v kadi</i>	SLA, DLP Projection, Moving DLP, LCM, 3SP, LAMP, ZPP ...
	material jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje materiala</i>	PolyJet, MJM, MJP, LMJP WDM, DOD ...
lepljenje, sintranje ali taljenje praškastega materiala	binder jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje veziva</i>	3DP, CJP, BJMP ...
	powder bed fusion <i>spajanje praškastega materiala</i>	SLS, LS, MLS, SLM, SHS, DMLS, DMP, EBM, EBF3, LBM, LaserCUSING ...
	direct energy deposition <i>lasersko navarjanje</i>	LENS, LDT, LPF ... DED
nalaganje, lepljenje ali laminiranje materiala	sheet lamination <i>laminacija pol</i>	LOM, PLT, SDL, UAM ...

3

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

### Materiali

- q mavec (gips), livarski pesek, polimeri, kovine, keramika, steklo ...

### Načini spajanja

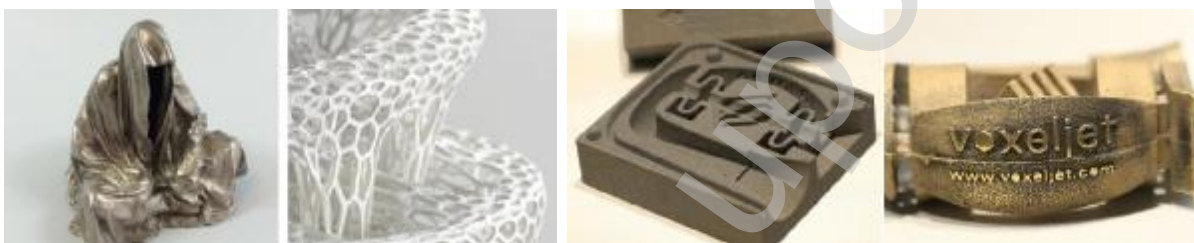
- q s kapljičnim nanašanjem ali brizganjem veziva > »lepimo« v slojih delce praškastega materiala
- q z laserskimi ali drugimi toplotnimi viri različnih moči spajamo (sintramo ali/in talimo) zaporedne sloje praškastega materiala

4

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

## Kapljično nanašanje ali brizganje veziva (Binder Jetting)

- q Tisk predmetov na osnovi mavca (3DP)
- q Tisk kovinskih predmetov (BJMP)
- q Tisk keramičnih predmetov (BJCP)
- q Tisk steklenih predmetov (BJGP)
- q Tisk hrane (food printing)
- q Tisk peščenih kalupov (sand casting)



5

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

## Spajanje slojev praškastega materiala (Powder Bed Fusion)

- q Selektivno lasersko sintranje (SLS, SLM, LaserCISING)
- q Taljenje z elektronskim snopom (EBM)
- q Selektivno sintranje podjetja Blueprinter (SHS)

## Lasersko navarjanje (Direct Energy Deposition)



6

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

## Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – 3DP



Intri

7

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

## Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – 3DP

□ pravi 3D-tisk, na praškast material brizgajo vezivo

□ materiali; mavec, polimerni kompoziti, kovine in keramični materiali

Z Corp, 3D Systems, tiskalniki ProJet, CJP

ProJet 160 (236 × 185 × 127 mm) > monokromni tisk > horizontalna ločljivost 300×450 dpi > najmanjši detajl 0,4 mm. Hitrost 20 mm/uro.

ProJet 860Pro (508 × 381 × 229 mm) > CMYK tiskalnik s 5 glavami, reproducira več kot 100.000 barv, hitrost od 5 do 15 mm/uro. Ločljivost 600 × 540 dpi, najmanjši detajl 0,1 mm.

Debelina sloja vedno 0,1 mm.  
Barvni obseg – 90 % SWOP



8

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – 3DP



9

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – HP Jet Fusion



VIDEO

10



## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

### Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – Sand casting

Debelina sloja 150  $\mu\text{m}$  za polimerni material in 300  $\mu\text{m}$  za livarski pesek.  
Ločljivost 300 dpi.

Najmanjši (VX200 > 300 x 200 x 150 mm)

Največji (VX4000 > 4,000 x 2,000 x 1,000 mm).



11

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

### Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – Sand casting

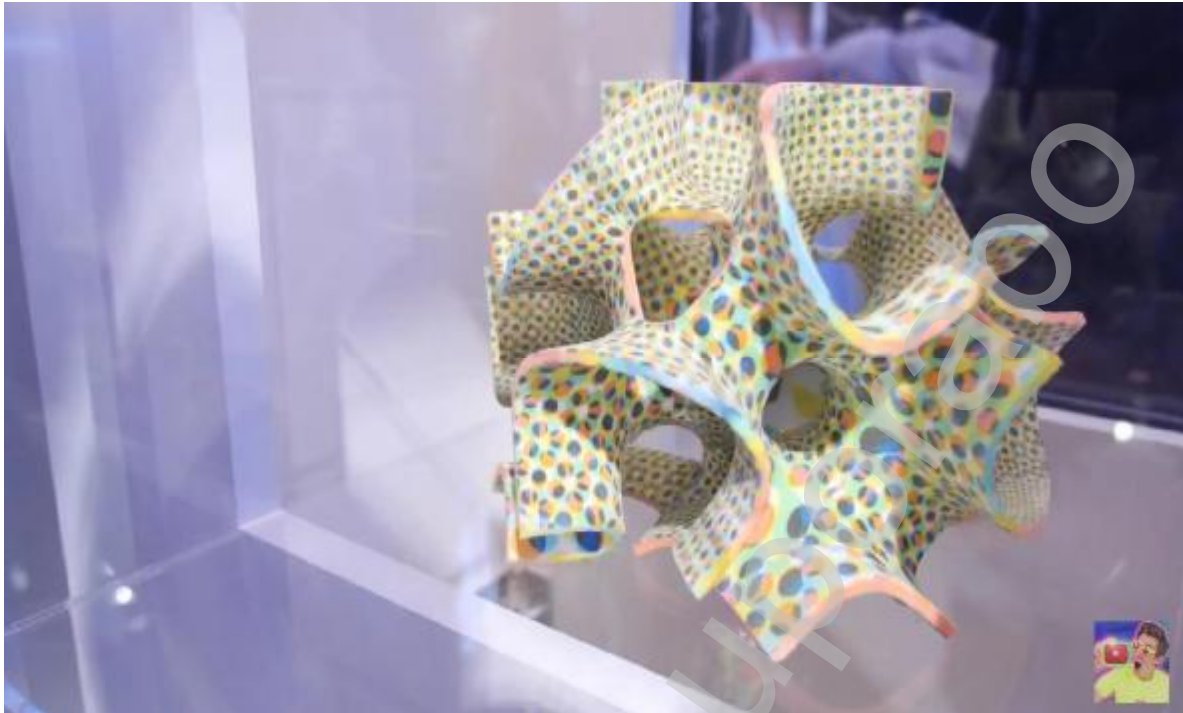


VIDEO

12

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

### Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – food printing



VIDEO

13

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

### Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – BJMP

BJMP (binder jetting metal printing)

- q tisk kovine s kapljičnim nanašanjem ali brizganjem veziva  
toplotna obdelava > krhek predmet (60% kovine in 40% zraka).
- q dodatna obdelava v peči (24 ur pri 2000 °C) ob prisotnosti  
dodanega praškaste kovinske > infiltriranje
- q končni predmet lahko vsebuje 99,9% kovine.
- q nizkocenovni tisk kovinskih izdelkov (tudi področje umetnosti,  
izdelave nakita in modnih dodatkov).

14

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – BJMP

q Tisk kovinskih predmetov (ExOne)



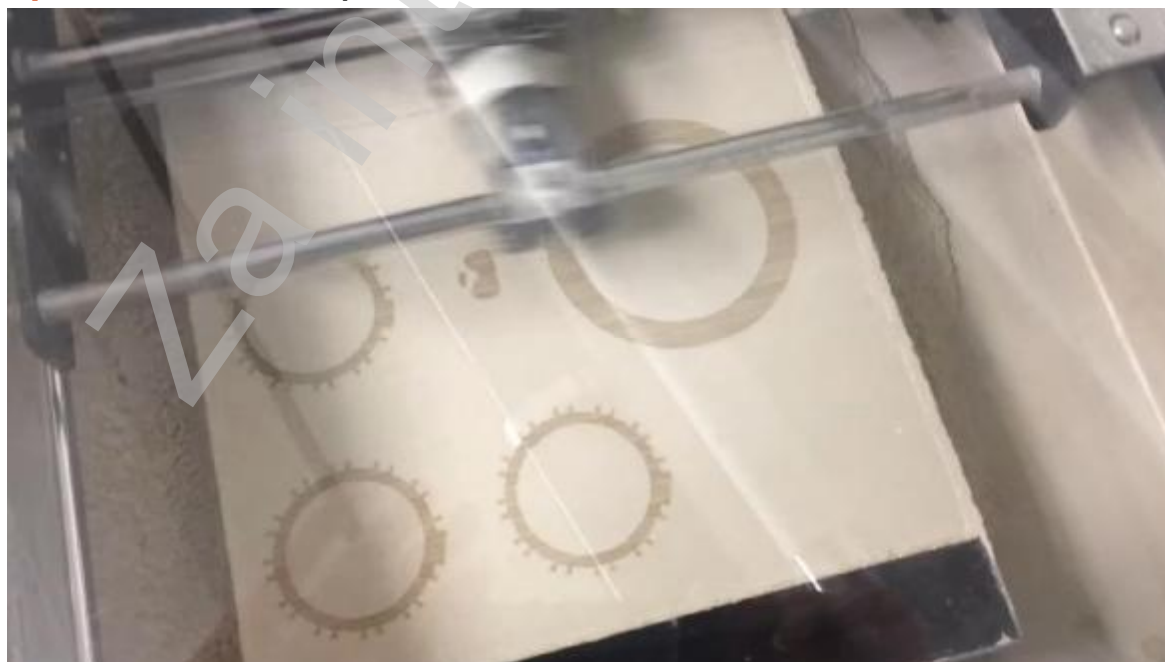
[VIDEO](#)

15

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – BJCP

q Tisk keramičnih predmetov



[VIDEO](#)

16



# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

## Kapljično nanašanje ali brizganje veziva – BJGP

q Tisk steklenih predmetov



www.nature.com

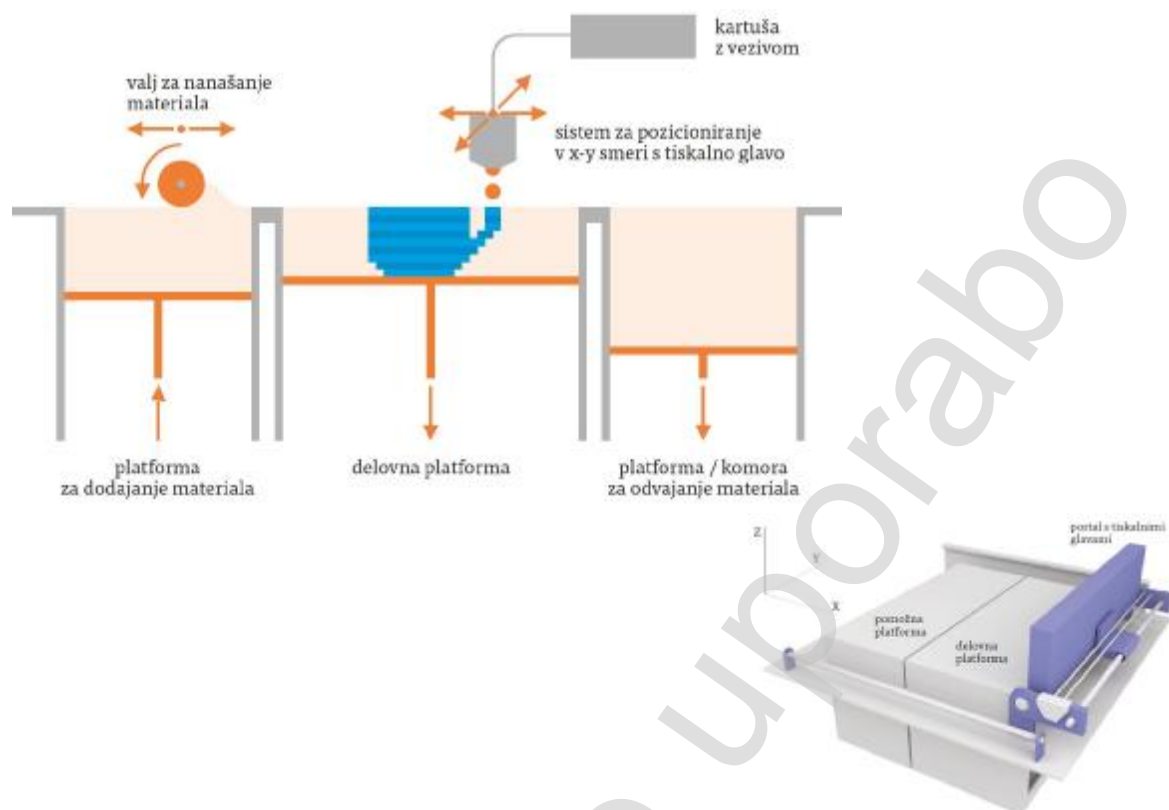
VIDEO

17

Osnovni proces gradnje predmeta	Generična skupina po standardu ASTM F2792-10	Okrajšave tehnologij
ekstrudiranje materialov	material extrusion <i>ekstrudiranje materiala</i>	FDM, PJP, FFF, FFM, CFF, MEM, MUS, FDMm, FDC ...
proces fotopolimerizacije	vat photopolymerizaton <i>fotopolimerizacija v kadi</i>	SLA, DLP Projection, Moving DLP, LCM, 3SP, LAMP, ZPP ...
	material jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje materiala</i>	PolyJet, MJM, MJP, LMJP WDM, DOD ...
lepljenje, sintranje ali taljenje praškastega materiala	binder jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje veziva</i>	3DP, CJP, BJMP ...
	powder bed fusion <i>spajanje praškastega materiala</i>	SLS, LS, MLS, SLM, SHS, DMLS, DMP, EBM, EBF3, LBM, LaserCUSING ...
	direct energy deposition <i>lasersko navarjanje</i>	LENS, LDT, LPF ... DED
nalaganje, lepljenje ali laminiranje materiala	sheet lamination <i>laminacija pol</i>	LOM, PLT, SDL, UAM ...

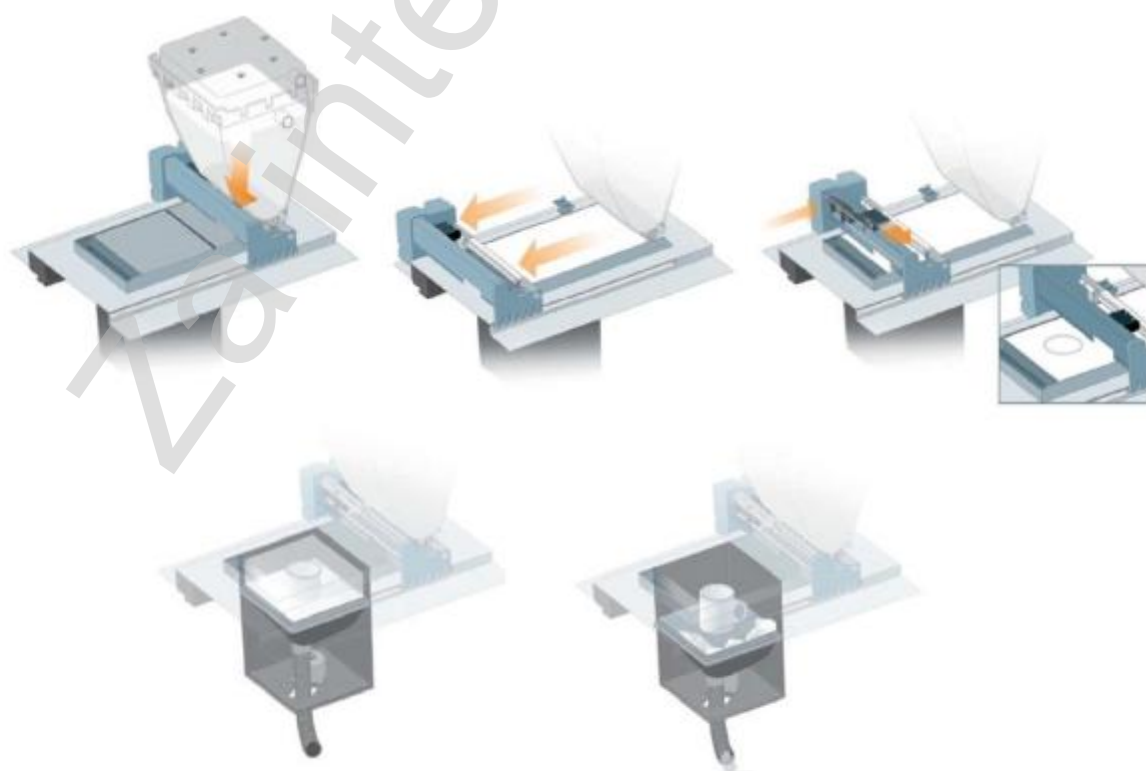
18

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP



19

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP



20

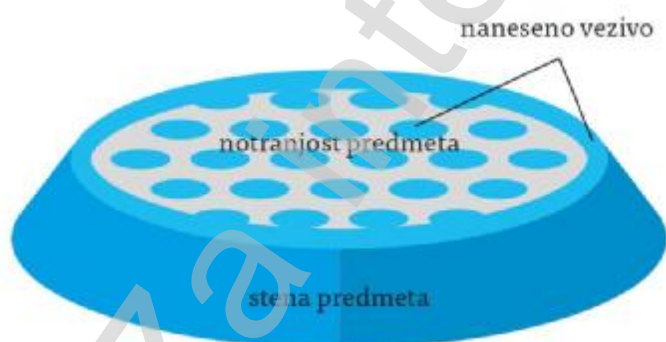
## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP



<https://www.youtube.com/watch?v=Favha1-8RXY>

21

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP



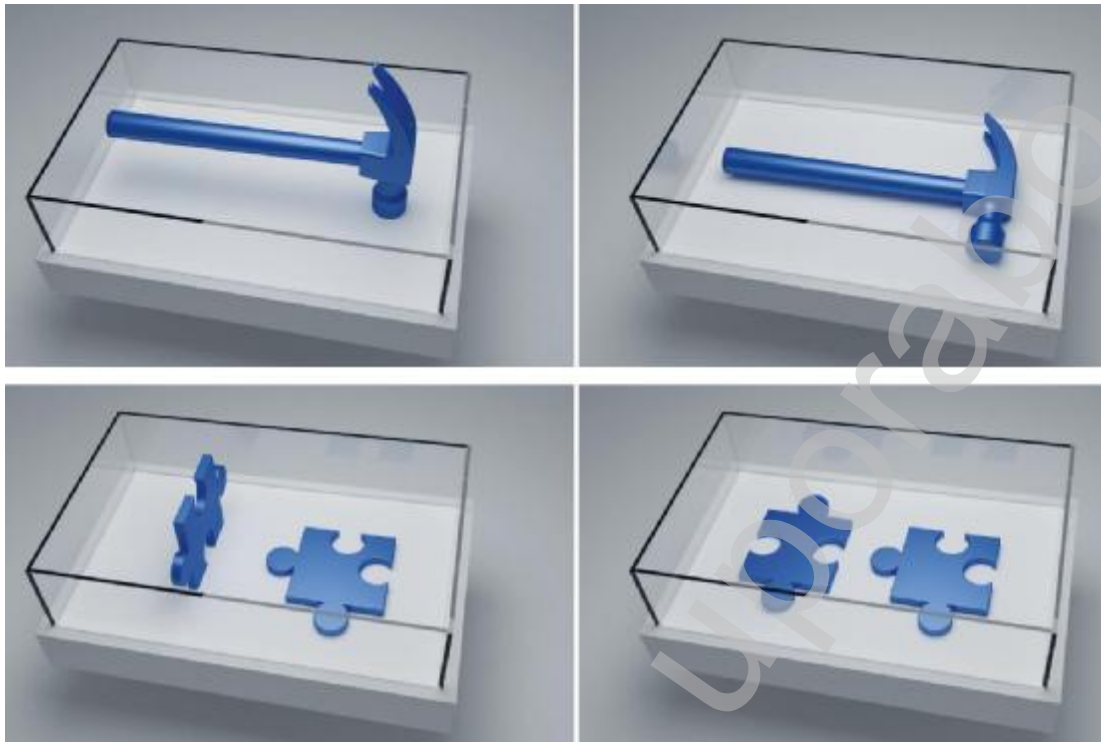
Zeleni (krhek) predmet (green object) > utrditev z impregnanti.

Tiskalne glave nanesejo le povprečno 20 % materiala (veziva) glede na skupni volumen končnega predmeta,  
Več veziva > zatekanje čez linije, nastali preveliki pribitki dimenzij > bolj groba površina.

22

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

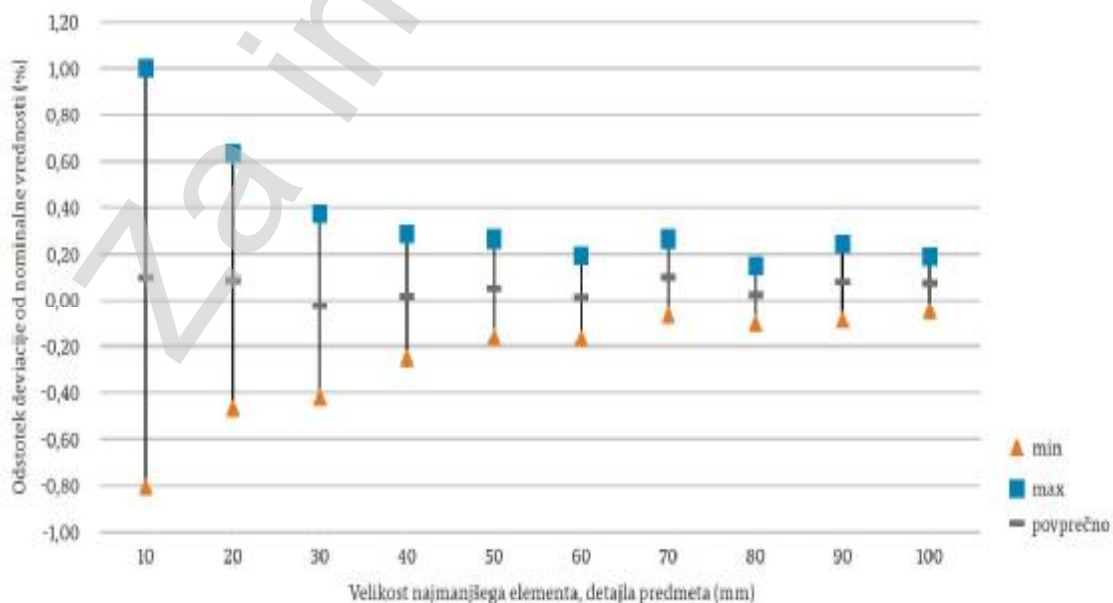
Vpliv orientacije (posedanje, hitrost tiska)



23

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

Velja splošno > deviacija natančnosti tiska v odvisnosti od velikosti najmanjšega elementa.



24

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

## Naknadna obdelava

q green object (hlajenje!)

q infiltranti (konceptualni ali funkcionalni prototipi)



25

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

## Naknadna obdelava

q infiltranti

	Salt water cure	Paraplast X-TRA	Z-Bond 90	Z-Bond 101	Z-Max
osnova	voda in epsom sol	vosek	cianoakrilat	cianoakrilat	epoksid
učinek na 3D-predmetu	površinski	nizka trdnost	dobra trdnost	visoka trdnost	najvišja trdnost
nanašanje infiltranta	pršenje/potapljanje	potapljanje	pršenje/potapljanje	pršenje/potapljanje	čopič/pršenje
globina prodiranja (mm)	do 100 %	do 100 %	0,5-3 mm	0,5-3 mm	5-10 mm
čas sušenja pri 21 °C (h)	variabilno (do 24 ur)	0,4-0,5	0,4-0,5	15	24

Sušenje v peči, T cca. 70°C skrajša čas. / VisiJet PLX

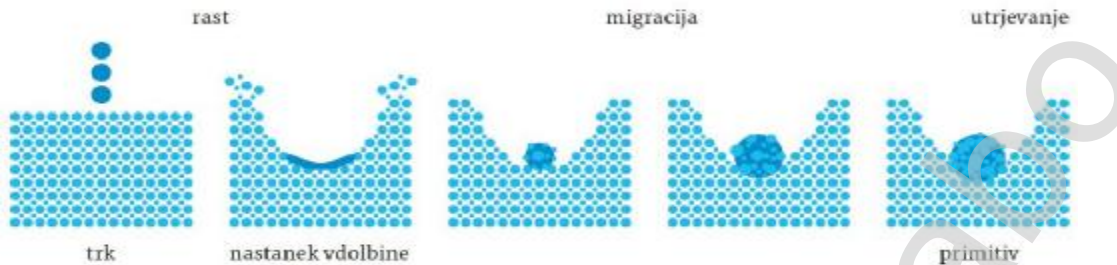
26



# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

## Mehanizem utrjevanja praškastega materiala

q proces nastajanja primitiva



Hitrost glave  $\approx 1,5$  m/s. Vezivno sredstvo – kapljice  $d = 80 \mu\text{m}$ , hitrost 10 m/s. Kapljica pri trku s površino materiala  $\approx 2$  m/s > sprememba kinetične energije:

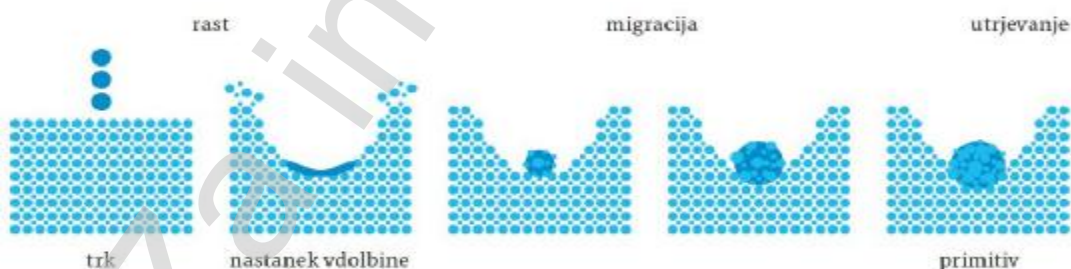
- q nastane vdolbina
- q rast delcev
- q kapilarni učinek > primarni mehanizem migracije delcev > nastanek in povečanje aglomerata > težnja min. povr. energ. > kroglasta oblika aglomerata > postane primitiv > osnovni element gradnje 3D-predmeta

27

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

## Mehanizem utrjevanja praškastega materiala

q proces nastajanja primitiva



q kapljica veziva  $d = 80 \mu\text{m}$  veže delce prahu  $d = 30 \mu\text{m}$ . Končna velikost primitiva >  $120 \mu\text{m}$  do  $150 \mu\text{m}$ .

q trden predmet nastane, če so primitivi med seboj povezani. Na trdnost vpliva: hitrost premikanja tiskalne glave ( $v$ ), frekvenca kapljic ( $f$ ) in razdalja med kapljicami ( $l$ )

$$v = l \cdot f$$

28

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

## Prednosti

- q okolju prijazna tehnologija
- q nizka cena materiala
- q brez odpadnega osnovnega materiala, recikliranje
- q velika hitrost tiska še posebej pri sočasnem, paketnem tisku več predmetov
- q možnost tiska v barvah (24-bitna paleta)
- q brez podpornega materiala

## Slabosti

- q omejena funkcionalnost predmetov
- q manjša natančnost
- q slaba kakovost površine (**S-3DP**)
- q obvezna naknadna obdelava, infiltracija

29

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – 3DP

## Materiali

- q visoko zmogljivi kompozitni materiali (mavec z dodatki, visoka belina)
- q materiali snap-fit (zmes > za infiltracijo z epoksi smolo – videz plastike)
- q elastomerni materiali (mešanica celuloze in special. vlaken > infiltracija z elastomerom)
- q materiali za natančno litje (mešanica celuloze, vlaken > tisk pramodelov > infiltracija z voskom > kalup > žganje > ulivanje kovine)
- q materiali za kalupe – neposredno litje (livarski pesek)



30

Osnovni proces gradnje predmeta	Generična skupina po standardu ASTM F2792-10	Okrajšave tehnologij
ekstrudiranje materialov	material extrusion <i>ekstrudiranje materiala</i>	FDM, PJP, FFF, FFM, CFE, MEM, MUS, FDMm, FDC ...
proces fotopolimerizacije	vat photopolymerizaton <i>fotopolimerizacija v kadi</i>	SLA, DLP Projection, Moving DLP, LCM, 3SP, LAMP, ZPP ...
	material jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje materiala</i>	PolyJet, MJM, MJP, LMJP WDM, DOD ...
lepljenje, sintranje ali taljenje praškastega materiala	binder jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje veziva</i>	3DP, CJP, BJMP ...
	<b>powder bed fusion <i>spajanje praškastega materiala</i></b>	SLS, LS, MLS, SLM, SHS, DMLS, DMP, EBM, EBF3, LBM, LaserCUSING ...
	direct energy deposition <i>lasersko navarjanje</i>	LENS, LDT, LPF ... DED
nalaganje, lepljenje ali laminiranje materiala	sheet lamination <i>laminacija pol</i>	LOM, PLT, SDL, UAM ...

31

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

### Spajanje slojev praškastega materiala (Powder Bed Fusion)

- q Selektivno lasersko sintranje (SLS, SLM, LaserCUSING)
- q Taljenje z elektronskim snopom (EBM)
- q Selektivno sintranje podjetja Blueprinter (SHS)

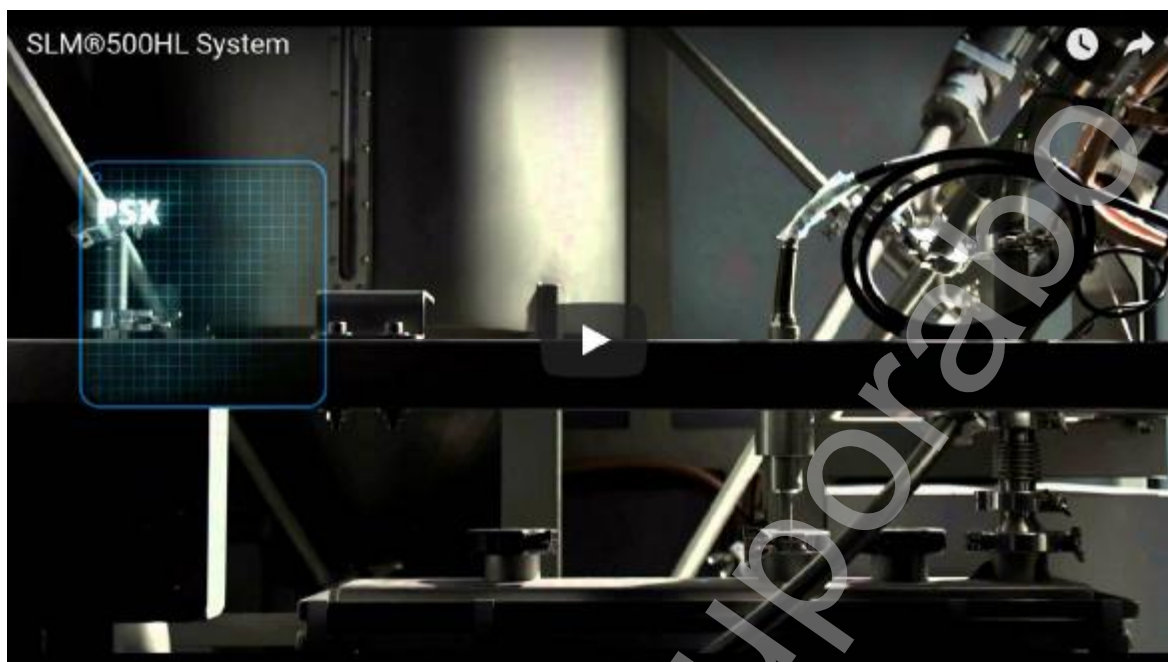
### Lasersko navarjanje (Direct Energy Deposition)



32

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

Spajanje slojev praškastega materiala (Powder Bed Fusion) - SLM



VIDEO

33

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

Spajanje slojev praškastega materiala (Powder Bed Fusion) - EBM



VIDEO

34



# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA

Spajanje slojev praškastega materiala (Powder Bed Fusion) - SHS



VIDEO

35

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS

Materiali; polimerni (PA - najlon, polistiren itd.), kovinski (zmesi jekla, titana itd.), keramika.

Osnovna tehnologija SLS > polimerni materiali, pri njenih modifikacijah tudi drugi materiali > različna poimenovanja.

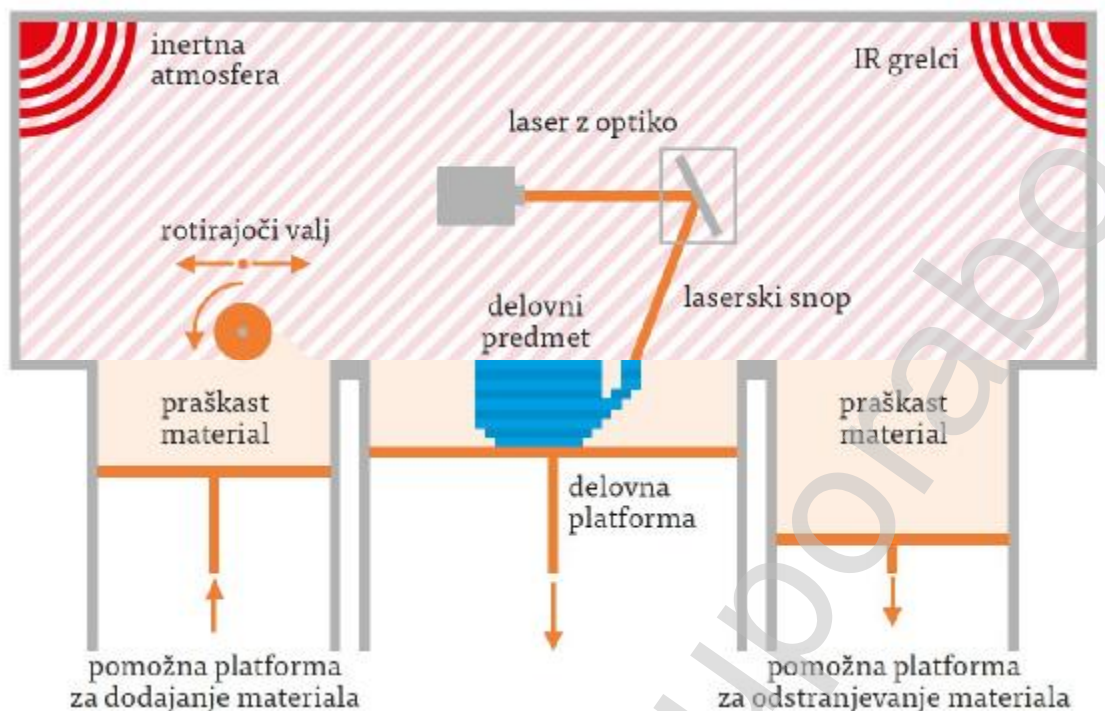
Vsem tehnologijam je skupno > ni potrebe po dodatnem podpornem materialu > naknadna obdelava ni potrebna (lahko pa infiltracija, brušenje ...).

Delci praškastega materiala (50 do 100  $\mu\text{m}$ ), pri specialnih postopkih tudi manj kot 10  $\mu\text{m}$ .

36



# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS



37

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS

## Prednosti

- q razmeroma hiter postopek
- q velika natančnost
- q velik izbor materialov
- q brez podpornega materiala
- q trajnost končnega predmeta
- q možna izdelava prototipov, funkcionalnih delov in končnih izdelkov

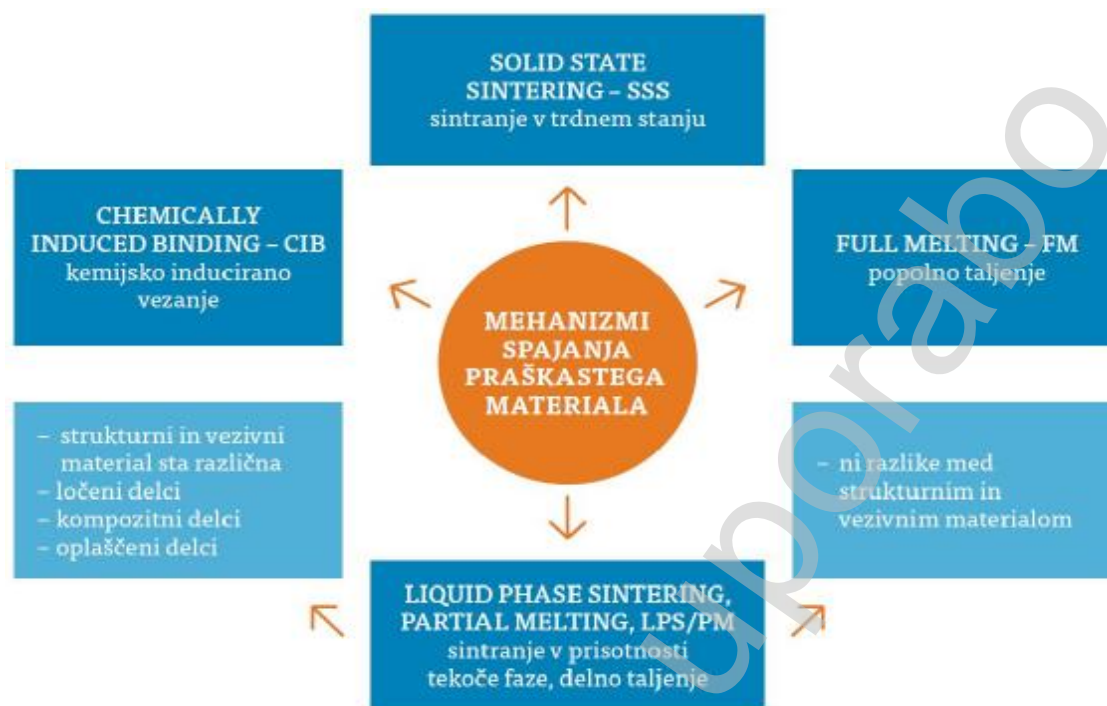
## Slabosti

- q potrebna inertna atmosfera > stroji večjih dimenzij
- q velika poraba energije za sintranje
- q za izdelavo končnih izdelkov potrebna infiltracija

38

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS

## Mehanizmi spajanja praškastega materiala

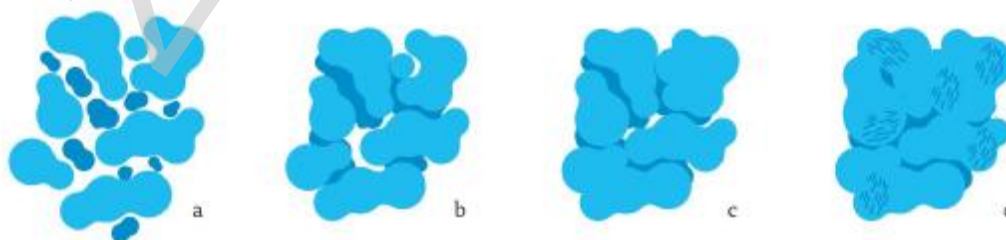


39

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS

## Sintranje v prisotnosti tekoče faze (LPS) in delno taljenje (PM)

- q do spajanja delcev prihaja v trenutku, ko je del materiala v staljenem stanju, preostanek pa v trdnem. Staljeni del materiala > lepilo, ki povezuje delce v trdnem stanju.
- q mogoče povezati v čvrsto celoto tudi delce materiala z visoko temperaturo taljenja

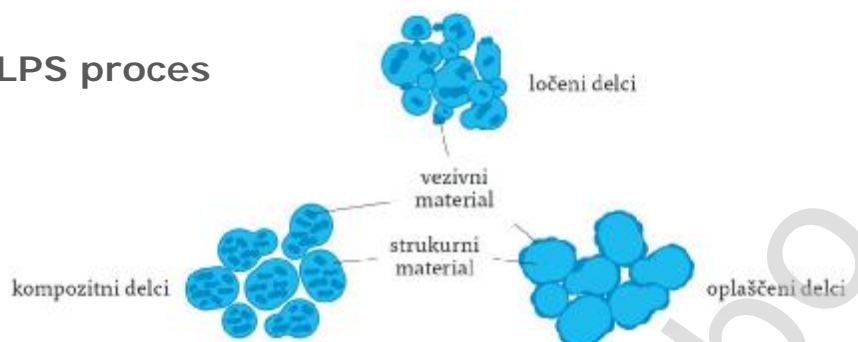


a) iniciacija, b) taljenje, c) raztapljanje in reprecipitacija, d) denzifikacija

40

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS

Materiali za LPS proces



Ločeni delci (strukturni - jeklo, vezni - polimer) > poroznost.

Kompozitni delci (mešanica polimernega veziva in strukturnega materiala (polimer z višjo T taljenja, kovine ali keramike) > npr. Duraform GF (glass filled nylon).

Oplaščeni delci (npr. Laser Form > jekleni prah s polimerno oblogo) > hitrost.



41

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS

Materiali za tehnologijo SLS – e-book

The Ultimate 3D Manufacturing Solution

## Selective Laser Sintering

Expand your manufacturing capabilities with production-grade materials

**3D SYSTEMS** [3dsystems.com](http://3dsystems.com)

42

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – SLS



[https://www.youtube.com/watch?v=9E5MfBAV\\_tA](https://www.youtube.com/watch?v=9E5MfBAV_tA)

43

Osnovni proces gradnje predmeta	Generična skupina po standardu ASTM F2792-10	Okrajšave tehnologij
ekstrudiranje materialov	material extrusion <i>ekstrudiranje materiala</i>	FDM, PJP, FFF, FFM, CFF, MEM, MUS, FDMm, FDC ...
proces fotopolimerizacije	vat photopolymerizaton <i>fotopolimerizacija v kadi</i>	SLA, DLP Projection, Moving DLP, LCM, 3SP, LAMP, ZPP ...
	material jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje materiala</i>	PolyJet, MJM, MJP, LMJP WDM, DOD ...
lepljenje, sintranje ali taljenje praškastega materiala	binder jetting <i>kapljično nanašanje ali brizganje veziva</i>	3DP, CJP, BJMP ...
	powder bed fusion <i>spajanje praškastega materiala</i>	SLS, LS, MLS, SLM, SHS, DMLS, DMP, EBM, EBF3, LBM, LaserCUSING ...
	direct energy deposition <i>lasersko navarjanje</i>	LENS, LDT, LPF ... DED
nalaganje, lepljenje ali laminiranje materiala	sheet lamination <i>laminacija pol</i>	LOM, PLT, SDL, UAM ...

44



# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – DED

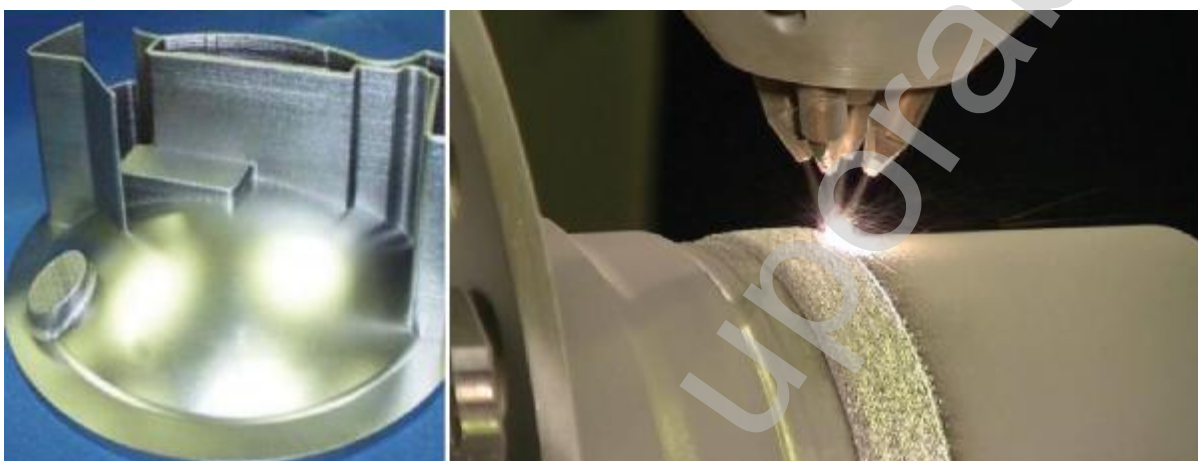
Lasersko navarjanje (Direct Energy Deposition) – DED

q za tisk in popravljanje izdelkov

q hibridna izdelava izdelkov

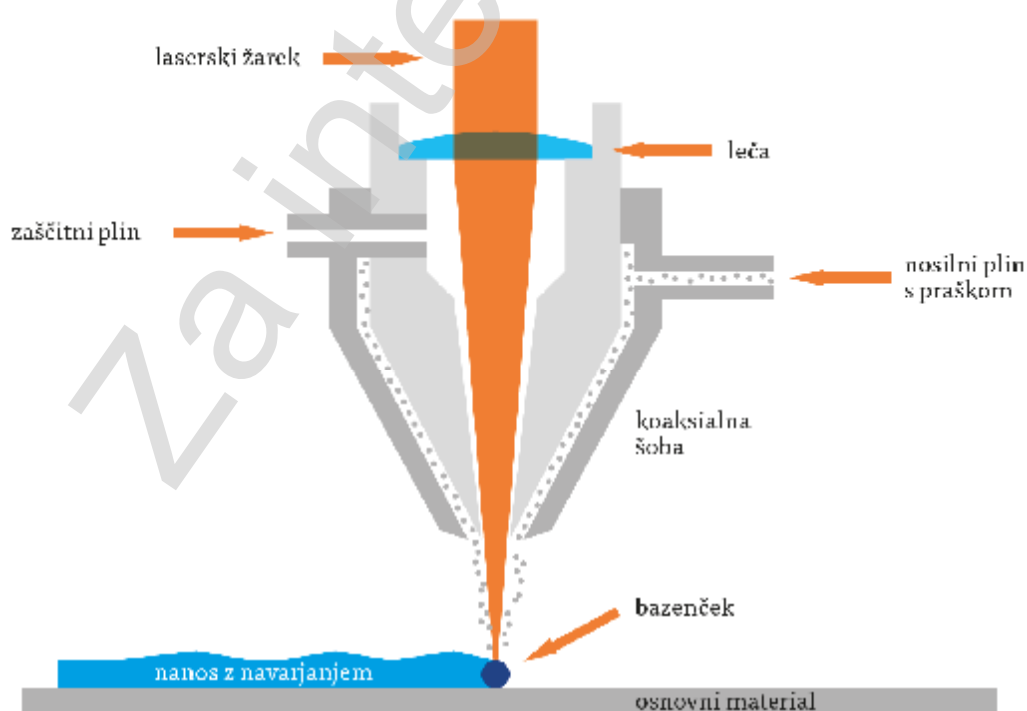
q vojaška, letalska, vesoljska, orodjarska industrija

q Materiali: kovinski praškast material visoke kakovosti, kroglaste oblike 40 do 150  $\mu\text{m}$



45

# TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – DED



46



## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – DED

Material	Strižna trdnost (MPa)	Porušna natezna trdnost (MPa)	Raztezek (%)
LENS Ti-6Al-4V	848	955	15
»Klasični« Ti-6Al-4V	883	952	14
LENS SS316	276	661	67
»Klasični« SS316	289	578	50
LENS Ni 625 (Inconel 625)	579	930	38
»Klasični« Ni 625 (Inconel 625)	400	834	30

Zlitine na osnovi jekla, Al, Cu, čisti W, Ta, Ti ...

47

## TEHNOLOGIJE Z UPORABO PRAŠKASTEGA MATERIALA – DED



<https://www.youtube.com/watch?v=mkUVURLkxS4>

48