



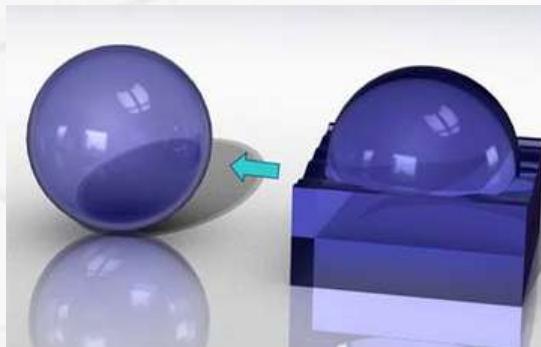
Design for Additive Manufacturing (Projektovanje za aditivnu proizvodnju)

Nebojša Bogojević

2020 Februar - Gračanica BiH

Aditivna proizvodnja

- Nov – Stari pristup izrade delova
 - Za ljude – nov postupak izrade delova – 40 god.
 - Za prirodu – pristup odabran od početka stvaranja sveta
- Delovi se formiraju **dodavanjem materijala** tamo gde je potrebno
- Gradnja se vrši u slojevima



Aditivna proizvodnja

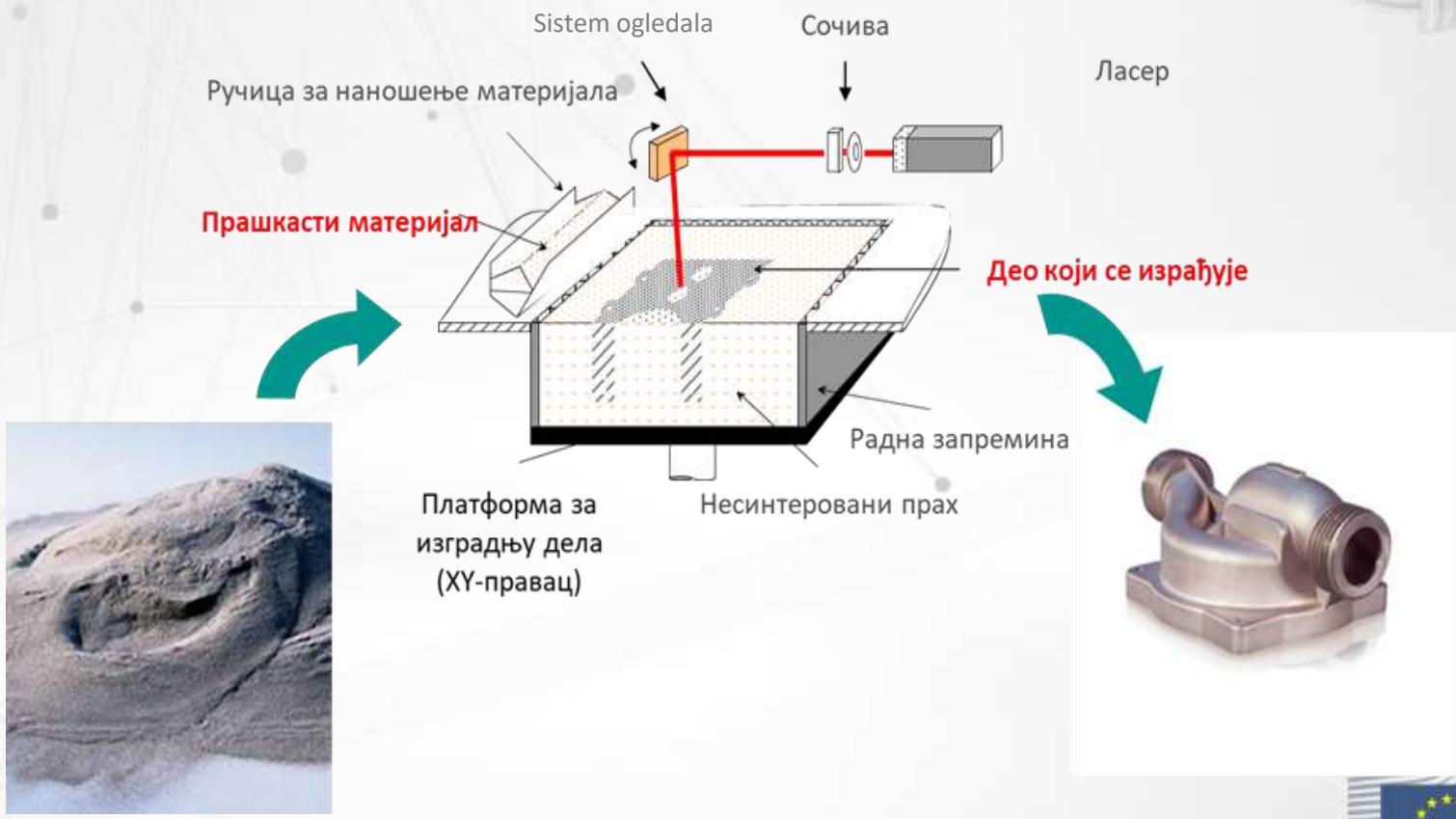
- Kategorije AP

- **Fotopolimerizacija u kadi (VAT polymerization)** – modeli se formiraju kristalizacijom tečne smole. Kristalizacija tečnosti se vrši pomoću svetlosti,
- **Direktna 3D štampa (Material jetting - MJ)** – ova tehnologija je vrlo slična štampačima, modeli se formiraju tako što se materijal dodaje u vidu sitnih kapljica,
- **Veživna 3D štampa (Binder jetting - BJ)** – modeli se formiraju tako što se osnovnom materijalu, koji je u vidu praha, dodaje vezivno sredstvo u vidu tečnosti,
- **Ekstrudiranje materijala (Material extrusion - ME)** – materijal se gura kroz zagrejani ekstruder, usled čega dolazi do njegovog topljenja i model se formira taloženjem istopljenog materijala u x-y ravni,
- **Fuzija praškastog supstrata (Powder Bed Fusion - PBF)** – topljenjem tankog sloja osnovnog materijala, koji je u vidu finog praha, vrši se formiranje modela
- **Laminacija folija (Sheet Lamination - SL)** – modeli se igrajuju od spajanjem tankih listova
- **Nanošenje materijala primenom usmerene energije (Direct energy deposition - DED)** – formiranje modela se vrši topljenjem osnovnog materijal, koji se dodaje u vidu žice ili praha, pomoću lasera, elektronskog zraka ili električnog luka.



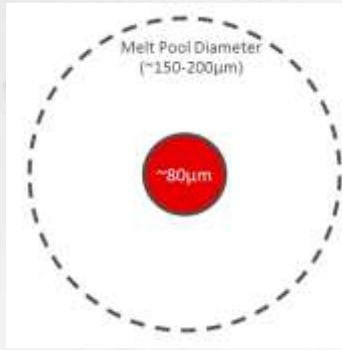
Aditivna proizvodnja

- Selectivno lasersko sinterovanje (SLS i DMLS)

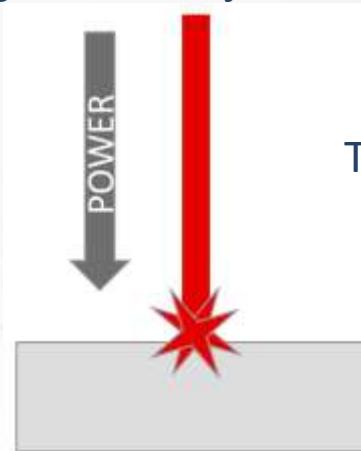


Aditivna proizvodnja

SLS – osnovne karakteristike procesa laserskog sinterovanja



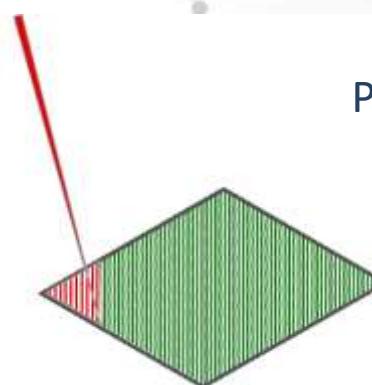
Prečnik lasera i
bazen topljenja
materijala



Tranzicija energije



Raspodela energije
u delu koji se gradi



Putanja lasera

Aditivna proizvodnja

- AP nam daje mnogo više slobode za proizvodnju delova u odnosu na konvencionalne postupke obrade
- Svaka tehnologija AP ima svoje karakteristike i svoja ograničenja
- Projektovati a ne obazirati se na osnovna načela projektovanja za AP -> vodi prema neuspesno izradi dela



Aditivna proizvodnja

- “Complexity is free” – ipak MIT!
- Mogu se proizvesti složeni oblici ali se moraju ispoštovati ograničenja procesa AP
- Potrebno je poznavanje procesa projektovanja, mehanike, termodinamike, metalurgije i specifičnosti određenog procesa AP
- Poznavanje dopunskih-pratećih postupaka obrade

Aditivna proizvodnja

- Mehanika
 - Poznavanje osobina mašine - sistema za AP, međusobnih zavisnosti između materijala, dela i energije potrebne za izradu delova
- Termodinamika
 - nastanak i protok topline pri procesu izrade delova i odvođenja topline sa mesta topljenja materijala
- Metalurgija
 - Poznavanje hemijskih procesa, kristalne strukture, termičke obrade, dopunskih postupaka obrade,...

Pravila projektovanja

Projektovanje proizvoda

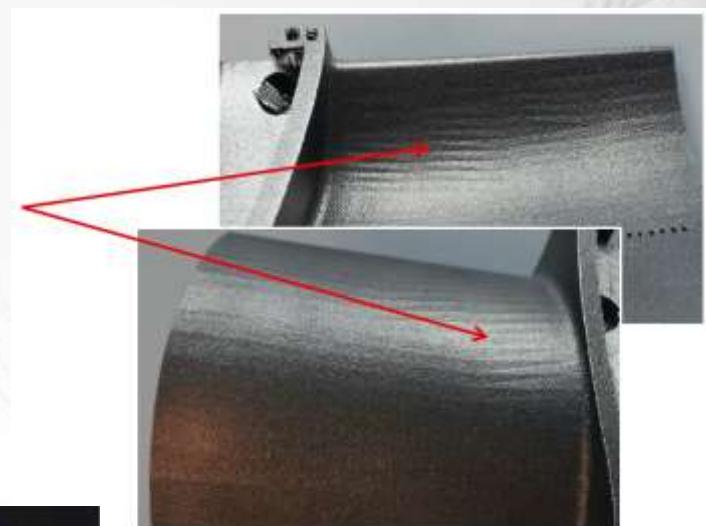
Projektovanje za digitalnu
proizvodnju

Projektovanje za aditivnu
proizvodnju

Projektovanje za specifičnu
tehnologiju aditivne proizvodnje

Pravila projektovanja

- Nije projektovanje ali može da bude vrlo bitno pravilo!!!
 - Konverzija CAD formata u STL
 - Loša rezolucija konvertovanja
 - Finija rezolucija – ogroman fajl



Pravila projektovanja

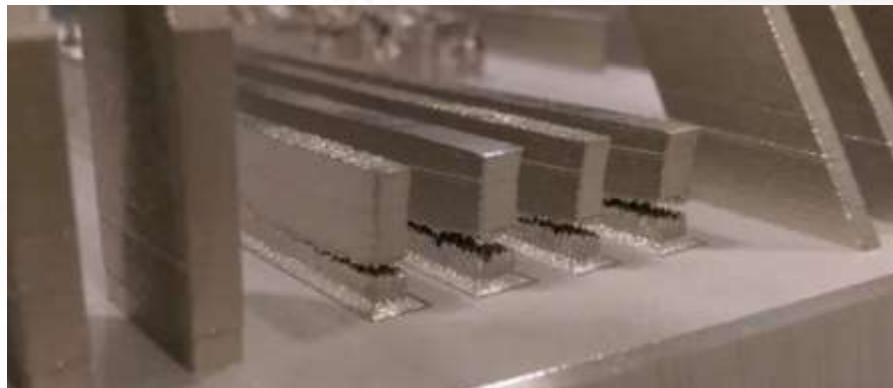
- Generalna pravila za projektovanje
 - Vrsta materijala
 - Gabariti dela
 - Minimalni/maksimalni oblik na delu
 - Geometrija dela
 - Integracija delova
 - Tolerancije
 - Dodatne noseće strukture
 - Zarobljeni osnovni materijal
 - Orientacija dela

Pravila projektovanja

- Vrsta materijala -> u najvećoj meri definiše tip AP koji će se koristiti.
- Nije moguće koristit bilo koji materijal sa bilo kojim postupkom AP (SLA – materijali osetljivi na UV zračenje, FDM – termoplastike u zadnje vreme i metal, EBM (Electron Beam Melting) - samo metal, SLS – i termoplastike i metali)
- Kod određenih materijala pri AP se javljaju veliki zaostali naponi koji mogu da prouzrokuju velike probleme u procesu proizvodnje (SLS) dok kod drugih postupaka (EBM) problemi sa zaostalim naponima ne postoje

Pravila projektovanja

Uticaj zaostalih napona kod SLS-a metala (Nerđajući metal PH1)



Pravila projektovanja

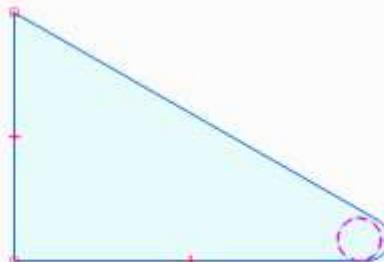
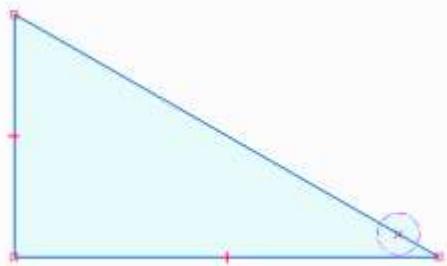
- Gabariti dela koji treba da se napravi
 - Kod AP veličina radnog prostora je jedan od ograničavajućih faktora
 - U nekim slučajevima je moguće radni komad izdeliti na nekoliko delova i kasnije spojiti sve u celinu (primer lepljenja delova nakon izrade SLS-om)
 - U drugim slučajevi nije moguće izraditi deo izabranim postupkom AP



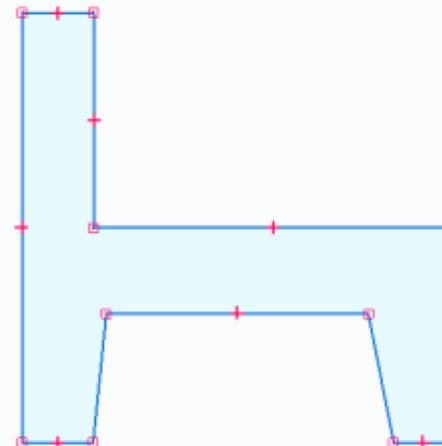
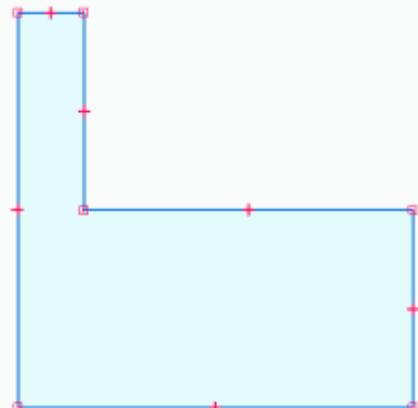
Pravila projektovanja

- Minimalna/maksimalna veličina oblika na delu
 - Minimalna veličina oblika na delu je određena karakteristikom procesa
 - SLS – prečnik tačke lasera, prečnik kuglice praha, veličina „pool“-bazena topljenog materijala – **generalno min oblik je velišine tačke lasera 0,2mm za metal (M280) odnosno 0.25 mm za plastične delove (P100)**
 - FDM – prečnik žice, prečnik mlaznice, korak u sistemu za pozicioniranje
 - SLA – rezolucija ekrana ili veličina tačke lasera
 - Minimalna veličina oblika na delu je određena i mehaničkim karakteristikama materijala
 - SLS – moguce je napraviti osovinu precnika 0,8 mm ali nosivost jednog takvog dela je ...
 - Maksimalna dimenzija oblika na delu su određene karakteristikama materijala i procesa – kod izuztno dugačkih i ravnih delova mogu biti izraženi zaostali naponi ili termalna naprezanja koje mogu dovesti do krivljenja delova, ..

Pravila projektovanja



Ograničenja vezana za određeni postupak AP

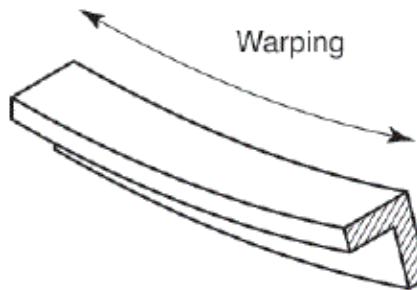
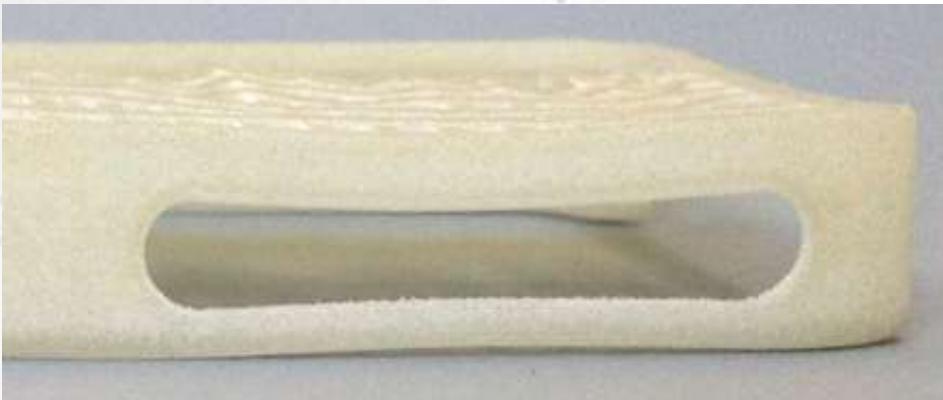


Generalna preporuka kod AP

Pravila projektovanja

- Problemi usled nagomilavanja materijala i neravnomernih termičkih opterećenja
 - Warping – krivljenje delova

SLS-Plastične mase



FDM

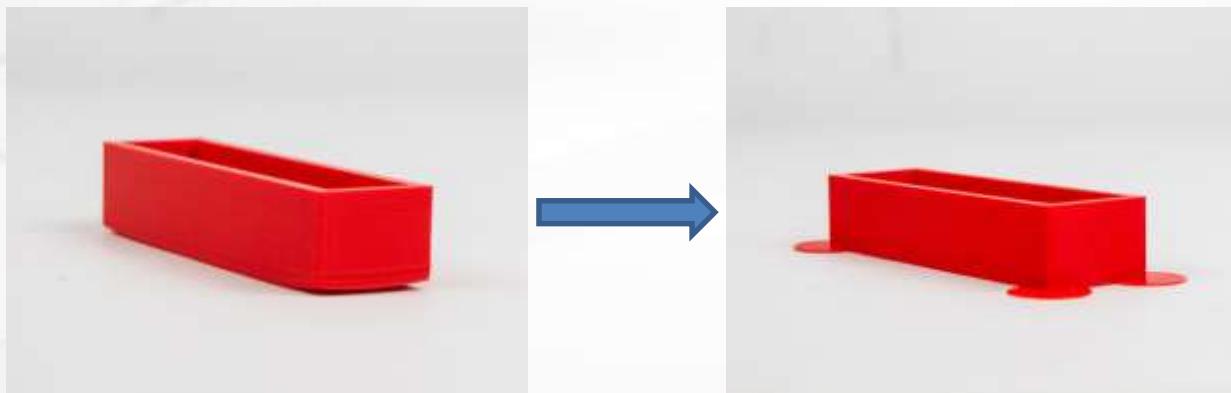


Pravila projektovanja

- Kod različitih tehnologija različita rešenja jednog istog problema
- SLS plastične mase – reorientacija dela prilikom izgradnje

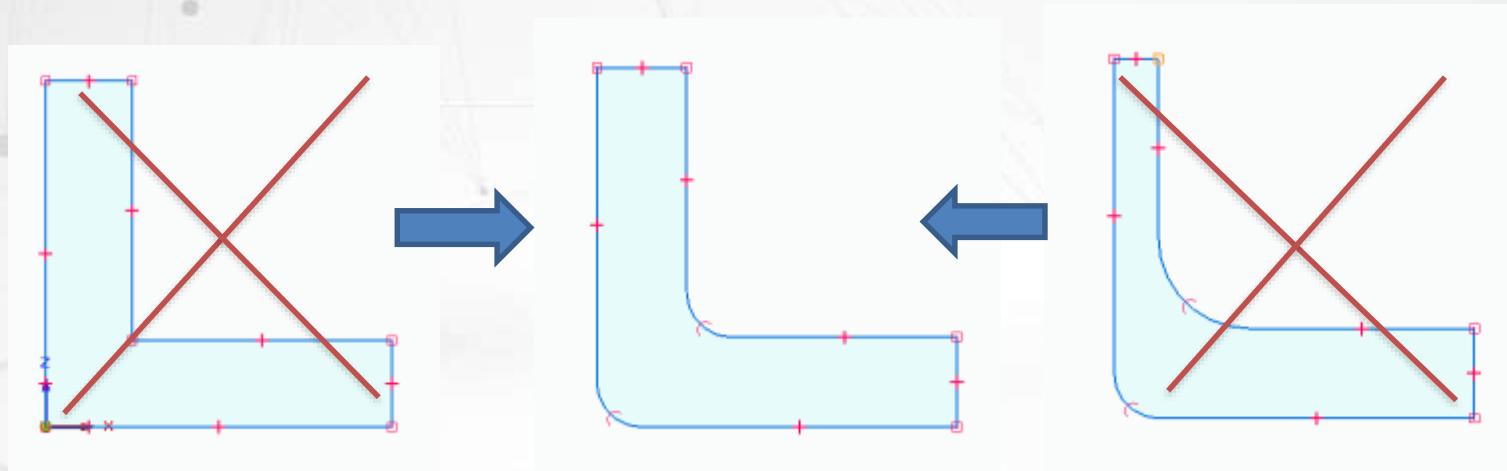


- FDM – dodavanje dodatnih elemenata



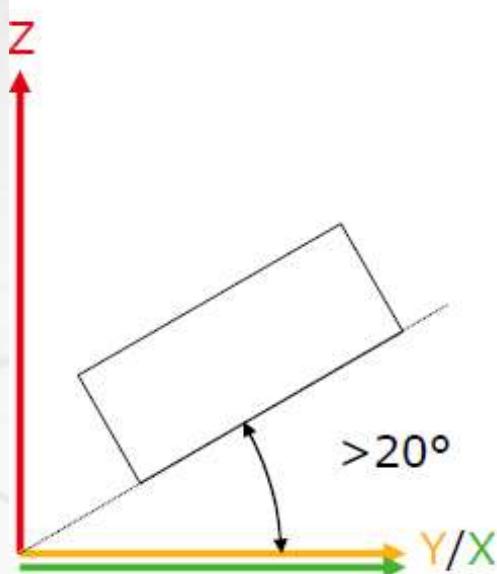
Pravila projektovanja

- SLS-plastični delovi
 - Izbegavanje oštih prelaza i nagomilavanja materijala



Pravila projektovanja

- Izrada delova u slojevima ima i svoje nedostatke.
- Pojava stepenica na površini delova ukoliko je ugao nagiba prema x-y ravni manji od 20 stepeni kod delova izrađenih SLS od plastičnih masa



Pravila projektovanja

- **Zazori:**
- x i y pravac – 0,3 do 0,5 mm
- z pravac – 0,5 do 0,6 mm

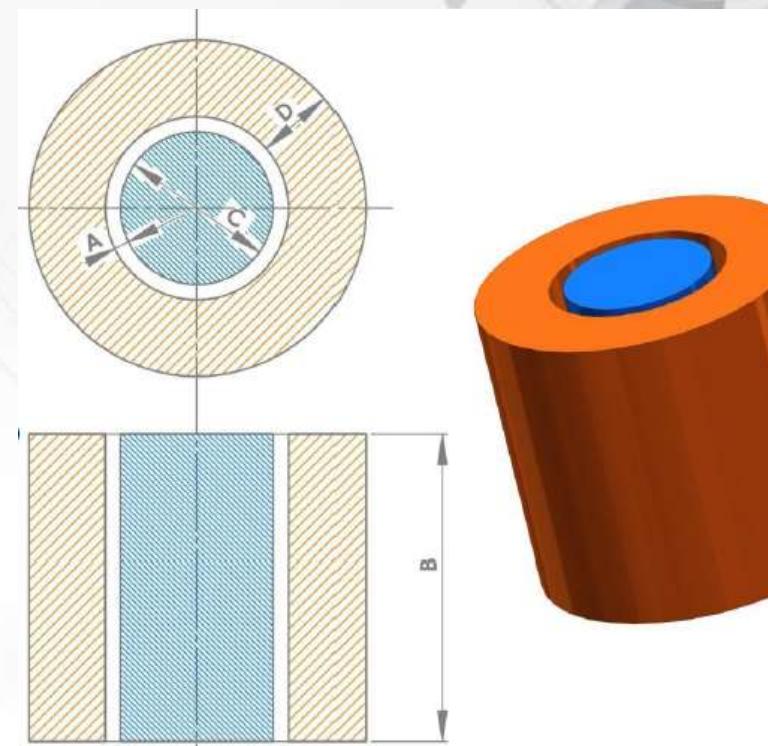
Variable:

Veličina zazora A

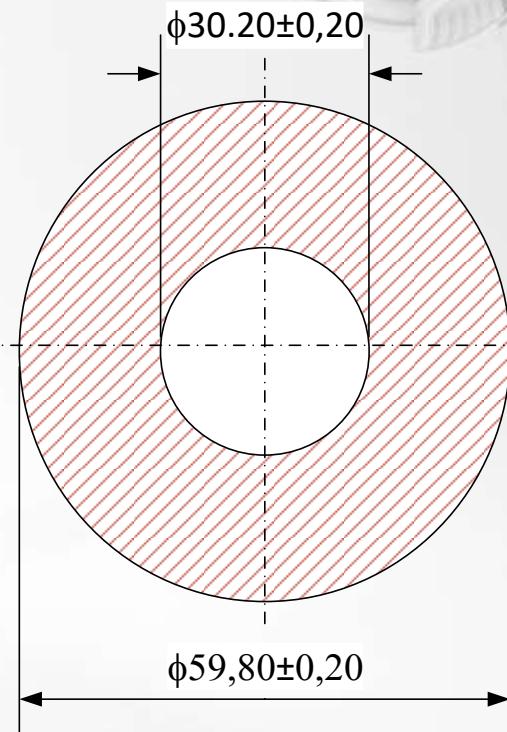
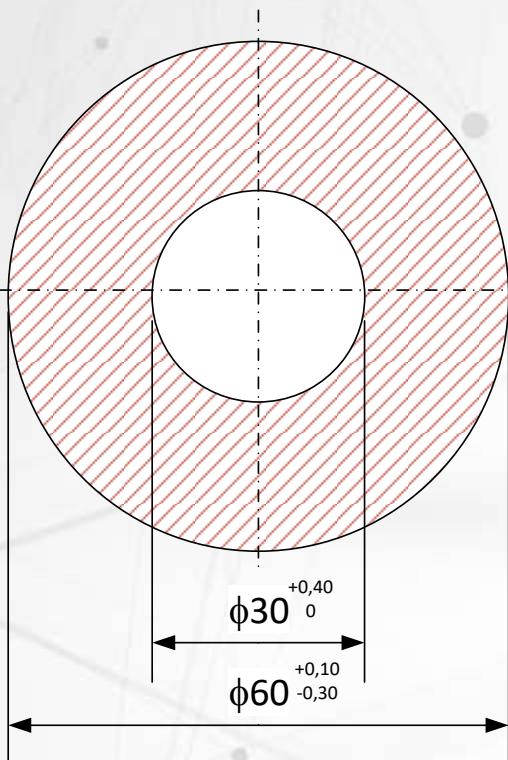
Prečnik osovine C

Debljina D

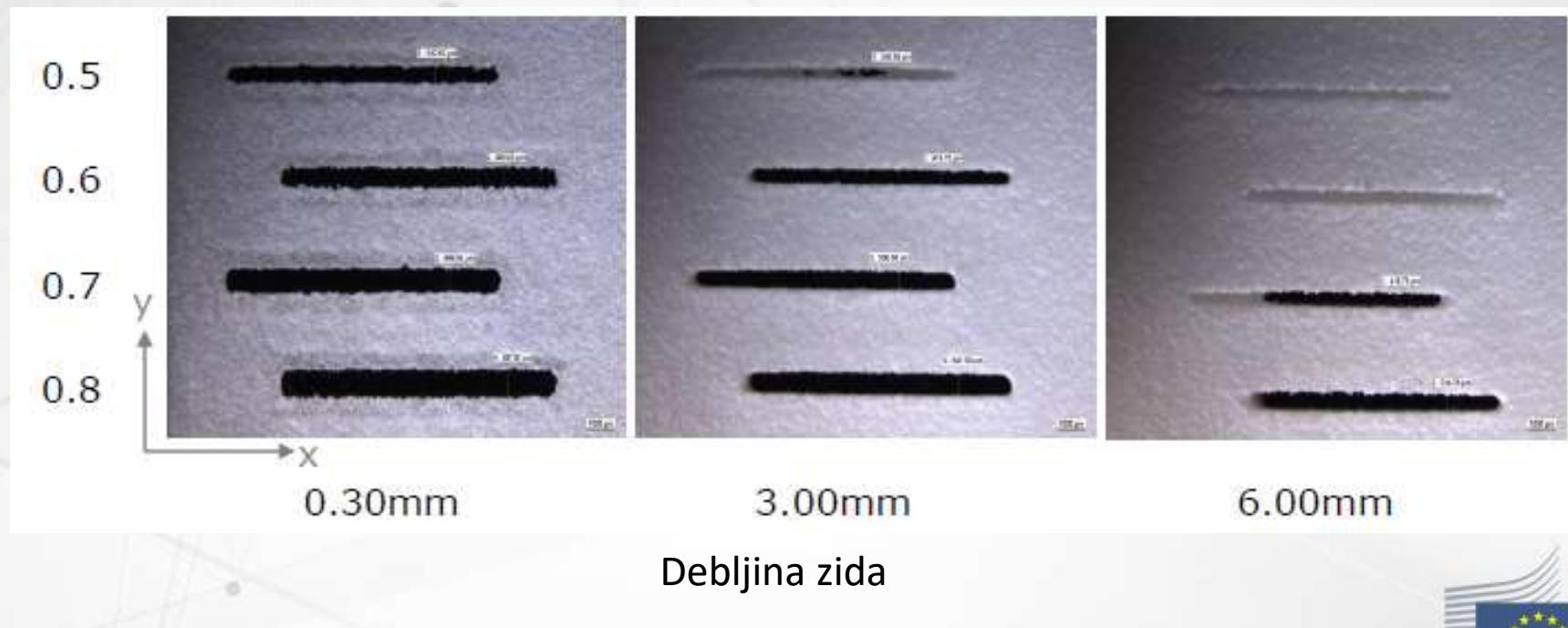
Visina zgloba B

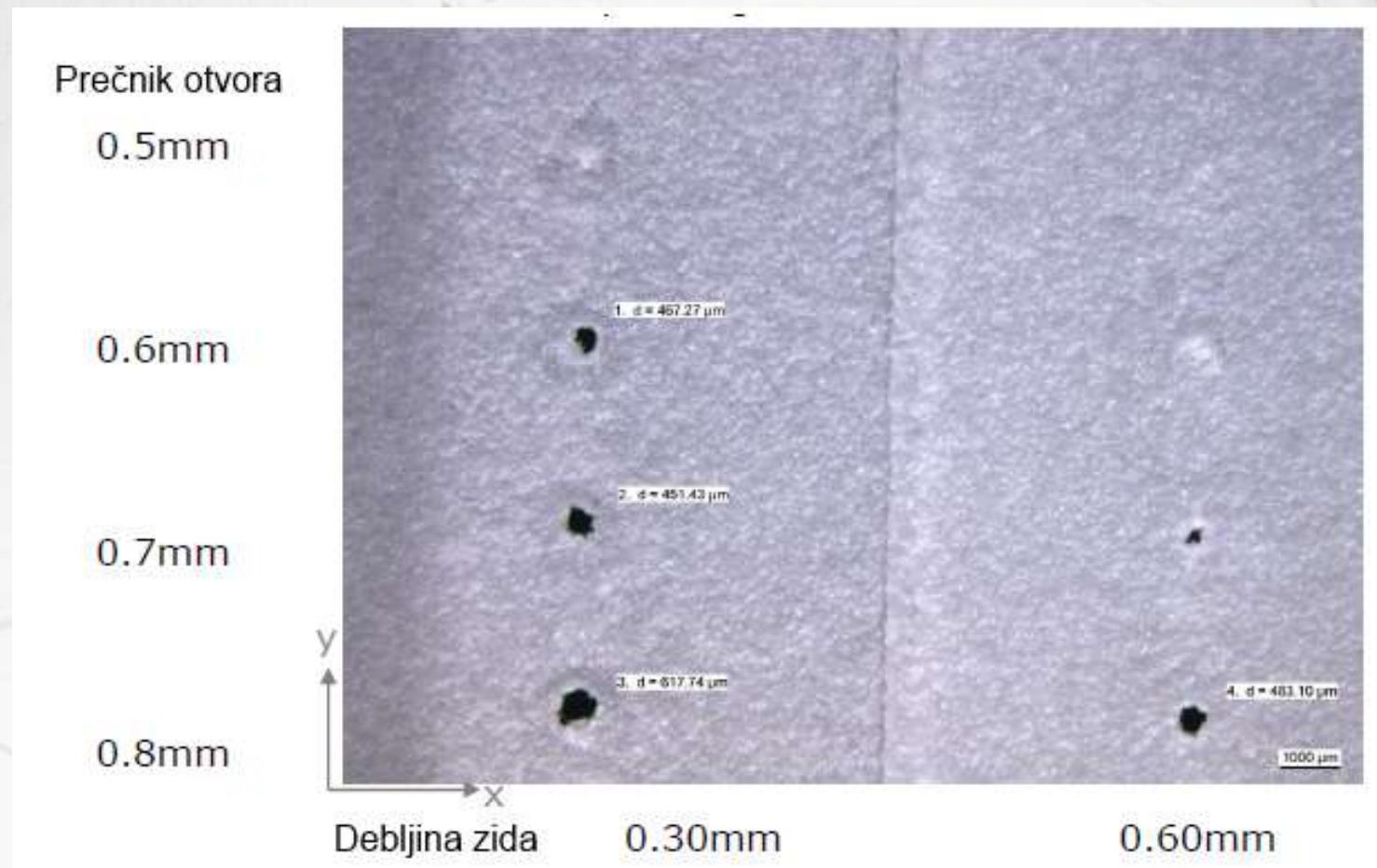


- **Tolerancijska polja**
- Potrebno je definisati simetrična tolerancijska polja zbog samog procesa proizvodnje.
- < - Asimetrično tolerancijsko polje
- Simetrično tolerancijsko polje ->



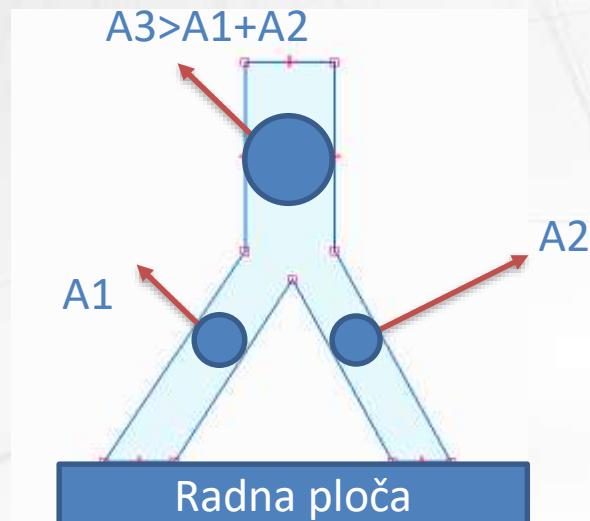
- Procepi i otvori



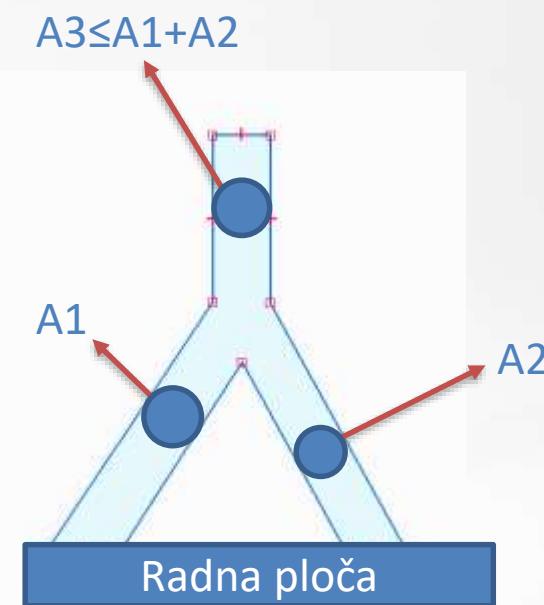


Pravila projektovanja

- DMLS – lasersko sinterovanje metala
- Tranzicija oblika dela



Nepoželjno

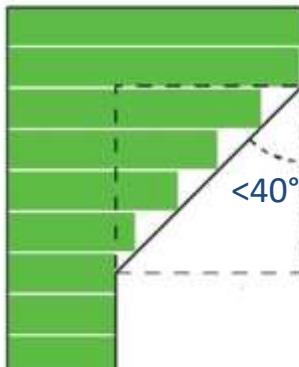


Poželjno

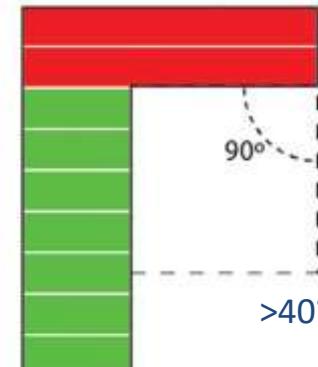
Vrlo bitno od izgradnje delova od metala zbog tranzicije
toplote od mesta gradnje do radne ploče

Pravila projektovanja

- Konzole
 - Za svaku površinu dela koji zaklapa sa x-z ravni ugao manji od 40 stepeni mora da se gradi odgovarajuća noseća struktura



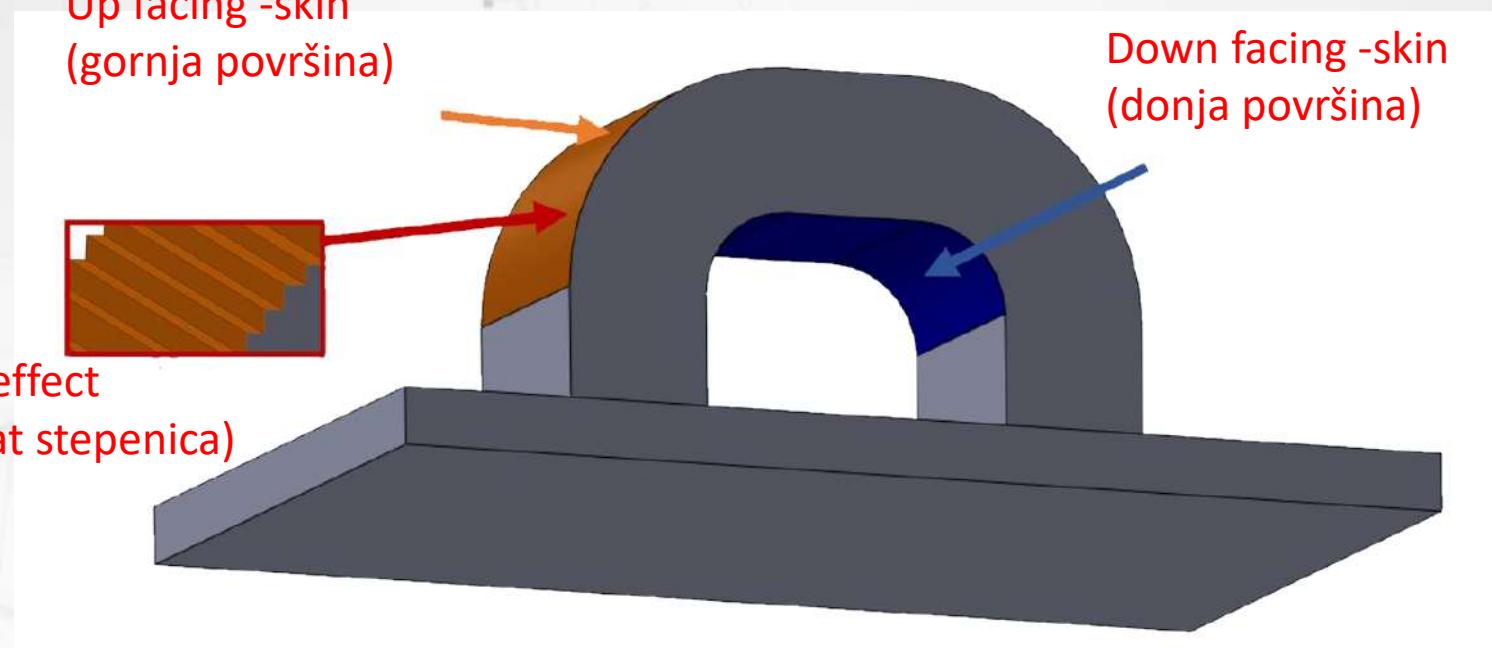
Nije potrebna noseća struktura



Potrebna je noseća struktura

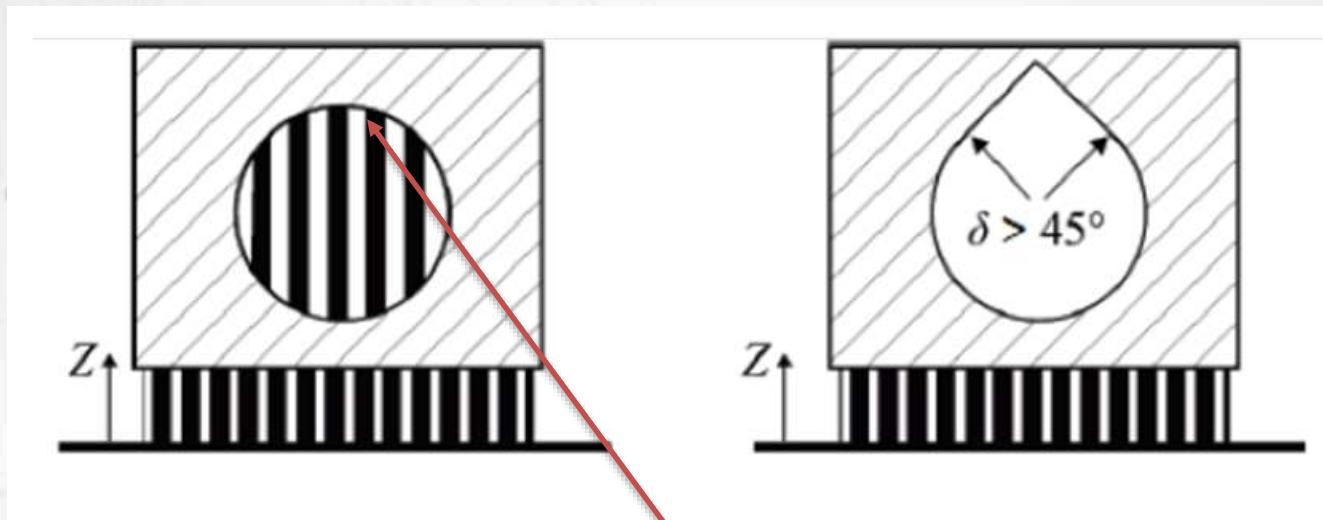
Pravila projektovanja

- Definicija površina



Pravila projektovanja

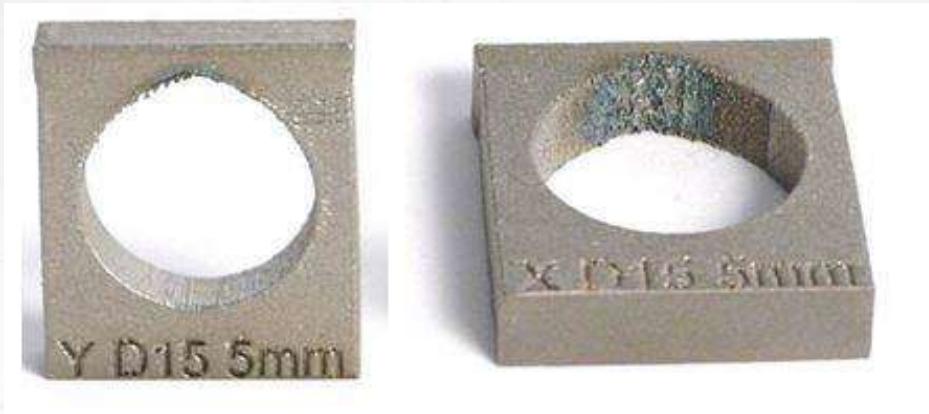
- Samonoseće strukture



- Za otvore prečnika do 8 mm nisu potrebne noseće strukture
- Problematičan je kvalitet unutrašnje gornje površine otvora i kanala

Pravila projektovanja

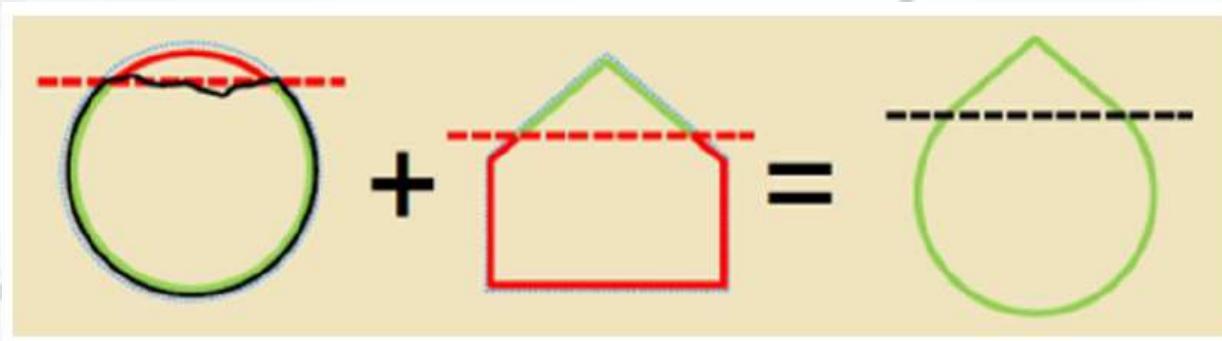
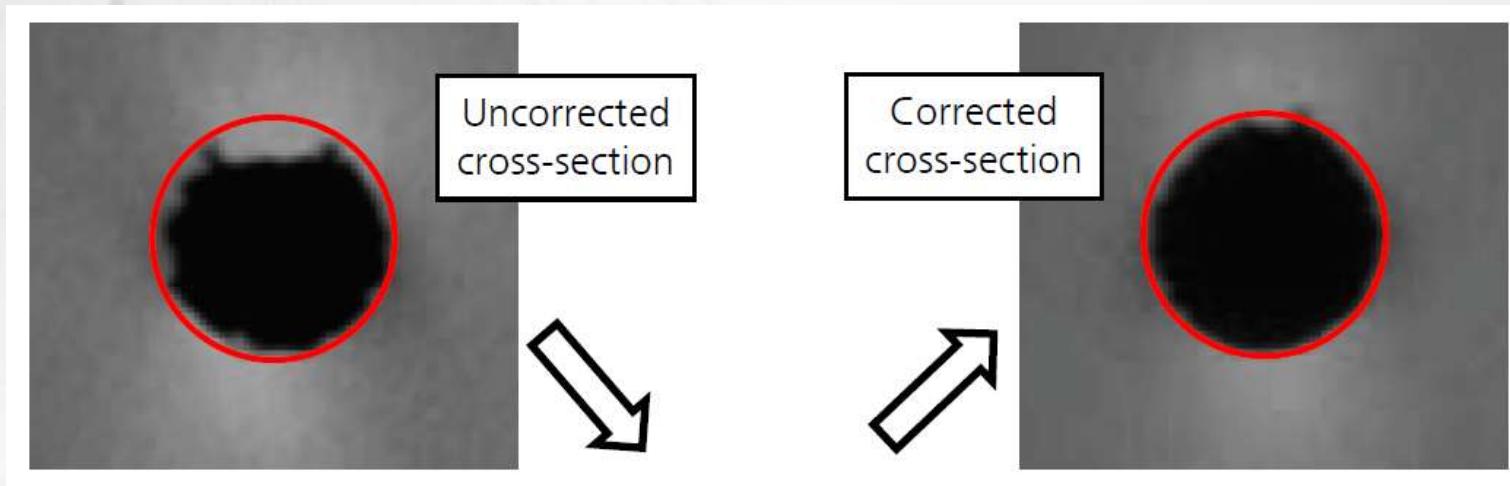
- Samonoseće strukture



Primer izrade otvora prečnika 15 mm bez noseće strukture
Na desnoj slici je prikazan izgled donje površine i kvalitet izgrađene
površine dela usled nedostatka iste

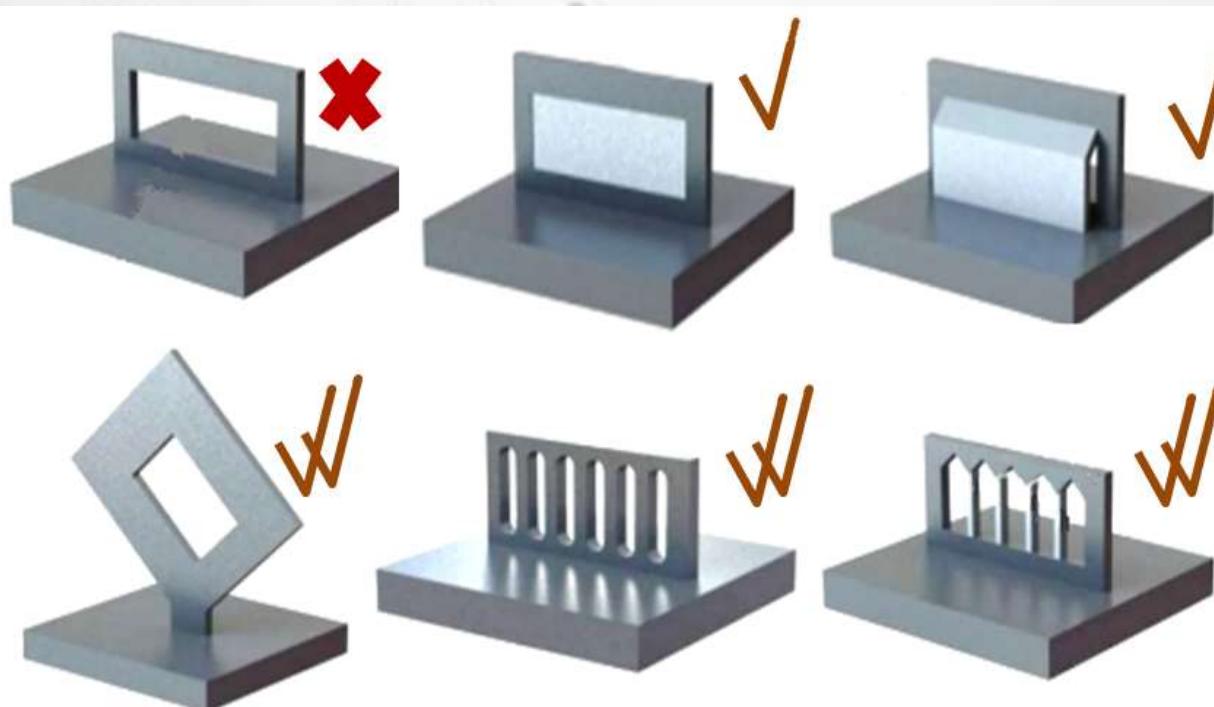
Pravila projektovanja

- Samonoseće strukture



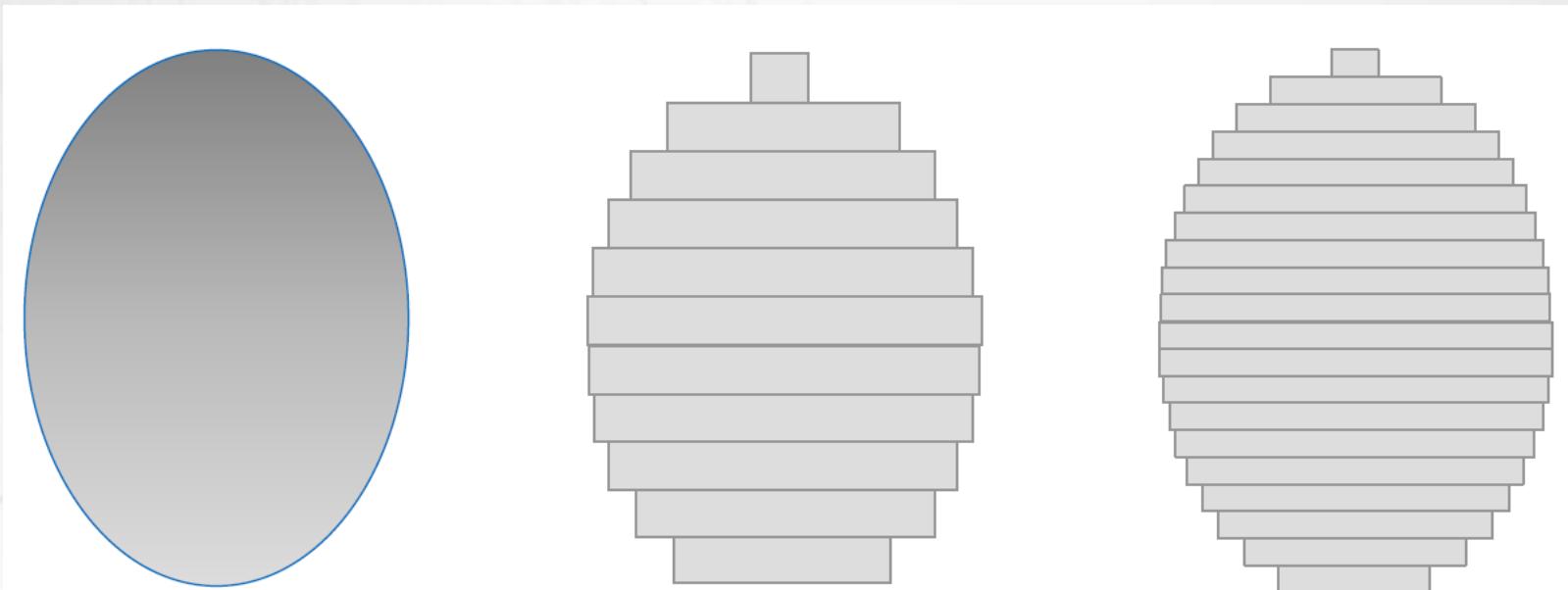
Pravila projektovanja

- Prikaz nekoliko rešenja izgradnje otvora na delu



Pravila projektovanja

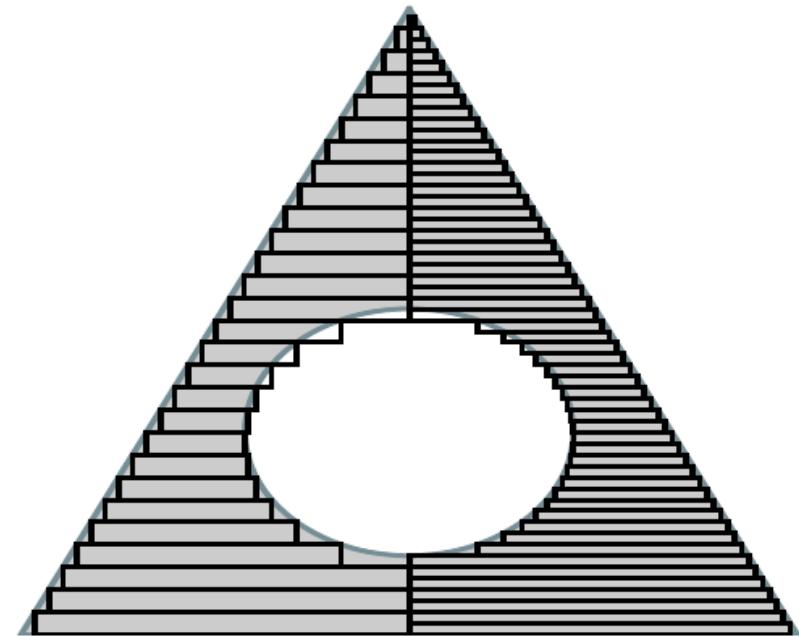
- Problemi proizvodje u slojevima



Više slojeva – bolje se interpretira oblika dela
Proces gradnje delova je duži
Fajl koji opisuje krajnji deo je veći

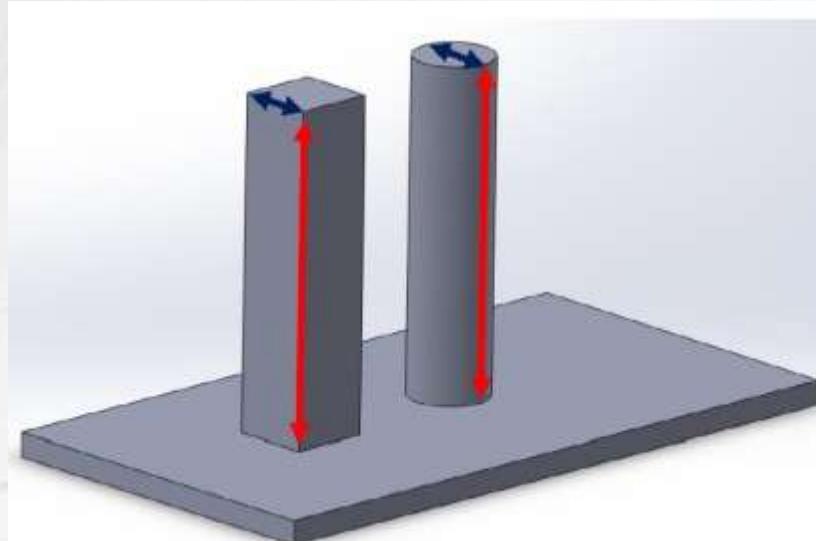
Pravila projektovanja

- Rezoluciju u x-z ravni definiše mogućnost kontrolisanja lasera
- Rezoluciju u z pravcu definiše debljina sloja i ima velikog uticaja na:
 - Brzinu gradnje dela
 - Stabinost procesa
 - Dimenzionu tačnost dela
 - Kvalitet površine
 - Mehaničke osobine
 - itd



Pravila projektovanja

- Odnos visine i širine (prečnika)



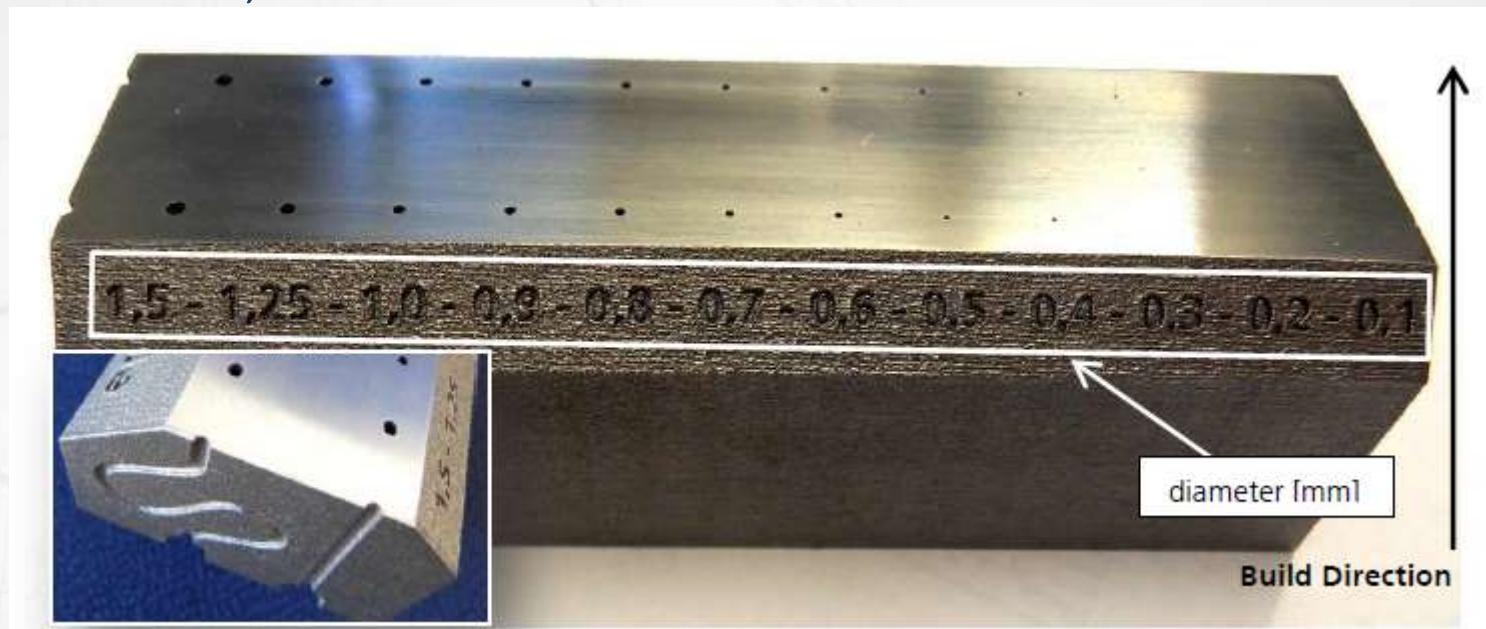
		Height [mm]					
		<1	1	10	20	30	>30
Width	<1						
	1						
2	1						
	2						
3	1						
	2						
5	1						
	2						
>5	1						
	2						

		Height [mm]					
		<1	1	2	5	10	>10
Side length / Diameter	<1						
	1						
2	1						
	2						
3	1						
	2						
5	1						
	2						
>5	1						
	2						

Kod visokih delova usled prelaska rekoatera dolazi do vibracija delova i moguće su deformacije tokom prelaska rekoatera
Kad god je to moguće, težiti $H/B(D) < 8$

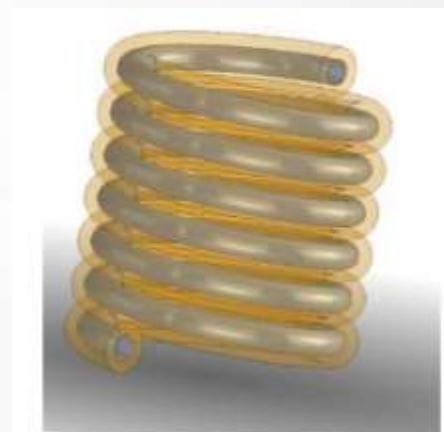
Pravila projektovanja

- Minimalni prečnik otvora
 - Preporuka **1 mm**
 - Ukoliko su pravi otvori vazduh može da prođe kroz otvor sa projektovanim prečnikom od 0,4 mm
 - Ukoliko su kanali nepravilnog oblika, vazduh može da prođe kroz otvore 0,6 mm



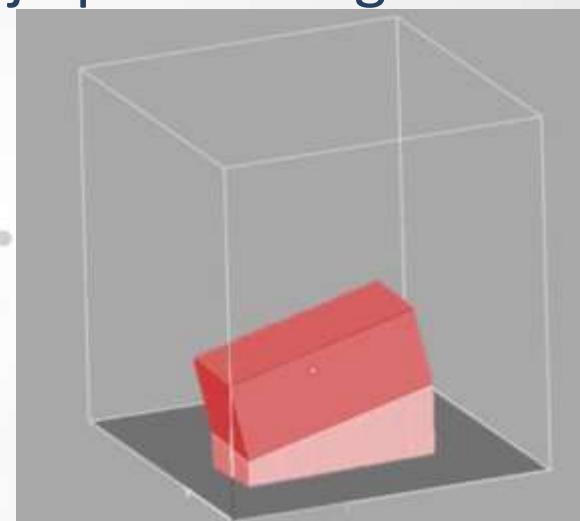
Zarobljeni osnovni materijal

- Odstranjivanje praha
 - Problemi kod dugih otvora sa malim prečnikom
 - Kompleksne structure
 - Na datom primeru moguce je kompresorom ocistit samo 1 ili 2 zavojnice, ostali prah je zarobljen



Pravila projektovanja

- Orientacija dela za proizvodnju
 - Potrebno je razmišljati o ovom problemu već pri projektovanju delova, posebno kod delova od metala
 - Deo je pogodan za izradu AP iako je potrebno graditi dodatne noseće strukture!!
 - Ima veliki uticaj na:
 - Kvalitet delova
 - Mogućnost izgradnje delova
 - Karateristike delova
 - Cenu
 - Cenu dodatne obrade delova



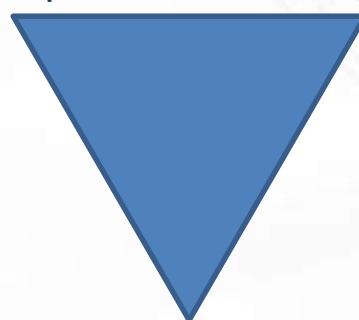
Pravila projektovanja

- Kod svake tehnologije AP je drugaciji princip orijentacije dela

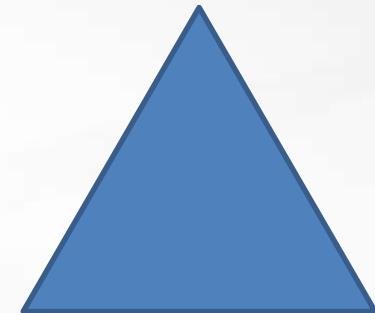
DMLS
metal



SLS
plastične mase



FDM
plastične mase



Pravila projektovanja

- Orientacija dela:
 - Kvalitet delova
 - Mogućnost izgradnje delova
 - Karateristike delova
 - Cenu
 - Cenu dodatne obrade delova



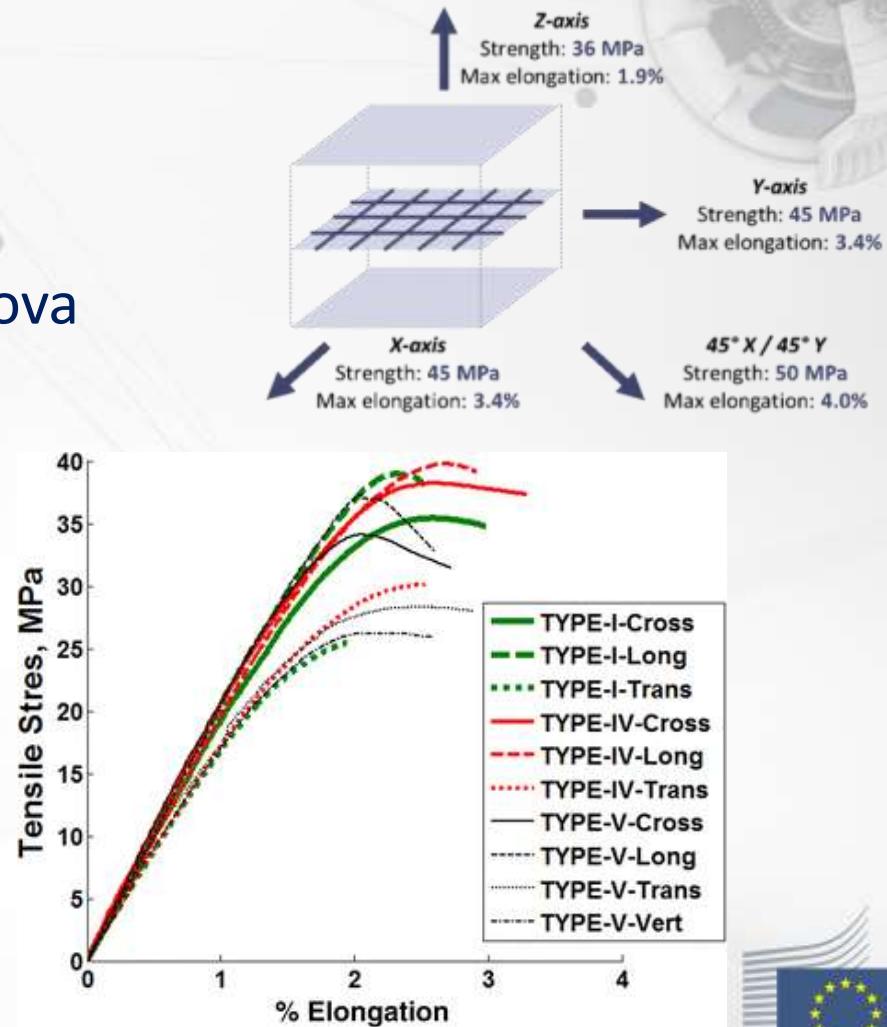
Pravila projektovanja

- Orientacija dela:
 - Kvalitet delova
 - Mogućnost izgradnje delova
 - Karateristike delova
 - Cenu
 - Cenu dodatne obrade delova



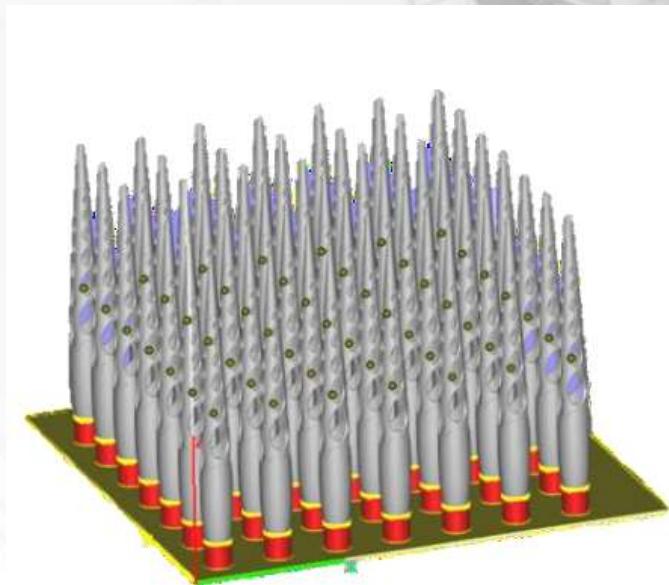
Pravila projektovanja

- Orientacija dela:
 - Kvalitet delova
 - Mogućnost izgradnje delova
 - Karateristike delova
 - Cenu
 - Cenu dodatne obrade delova



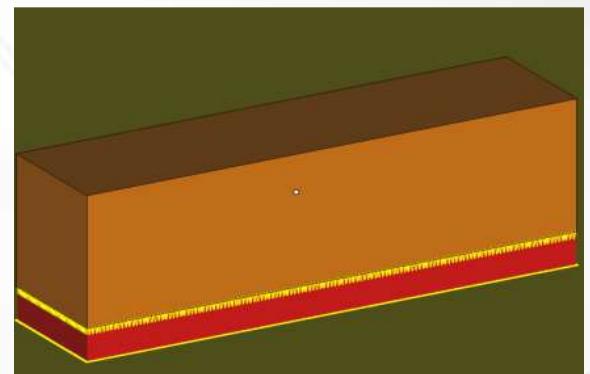
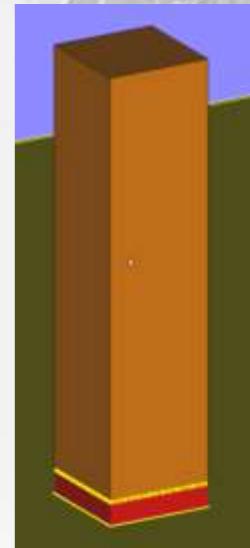
Pravila projektovanja

- Orjentacija dela:
 - Kvalitet delova
 - Mogućnost izgradnje delova
 - Karateristike delova
 - **Cenu**
 - Cenu dodatne obrade delova



Pravila projektovanja

- Orientacija dela:
 - Kvalitet delova
 - Mogućnost izgradnje delova
 - Karateristike delova
 - Cenu
 - **Cenu dodatne obrade delova**



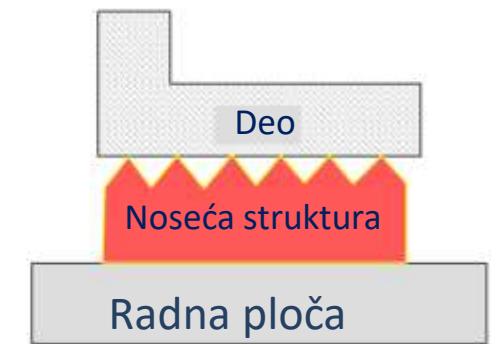
Pravila projektovanja

- Noćeće strukture i njihova namena

Učvrstiti deo na jednoj poziciji u radnoj zapremini

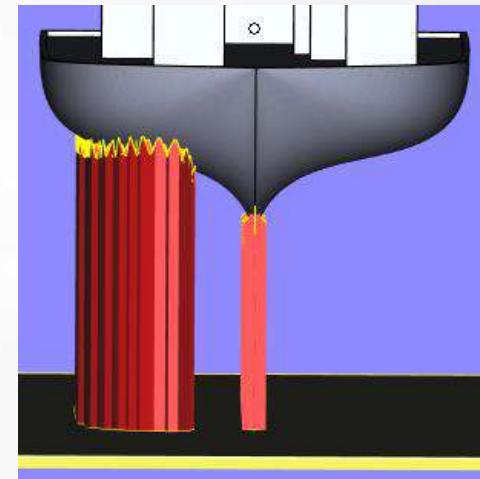
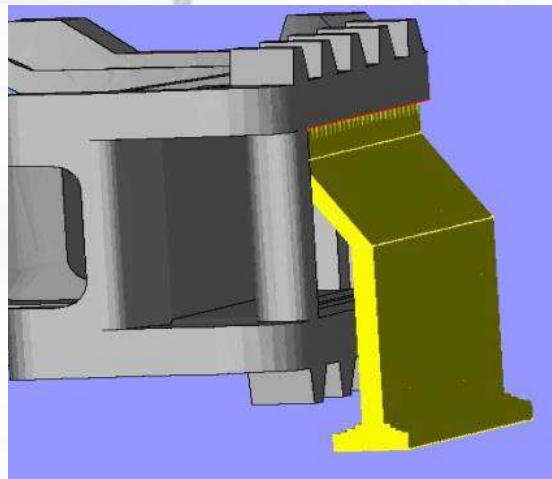
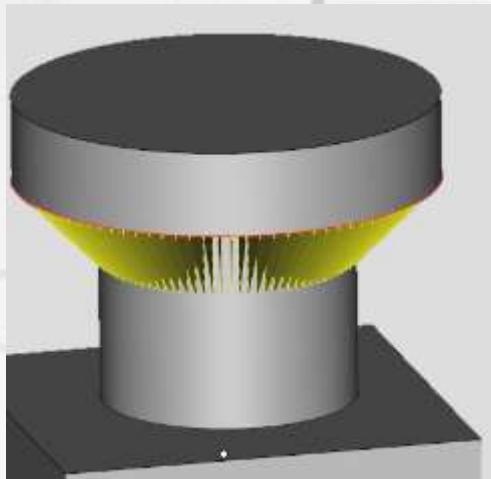
Obezbediti noseču strukturu za prepuste i konzolne delove

Obezbediti odvođenje topline od mesta topljenja materijala



Pravila projektovanja

- Uvođenje nosećih struktura znatno usložnjava postuka izrade delova
- Ne dodaje nikakvu novu vrednost delu koji se gradi
- Znatno povećava cenu dela (utrošak dodatnog materijala + dodatna obrada)
- Zbog toga, noseću strukturu je poželjno uvesti samo na mestima gde je neophodna
- Površina na koju je postavljena noseća struktura, nakon uklanjanja iste, ima vrlo veliku hrapavost i potrebno je predvideti veći dodatak za obradu



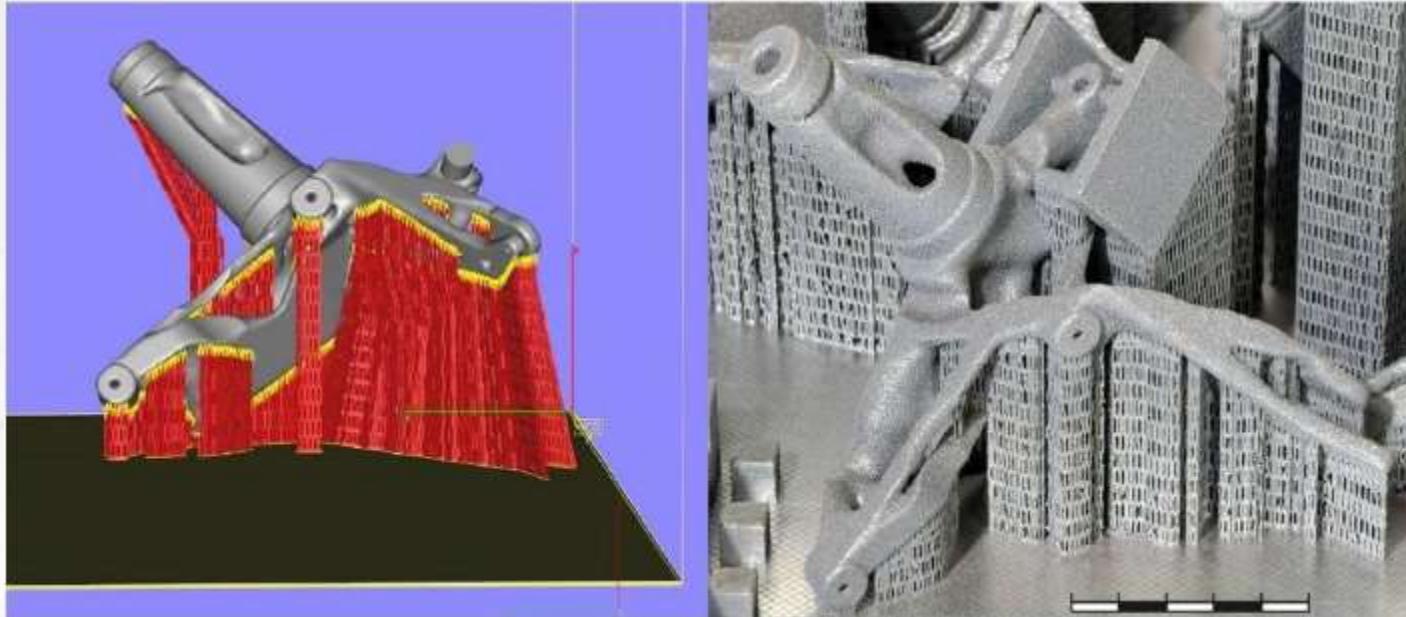
Dodatna obrada

- Uklanjanje oslonaca



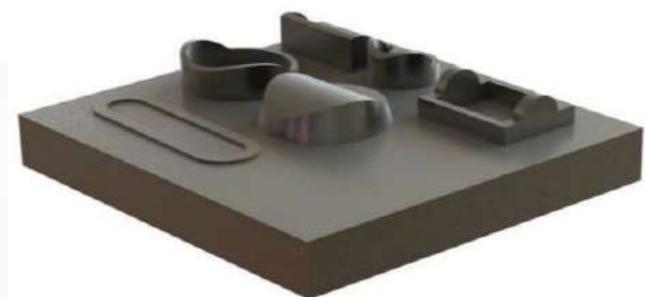
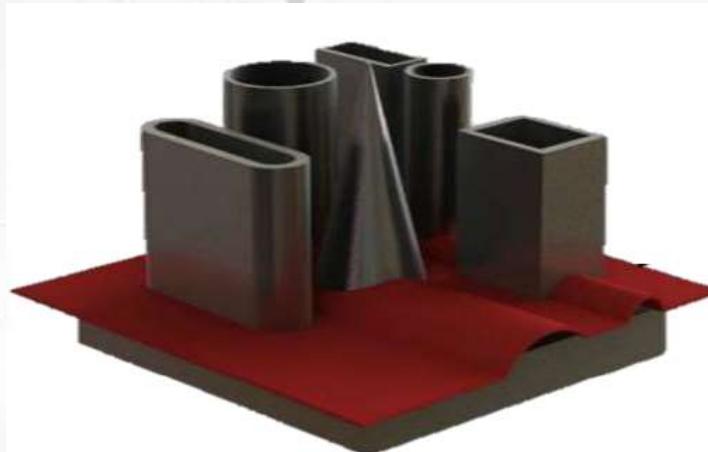
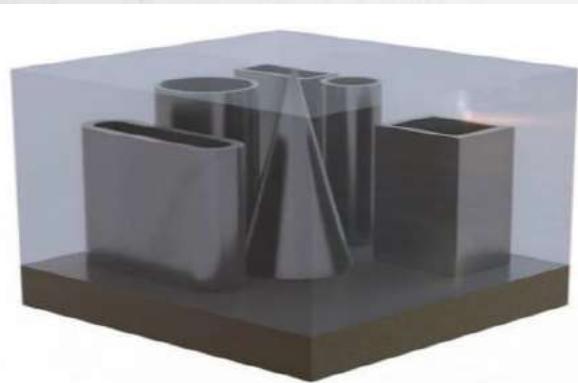
Dodatna obrada

- Priprema i izrada dela



Dodatna obrada

- Odstranjivanje delova sa radne ploče



Odstranjivanje delova na erozimatu sa žicom
koja je vođena po određenoj putanji

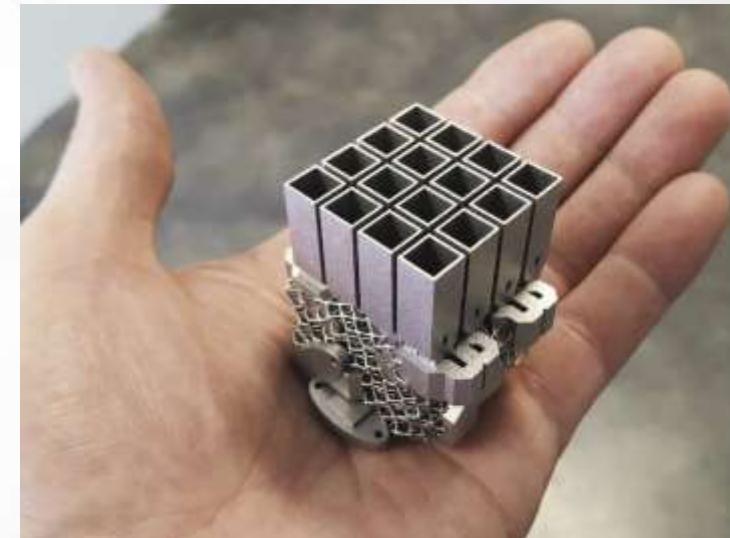
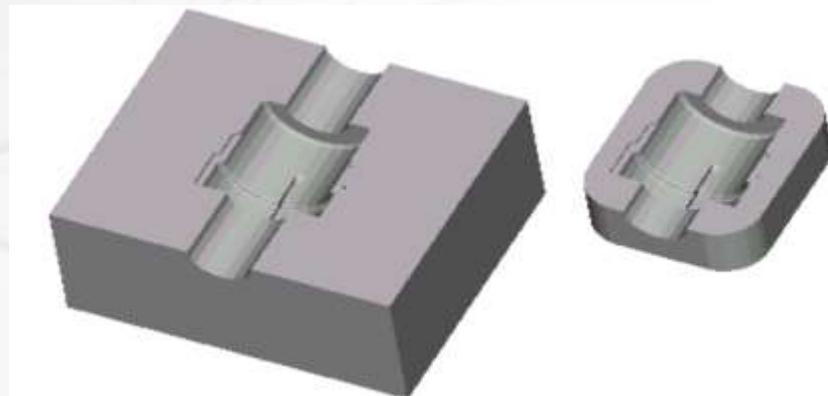
Dodatna obrada

- Ukoliko je potrebno postići određenu hrapavost površina ili odgovarajući dimenzionu tačnost, preporuka je da se ovo ostvari konvencionalnim postupcima obrade
- Dodatak za finu obradu bi treba da bude od **0,2-0,5 mm** u zavisnosti od dimenzije i zadatog tolerancijskog polja.



Optimizacija

- Optimizovati deo koji se radi AP radi smanjenja troškova izrade
- Umesto izrade jednog masivnog dela izdvojiti deo sa kompleksnom geometrijom a ostatak izraditi konvencionalnim putem
- Konsolidacija više delova u jedan deo



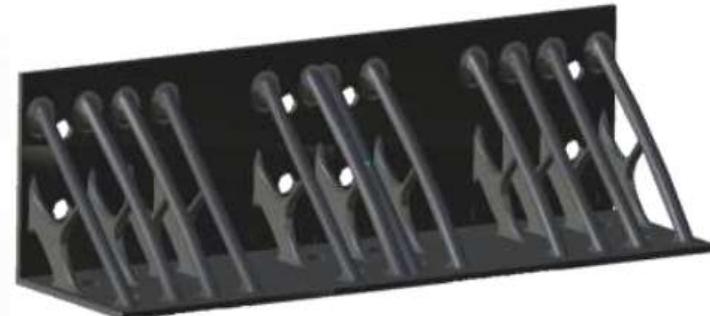
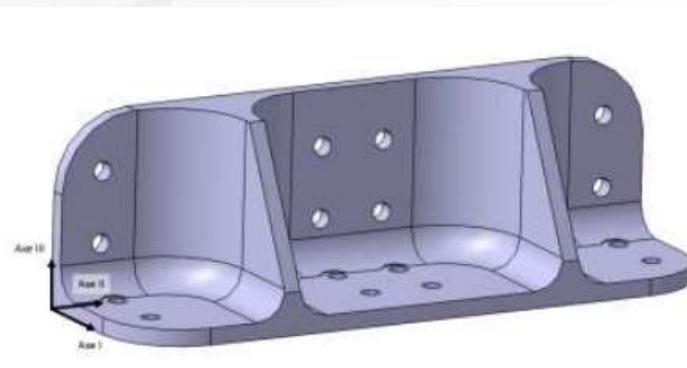
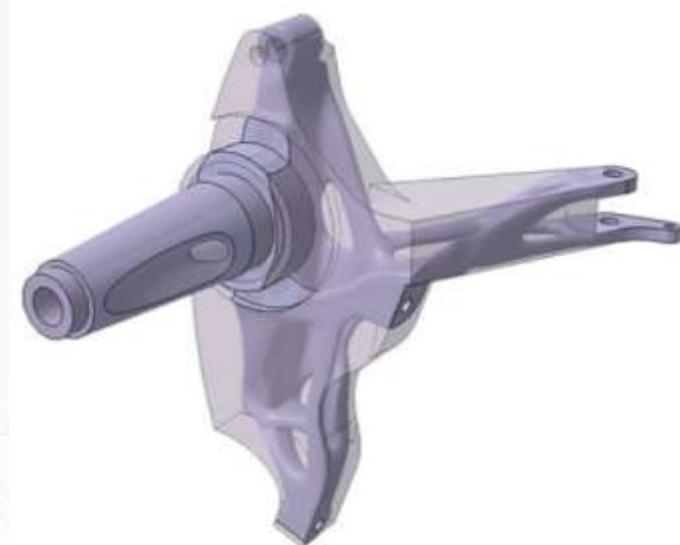
Optimizacija

- Optimizovati deo koji se radi AP radi smanjenja troškova izrade
- Smanjenje broja komponenti za izgradnju dela ili sklopa



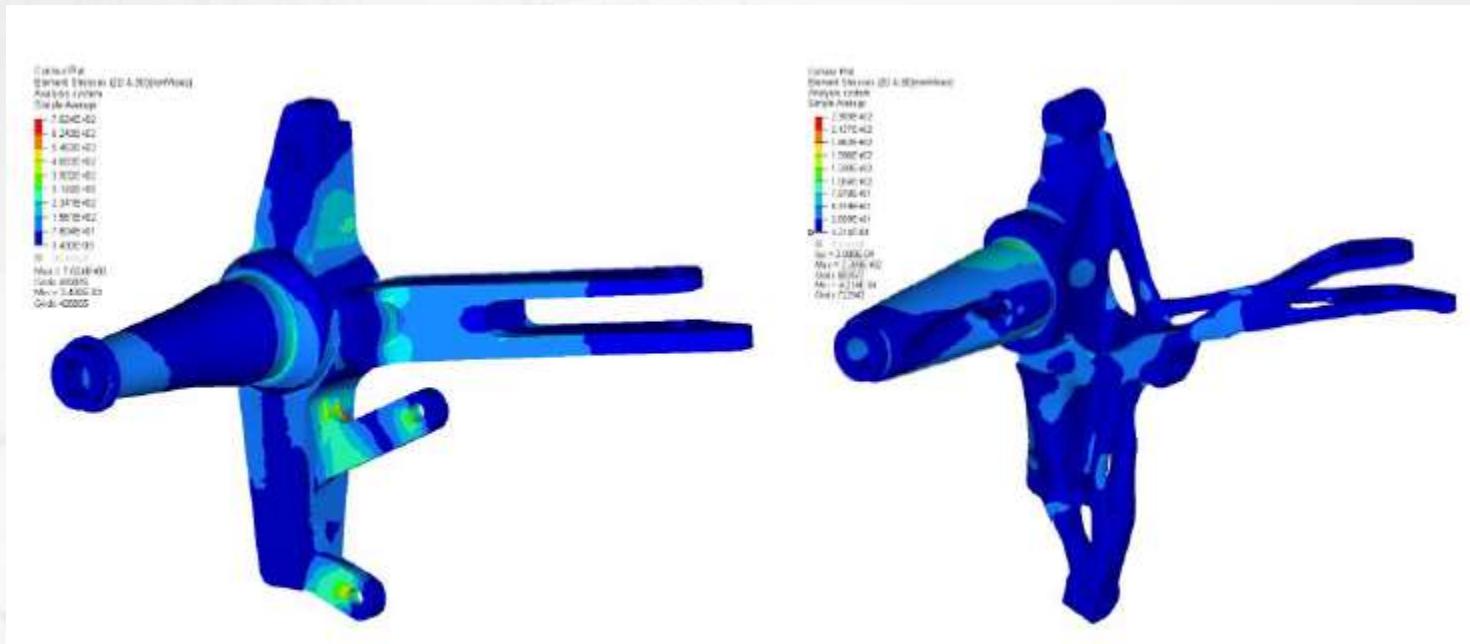
Optimizacija

- Topološka optimizacija vs konvencionalno modeliranje
- Topološka optimizacija - minimizacije mase dela a da se pri tome obezbedi odgovarajuća funkcija i nosivost dela
- Većina postojećih sistema za projektovanje je započela implementaciju topološke optimizacije



Optimizacija

- Topološka optimizacija – raspodela napona



Optimizacija

• Latticce struktura

- Kreiranje „rešetkaste“ strukture koja može da
 - obezbedi odgovarajuće mehaničke karakteristike
 - ima znatno manju masu od punog dela
 - Voditi računa o dimenziji strukture i o odstranjivanju praha



Optimizacija

- Kombinacija topološke optimizacije i lattice strukture
- Lattice struktura se može postaviti na mesta gde topološka optimizacija nema rešenja i da se tako dodatno unapredi proces projektovanja krajnjeg proizvoda
- Upotreba topološke optimizacije i lattice struktura, za sada, uslovljava obaveznu upotrebu AP

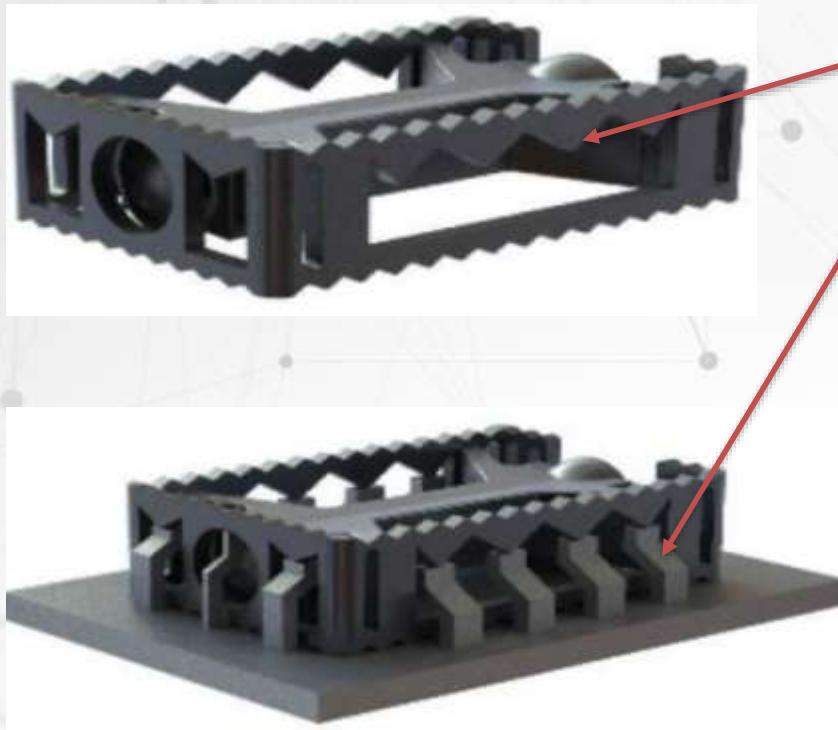


Primer projektovanje za AP



- Konverncionalni oblik pedale za biciklu
- Velika količina oslonaca
- Mali broj komada na radnoj ploči
- Mogućnost pojave zaostalih napona – velika oslona površina
- Relativno velika dodatna obrada za skidanje noseće strukture

Primer projektovanje za AP



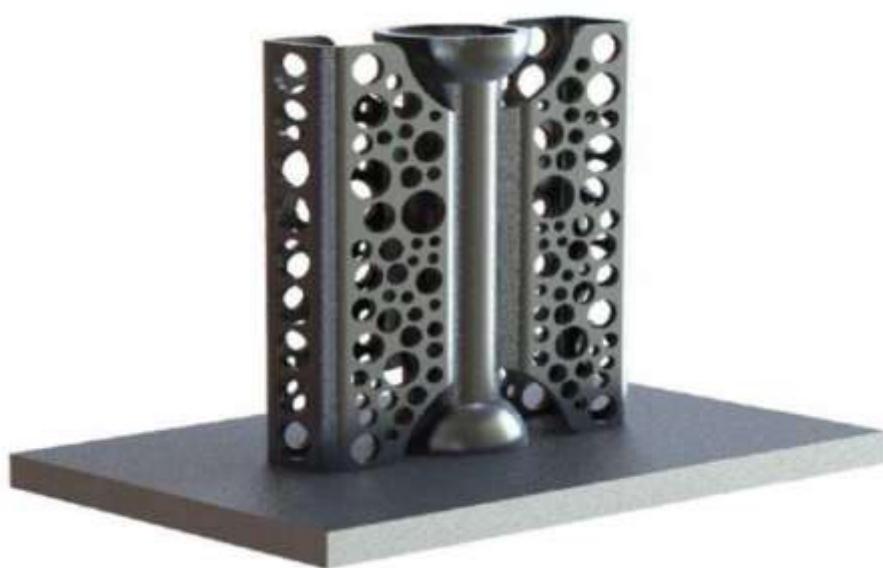
- Primenimo neka od preporuka da se smanje oslonci
- Mala visina gradnje
- Smanjena je količina noseće struktue
- Smanjena je dodana obrada, ali je još uvek potrebna
- I dalje su prisutni zaostali naponi
- Mali broj komada na radnoj ploči

Primer projektovanje za AP



- Reorientacija dela
 - Smanjena količina noseće strukture
 - Smanjena dodatna obrada
 - Smanjena je površina kontakta dela i ploče – smanjena je mogućnost od pojave zaostalih napona
 - Moguće je raditi nekoliko delova istovremeno
 - Promenjna je visina gradnje – vreme gradnje je znatno duže

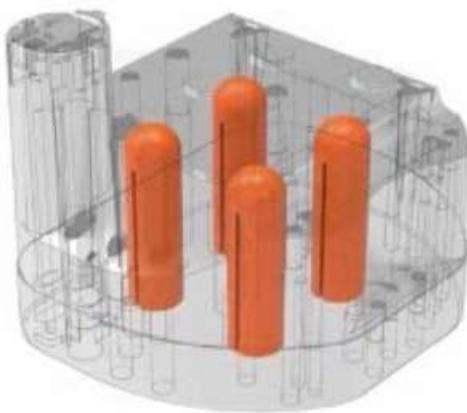
Primer projektovanje za AP



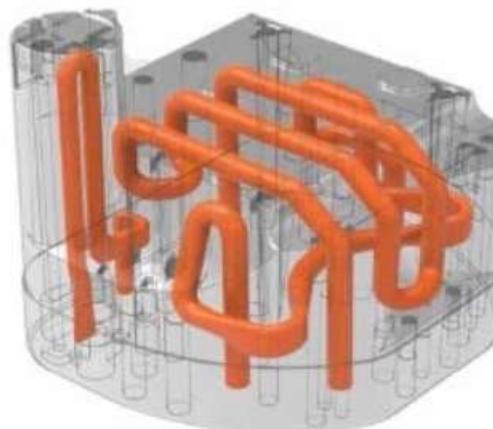
- Redizajnirani deo
 - Izbegнута градња носеће структуре
 - Мала контактна површина
 - Више делова на једној радној плочи
 - Мала контактна површина – мали заостали напони
 - Мало додатне обраде
 - Велика висина градње

Conformal cooling

- Unapređenje procesa kontrole temperature prilikom brizganja delova od plastike



Conventional Cooling



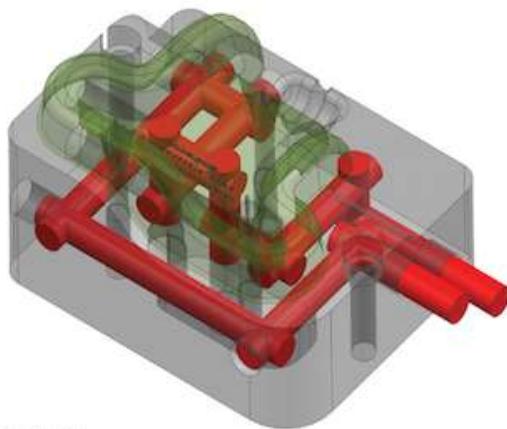
Conformal Cooling

Conformal cooling

- Osnovna pravila projektovanja kanala za hladjenje
 - Poprečni presek kanala bi trebao da bude konstantan
 - Težiti da dužina kanala bude što je moguće kraća
 - Rastojanje kanala od površine kalupa prema preporukama 1,5 d
 - Ekvivalentni prečnik kanala za hlađenje može da se kreće od 2 mm ili veće, što opet zavisi od termičkih uslova i uslova mehaničke nosivosti koje treba da se postigne na alatu
 - Oblik otvora više ne mora da bude krug!!

Conformal cooling

CONVENTIONAL MACHINED COOLING



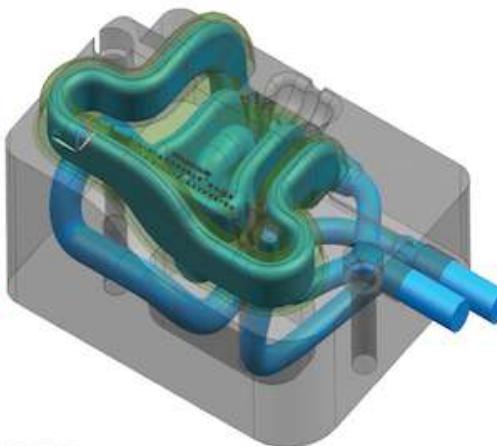
Cooling Temperature

Time = 100

[K]



TruCool 3D PRINTED COOLING



Cooling Temperature

Time = 100

[K]





Coordinator

FAKULTET ZA MASINSTVO I GRADJEVINARSTVO
U KRALJEVO UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU

www.mfkv.rs

Partners

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA DI BOLOGNA

www.unibo.it DIN department

STUDIO PEDRINI SRL

www.studiopedrini.it

TOPOMATIKA DOO

www.topomatika.hr

PLAMINGO DOO

www.plamingo.net

HORIZON 2020

The framework programme
for research and innovation

734455 (A_MADAM) - MSCA-RISE

Call: H2020 MSCA RISE 2016

Topic: MSCA-RISE-2016

Unit: REA/A/D3



PROJECT SUPPORTED BY