

Razvoj konstrukcijskih principa temeljenih na mogućnostima DMLS proizvodnog postupka

Novak, Regina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:726975>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Regina Novak

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić, dipl. ing.

Dr. sc. Ivana Mihalić Pokopec, mag. ing. mech.

Student:

Regina Novak

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Nenadu Bojčetiću i komentorici dr. sc. Ivani Mihalić Pokopec na stručnim savjetima i iskazanoj pomoći prilikom pisanja ovog rada.

Velika zahvala ide i asistentu Filipu Valjku, mag. ing. mech. na nesebičnoj pomoći prilikom izrade ovog rada i konstantnom stručnom usmjeravanju te dr. sc. Mariu Šerceru, ravnatelju Metalske jezgre Čakovec, na pomoći prilikom izrade praktičnog dijela diplomskog rada te vodstvu i stručnim savjetima.

Na kraju, želim se zahvaliti obitelji, dečku, prijateljima i kolegama na konstantnoj podršci i povjerenju koje su mi ukazali tijekom studiranja.

Regina Novak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: REGINA NOVAK Mat. br.: 0035204714

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj konstrukcijskih principa temeljenih na mogućnostima DMLS proizvodnog procesa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of design principles based on DMLS manufacturing process**

Opis zadatka:

DMLS (eng. Direct Metal Laser Sintering) je tehnologija aditivne proizvodnje temeljena na sinteriranju metalnog praha, sloj po sloj, kako bi se izradio željeni proizvod. Pošto je priroda DMLS tehnologije drugačija od proizvodnih postupaka temeljenih na oduzimanju i deformiranju materijala, oblikovanje proizvoda se temelji na drugačijim konstrukcijskim principima. Stoga je potrebno funkcijskom analizom postojećih proizvoda izrađenih DMLS tehnologijom identificirati i definirati konstrukcijske principe temeljene na mogućnostima i karakteristikama DMLS proizvodnog procesa.

U radu je potrebno:

- Definirati skup proizvoda izrađenih DMLS tehnologijom potrebnih za provođenje analize.
- Analizirati svaki od proizvoda prema njegovim funkcijama i pronaći tehnička rješenja i značajke karakteristične za DMLS tehnologiju aditivne proizvodnje.
- Analizom tehničkih rješenja i značajki identificirati i definirati konstrukcijske principe temeljene na DMLS tehnologiji aditivne proizvodnje.
- Pregledom literature definirati proizvodne značajke za pojedine principe.
- Izraditi računalne 3D modele konstrukcijskih principa.
- Izraditi fizičke modele konstrukcijskih principa.

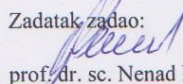
Opseg skupa proizvoda, analize proizvoda, opisa definiranih principa te izradu fizičkih modela dogovoriti tijekom izrade rada.

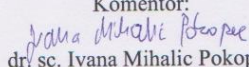
U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

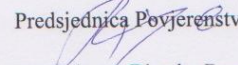
Zadatak zadan:
12. studenog 2020.

Rok predaje rada:
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
18. siječnja do 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Komentor:

dr. sc. Ivana Mihalic Pokopec

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1. Općenito o aditivnoj proizvodnji metala.....	2
2.2. Postupak aditivne proizvodnje	5
1. Izrada CAD modela	5
3. Prijenos informacija na uređaj za aditivnu proizvodnju	7
4. Podešavanje parametara uređaja za aditivnu proizvodnju	7
5. Izrada proizvoda.....	7
6. Vađenje proizvoda	7
7. Naknadna obrada.....	8
8. Primjena	8
2.3. DMLS (eng. <i>Direct metal laser sintering</i>) PROIZVODNI POSTUPAK.....	9
2.3.1. Općenito o DMLS proizvodnom postupku.....	9
2.3.2. Princip rada DMLS proizvodnog postupka	9
2.4. Karakteristike EOS M 290 printera	12
2.5. Vrste metala	14
Legura AlSi10Mg.....	18
3. Identifikacija i prikaz konstrukcijskih principa za DMLS proizvodni postupak.....	19
3.1. Metodologija	19
3.2. Sakupljanje proizvoda za analizu.....	20
3.3. Izrada funkcijskih struktura	25
3.4. Postupak izrade funkcijske strukture	25
3.5. Analiza proizvoda i funkcijskih struktura.....	28
3.5.1. Integracija potpornog materijala u proizvod.....	29
3.5.2. Primjena rešetke strukture.....	29
3.5.3. Primjena topološke optimizacije.....	29
3.5.4. Primjena unutarnjih struktura (kanala)	30
3.5.5. Promjena teksture površine.....	31
3.5.6. Jednostavna prilagodba individualnom korisniku.....	31
3.5.7. Integracija dijelova.....	31
3.5.8. Izrada proizvoda sloj po sloj radi smanjenja toplinskog opterećenja	31
3.5.9. Prihvat objekta prilagođen standardnom sučelju	32
3.5.10. Prihvat objekta prilagođen kompleksnoj/nestandardnoj geometriji	32
3.5.11. Prilagodba veličine pora	32
3.5.12. Omogućeno gibanje pomoću višestruko povezanih komponenti proizvoda	32
3.5.13. Prijenos informacija geometrijom.....	33
3.6. Mapiranje značajki proizvoda s funkcijama	33

3.7. Prikaz principa	37
3.8. Definiranje smjernica za oblikovanje i proizvodnih parametara za aditivnu proizvodnju metala.....	38
3.8.1. Potporni materijal.....	39
3.8.2. Samopotporni kut.....	40
3.8.3. Rešetkasta struktura	40
3.8.4. Zaostalo naprezanje.....	42
3.8.5. Koncentracija naprežanja.....	42
3.8.6. Izrada pokretnog modela.....	42
3.8.7. Debljina stijenke	43
3.8.8. Ispupčeni i urezani dijelovi	43
3.8.9. Površinska hrapavost	44
3.8.10. Izrada navoja	44
3.8.11. Upotreba istog materijala radi lakšeg recikliranja	44
3.8.12. Brza proizvodnja i dugi životni vijek proizvoda.....	44
4. Izrada CAD modela	45
4.1. Prikaz pojedinačnih principa.....	45
4.2. Integrirani modeli principa.....	51
5. Izrada fizičkog modela	54
5.1. Priprema izrade	55
5.2. Priprema za postupak printanja.....	56
5.3. Postupak izrade modela	57
5.4. Završetak postupka izrade modela	58
5.5. Opažanja na fizičkim modelima	61
6. ZAKLJUČAK.....	62
7. LITERATURA	63
PRILOZI.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1. Prebacivanje CAD modela u STL datoteku	6
Slika 2. Osnovni koraci aditivne proizvodnje [3]	6
Slika 3. Prikaz modela izrađenih DMLS proizvodnim postupkom [4], [5]	9
Slika 4. Postupak srašćivanja čestica praha [5].....	10
Slika 5. Postupak izrade modela DMLS proizvodnim postupkom [5]	10
Slika 6. Shematski prikaz DMLS postupka [6].....	11
Slika 7. Printer EOS M 290 (Metalska jezgra Čakovec).....	12
Slika 8. Metal u praškastom obliku [8]	14
Slika 9. Materijali za EOS M 290 [5].....	17
Slika 10. Dijagramski prikaz metodologija.....	20
Slika 11. Primjer funkcijske strukture sonde za mjerenje brzine i temperature u turbo motorima	27
Slika 12. Topološka optimizacija držača satelita [5].....	30
Slika 13. Različiti oblici presjeka kanala za koje, do određenog iznosa, nije potrebna potporna struktura [3]	30
Slika 14. Metalni nosač pod orijentacijom od 45° prije uklanjanja potpornih struktura [20]..	39
Slika 15. Jednolike rešetke u različitim veličinama [21]	40
Slika 16. Oblici rešetke [3].....	41
Slika 17. Tijek razvoja CAD modela u fizički model za DMLS proizvodni postupak.....	45
Slika 18. Printanje modela pojedinačnih principa FDM tehnikom (CADLab, FSB Zagreb) ..	45
Slika 19. Model na radnoj plohi u softveru <i>Materialise 23.0</i>	54
Slika 20. Modeli s potpornim strukturama u softveru <i>EOSPRINT 2.8</i>	55
Slika 21. Priprema komore za printanje	56
Slika 22. Početak printanja.....	57
Slika 23. Postupak izrade modela	58
Slika 24. Postupak uklanjanja viška praha s radne plohe.....	58
Slika 25. Uklonjen prah s radne plohe	59
Slika 26. Uređaj za pjeskarenje FerroECOBlast	59
Slika 27. Primjer nestaklarenog i staklarenog modela	60
Slika 28. Konačan izgled modela	60

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled tehnologija aditivne proizvodnje [2]	3
Tablica 2. Osnovni podaci printera EOS M 290 [7]	13
Tablica 3. Optički sustav printera EOS M 290 [7].....	13
Tablica 4. Karakteristike materijala [7].....	15
Tablica 5. Prikaz proizvoda izrađenih DMLS proizvodnim postupkom	21
Tablica 6. Analiza sonde za mjerenje brzine i temperature u turbo motorima	34
Tablica 7. Popis proizvoda i definiranih principa	36
Tablica 8. Maksimalni iznos samopotpornog kuta bez potrebe za potpornom strukturom [3] 40	
Tablica 9. Definirani iznosi za izradu pokretnog modela [3].....	42
Tablica 10. Grafički prikaz ograničenja za debljinu stijenke, proreza i utora te ispupčenih dijelova [3]	43
Tablica 11. 3D prikaz modela principa	46
Tablica 12. Prikaz CAD modela za DMLS tehniku proizvodnje.....	51
Tablica 13. Najčešći oblici potpornih struktura	55

SAŽETAK

U radu je opisana aditivna proizvodnja metala s naglaskom na DMLS (eng. *Direct metal laser sintering*) proizvodni postupak. Utvrđeni su i opisani principi za aditivnu proizvodnju metala koji pomažu konstruktorima u ranim fazama razvoja proizvoda. Principi aditivne proizvodnje metala drugačiji su od tradicionalnih metoda proizvodnje. Opisan je postupak metodologije koji se sastoji od sakupljanja proizvoda za analizu izrađenih DMLS proizvodnim postupkom, izrade funkcijskih struktura proizvoda, analize proizvoda i funkcijskih struktura, mapiranja značajki s funkcijama, identifikacije konstrukcijskih principa, smjernica za oblikovanje i parametara za proizvodnju te izrade CAD modela i fizičkih modela. Analizom postojećih proizvoda identificirano je 15 principa temeljenih na mogućnostima i karakteristikama DMLS proizvodnog postupka. Također su izrađeni i CAD modeli koji prikazuju pojedinačne principe. Na kraju, pojedinačni principi su grupirani te su prikazani na pet CAD modela koji su kasnije i izrađeni DMLS proizvodnim postupkom.

Prikazani konstrukcijski principi, potiču kreativnost, sugeriraju rješenje za dani problem ili potiču razvoj nove ideje u ranoj fazi razvoja proizvoda aditivnom proizvodnjom metala.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja metala, DMLS proizvodni postupak, razvoj proizvoda, konstrukcijski principi, CAD modeli, fizički modeli

SUMMARY

The paper describes additive metal production with an emphasis on DMLS (*Direct metal laser sintering*) production process. The principles for additive metal production, which help designers in the early stages of product development, have been established and described. The principles of additive metal production are different from traditional production methods. The described methodology consists of collecting products for analyzing made by DMLS production process, making functional structures of products, analyzing products and functional structures, mapping features with functions, identifying design principles, design guidelines and parameters for production and making CAD models and physical models. By analyzing existing products, 15 principles are identified based on the capabilities and characteristics of DMLS production process. CAD models with individual principles were also developed. Finally, the individual principles were grouped and presented on five CAD models that were later developed by the DMLS production process.

The presented construction principles encourage creativity, suggest a solution to a given problem or encourage the development of a new idea at an early stage of product development by additive metal production.

Key words: additive manufacturing of metal, DMLS production process, product development, design principles, CAD models, physical models

1. UVOD

Unapređivanje postupaka proizvodnje proizlazi iz sve većih zahtjeva tržišta, koji se postavljaju na proizvodne postupke i same proizvode. Glavni izazovi novih proizvodnih postupaka su: zahtjev za povećanjem kvalitete proizvoda uz istodobno snižavanje troškova proizvodnje, visoka razina fleksibilnosti (individualni pristup, prelazak s velikoserijske na maloserijsku proizvodnju) te skraćanje vremena izrade.

Razvojem industrijske proizvodnje, razvili su se i suvremeni aditivni postupci proizvodnje (eng. *Additive Manufacturing*, kraće AM). Aditivna proizvodnja uključuje niz koraka koji omogućuju virtualnom CAD modelu pretvorbu u fizički proizvod. Model se izrađuje sloj po sloj dodavanjem materijala koji se primjenom izvora energije učvršćuje na prethodni sloj [1]. Aditivna proizvodnja karakteristična je po tome što se mogu izraditi proizvodi složene geometrije u kratkom vremenu, s malom ili nikakvom naknadnom obradom. Potencijali aditivne proizvodnje su veliki te se u budućnosti može očekivati njena sve veća primjena u industriji. Neke od prednosti proizvoda dobivenih putem aditivne proizvodnje su [2]:

- jednostavno planiranje proizvoda i proizvodnje,
- potencijalni problemi mogu biti riješeni u ranim fazama procesa razvoja proizvoda ili alata/kalupa,
- jednostavnije je percipirati fizički prototip nego crtež ili čak CAD model,
- vrijeme od ideje do lansiranja proizvoda na tržište je kraće.

Razvojem i napretkom tehnologije, sve se više materijala može koristiti za postupke aditivne tehnologije, uključujući i metale. Jedan od postupaka aditivne proizvodnje metala je i sve popularniji DMLS proizvodni postupak o kojem će detaljnije biti pisano u ovom radu. DMLS (eng. *Direct Metal Laser Sintering*) proizvodni postupak temelji se na sinteriranju metalnog praha, sloj po sloj, kako bi se izradio željeni proizvod. Priroda DMLS tehnologije je drugačija od konvencionalnih proizvodnih postupaka te se oblikovanje proizvoda temelji na drugačijim konstrukcijskim principima. Cilj ovog rada je identificirati i definirati konstrukcijske principe temeljene na mogućnostima i karakteristikama DMLS proizvodnog procesa kroz funkcijsku analizu postojećih proizvoda izrađenih DMLS tehnologijom. Identificirani konstrukcijski principi poslužit će konstruktoru kao vodilja i izvor konstrukcijskog znanja u procesu razvoja proizvoda.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

2.1. Općenito o aditivnoj proizvodnji metala

Aditivna proizvodnja (AM) obuhvaća niz tehnologija koje omogućuju izradu fizičkog proizvoda na temelju virtualnog 3D modela dodavanjem materijala sloj po sloj sve do završetka procesa [1].

Ovisno o tehnologiji izrade, materijali mogu biti u krutom, tekućem i praškastom obliku. Najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali koji su i tržišno vrlo atraktivni. No, razvojem tehnologije, sve se češće koriste kompozitni materijali, keramika te metal [1].

U tablici 1 prikazana je sistematizacija aditivne proizvodnje prema ASTM F2 standardu. Uz sistematizaciju prikazane su i glavne grupe procesa i njihov komercijalni naziv. Kako je u radu fokus na metalima, dan je popis metalnih materijala koji se koriste za različite tehnologije aditivne proizvodnje.

Tablica 1. Pregled tehnologija aditivne proizvodnje [2]

Sistematizacija AM-a prema ASTM F2	Komercijalne tehnologije	Materijal	Metal	Izvor energije
Polimerizacija materijala u komori (eng. <i>Vat polymerization</i>)	SLA Stereolitografija	Polimer	NE	Ultraljubičasto svjetlo, zračenje, vidljiva svjetlost, elektronska zraka
Ekstrudiranje materijala (eng. <i>Material extrusion</i>)	FDM Fused Deposition Modeling	Polimer	NE	Toplinska energija
		Kompozit	Kombinacija čestica termoplastike i metala	
Printanje (tiskanje) materijala (eng. <i>Material jetting</i>)	MJ Material Jetting	Kompozit	NE	UV zračenje toplinom
	NPJ NanoParticle Jetting	Metal	Metalno/keramičke nanočestice dispergirane u kapljevini	
	DOD Drop on Demand	Vosak	NE	
Printanje (tiskanje) veziva na materijal (eng. <i>Binder jetting</i>)	BJ Binder jetting	Gips, pijesak	NE	Toplinska energija
		3DP 3D tiskanje	Polimer	
	Metal		Bronca, ugljični čelik, aluminij	

Spajanje praškastog materijala u slojevima pod djelovanjem izvora energije (eng. <i>Powder bed fusion</i>)	MJF Multi Jet Fusion	Polimer	NE	Laserska zraka
	SLS Selective Laser Sintering	Polimer	NE	
	DMLS/IMLS Direct Metal Laser Sintering / Indirect Metal Laser Sintering	Metal	Bronca, nehrđajući čelik, CoCr legure, legure titana, alatni čelik, legure aluminija, legure nikla, plemeniti metali	
	SLM Selective Laser Melting	Metal	CoCr legure, legure titana, nehrđajući čelik, aluminij, plemeniti metali	
	EBM Electron Beam Melting	Metal	Legure titana, CoCr legura, nehrđajući čelik (mogućnost dodavanja ugljičnih vlakana)	Elektronska zraka

Taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije (eng. <i>Direct energy deposition</i>)	LENS Laser Engineering Net Shape	Metal	Nehrđajući čelik, aluminij, bakar, nikal, legure titana i volframa, alatni čelik	Laserska zraka
	EBAM Electron Beam Additive Manufacture	Metal	Titan, nehrđajući čelik, aluminij, bakar	Elektronska zraka
Laminiranje folija materijala (eng. <i>Sheet lamination</i>)	LOM Laminated Object Manufacturing	Kompozit	NE	CO ₂ laser ili nož
		Papir	NE	

2.2. Postupak aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja omogućuje izradu proizvoda direktno iz CAD modela. Kako bi se iz CAD modela izradio funkcionalan proizvod, potrebno je pratiti osam prethodno definiranih koraka aditivne proizvodnje. Koraci su općeniti te su prikladni za sve vrste aditivnih tehnologija [1]:

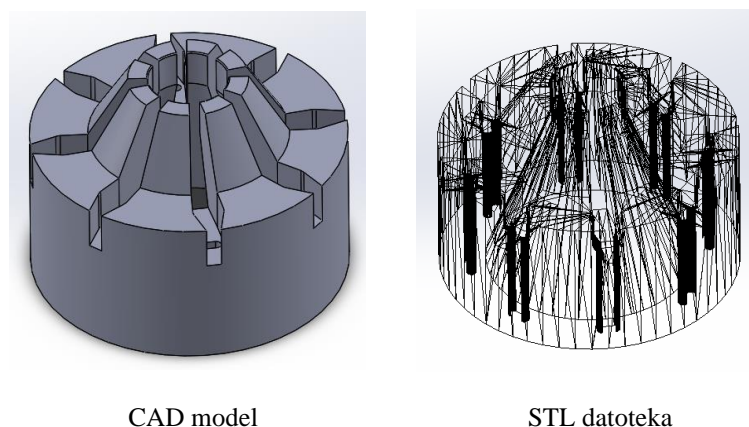
1. Izrada CAD modela

Prvi i neizostavan korak je izrada 3D modela u nekom od 3D CAD softvera. U većini se slučajeva CAD model može proizvesti bez poteškoća, no još uvijek postoje stariji ili slabije razvijeni softveri koji mogu rezultirati određenim poteškoćama ili anomalijama zbog grešaka u prikazu površina modela. Kako bi se eliminirale takve pogreške, unutar CAD sustava potrebno je napraviti tzv. „Watertight“ model, tj. model s potpuno zatvorenom površinom.

2. Prebacivanje CAD modela u STL datoteku

STL datoteka (eng. *Standard Tessellation Language*) služi za prikaz površine modela u obliku povezanih trokutića (Slika 1). Svaki od trokutića ima normalu, a svaki vektor normale mora biti usmjeren prema van. Neispravnom orijentacijom trokutića, dolazi do pojavljivanja praznina na

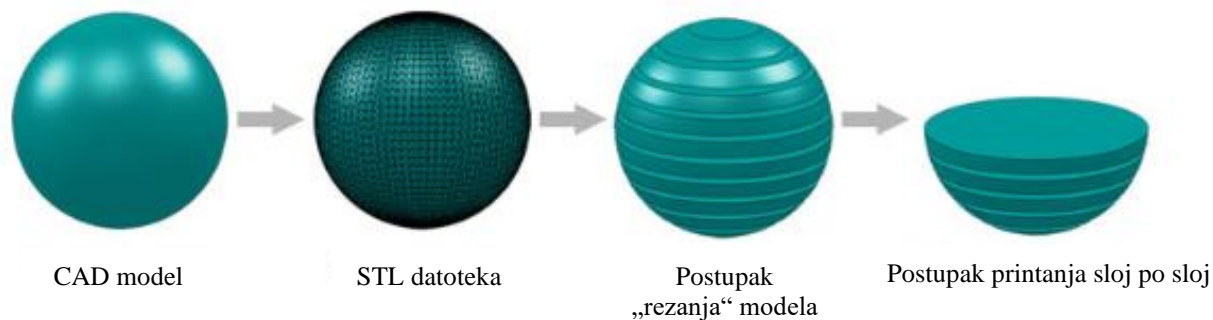
površini modela, što može uzrokovati probleme pri izradi slojeva i/ili proizvodnji. Prebacivanjem u STL datoteku, s CAD modela se ne prenose svi podaci vezani uz sam proces izrade modela te se gubi mogućnost spremanja parametara modela poput boje ili materijala. Proces prebacivanja u STL datoteku je automatski unutar većine CAD sustava, no postoji mogućnost za pojavom grešaka. Stoga je razvijeno nekoliko softverskih alata za otkrivanje takvih pogrešaka i njihovog ispravljanja.



Slika 1. Prebacivanje CAD modela u STL datoteku

STL datoteka ima određena ograničenja te su iz tog razloga razvijeni novi formati s dodatnim značajkama, poput AMF datoteke (eng. *Additive Manufacturing File*) koja sadrži informacije o boji, materijalu te slične informacije potrebne za aditivnu proizvodnju.

Neposredno prije prebacivanja datoteke modela na uređaj za aditivnu proizvodnju, radi se „sliceing“ modela (Slika 2). „Sliceing“ je postupak rezanja modela u vodoravne slojeve na temelju postavki debljine sloja izrade. U svakom sloju nalazi se kontura koja označava mjesto gdje se nanosi sloj materijala kako bi se formirao konačan proizvod. Postupak „rezanja“ obuhvaća i izračun materijala potrebnog za izradu proizvoda te izračun trajanja postupka.



Slika 2. Osnovni koraci aditivne proizvodnje [3]

3. Prijenos informacija na uređaj za aditivnu proizvodnju

Nakon provedenog „rezanja“ modela u slojeve, podaci o modelu šalju se na uređaj za aditivnu proizvodnju. AM softveri obično imaju alat za vizualizaciju koji omogućuje pregled modela i njegovu manipulaciju, tj. promjenu u orijentaciji, poziciji printanja i veličini modela. Također, moguće je istovremeno postaviti da se izrađuje više proizvoda.

4. Podešavanje parametara uređaja za aditivnu proizvodnju

Prije početka rada potrebno je pripremiti stroj te odrediti parametre proizvodnje. Priprema najčešće uključuje niveliranje (poravnavanje radne površine s obzirom na osi stroja), odabir materijala i provjeru ima li ga dovoljno. Iako se parametri razlikuju ovisno o uređaju i vrsti proizvodnog postupka, neki od osnovnih parametara koji se mogu mijenjati su: debljina sloja, izbor materijala te iznos radne temperature. Odabir materijala utječe na debljinu sloja, a debljina sloja na svojstva proizvoda. Odabirom ispravne debljine sloja, izbjegava se stepeničasti efekt, tj. vidljivost nanošenih slojeva. Smanjenjem debljine sloja, smanjuje se efekt stepenica i površinska hrapavost. Na površinsku hrapavost utječe i orijentacija proizvoda te se ponekad mora promijeniti od prvobitne.

5. Izrada proizvoda

Nakon definiranih parametara, može se krenuti sa samim postupkom aditivne proizvodnje. Uređaj za aditivnu proizvodnju nanosi materijal sloj po sloj, prema konturama dobivenih u postupku „rezanja“. Ako prilikom izrade ne dođe do pogreške, uređaj će ponavljati postupak do kraja procesa.

6. Vađenje proizvoda

Nakon završenog procesa, proizvod se uklanja s površine na kojoj je izrađen. Ovisno o vrsti proizvodnog postupka, uklanjaju se potporni dijelovi i višak materijala. Potporni dijelovi su kod nekih modela potrebni kako bi se spriječilo urušavanje ili prevrtanje modela prilikom procesa izrade. Za uklanjanje dijelova potrebna je spretnost i vještina osobe jer nepravilno rukovanje i loša tehnika mogu dovesti do oštećenja modela.

7. Naknadna obrada

Naknadna obrada koristi se kako bi se poboljšala svojstva gotovog proizvoda ili iz estetskih razloga (npr. bojanje). Naknadna obrada je najčešće ručna zbog složenosti geometrije dijelova. To su postupci poput abrazivnog čišćenja, poliranja, brušenja, čišćenja acetonom ili nanošenja prevlaka kako bi dio postao čvršći. Neke obrade mogu uključivati kemijsku ili toplinsku obradu dijela kako bi se postigla konačna svojstva. Kod metala, primjenom toplinske obrade uklanjaju se zaostala naprezanja, a kemijskom obradom krhki dijelovi postaju čvršći.

Za postizanje bolje preciznosti, potrebna je naknadna strojna obrada. S prikladnom naknadnom obradom, proizvodi izrađeni aditivnom proizvodnjom mogu se približiti svojstvima kovanih proizvoda. Kako bi se postigla puna gustoća i smanjila anizotropnost kod metala, uobičajeno se koristi vruće izostatsko prešanje (HIP).

8. Primjena

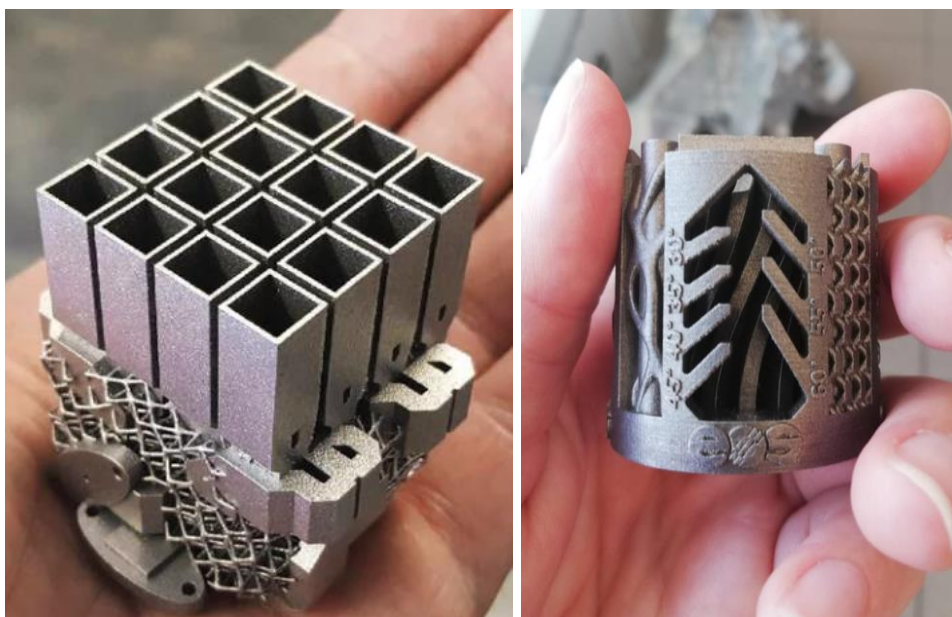
Nakon naknadne obrade, dijelovi su spremni za upotrebu. Treba napomenuti da, iako se proizvodi mogu izrađivati od sličnih materijala koji su dostupni za konvencionalne postupke proizvodnje, dijelovi se možda neće ponašati prema standardnim specifikacijama materijala. Proizvodi izrađeni aditivnom proizvodnjom metala najčešće se koriste se u automobilskoj, zrakoplovnoj i svemirskoj industriji te u medicini i stomatologiji.

Ovisno o tehnologiji aditivne proizvodnje, neki koraci se mogu izostaviti (npr. naknadna obrada), a u nekim slučajevima se može pojaviti i potreba za dodatnim koracima.

2.3. DMLS (eng. *Direct metal laser sintering*) PROIZVODNI POSTUPAK

2.3.1. *Općenito o DMLS proizvodnom postupku*

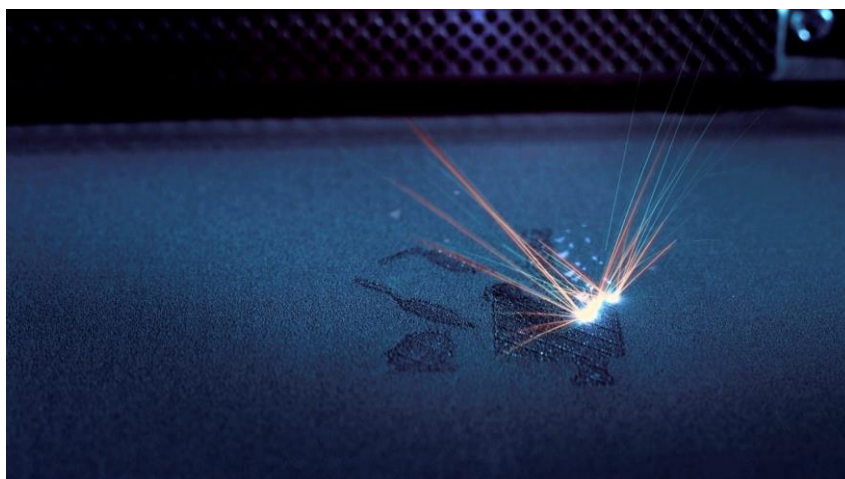
DMLS (eng. *Direct metal laser sintering*, kraće DMLS) postupak je podvrsta PBF (eng. *Powder bed fusion*, kraće PBF) postupka koji služi za izradu metalnih dijelova. Polazni materijal je metalni prah, a izvor energije za srašćivanje čestica praha laser. DMLS postupak omogućuje izradu složenih geometrijskih oblika, kanala promjenjivih tokova i različitih presjeka. Primjeri proizvoda izrađenih DMLS proizvodnim postupkom nalaze se na slici 3.



Slika 3. Prikaz modela izrađenih DMLS proizvodnim postupkom [4], [5]

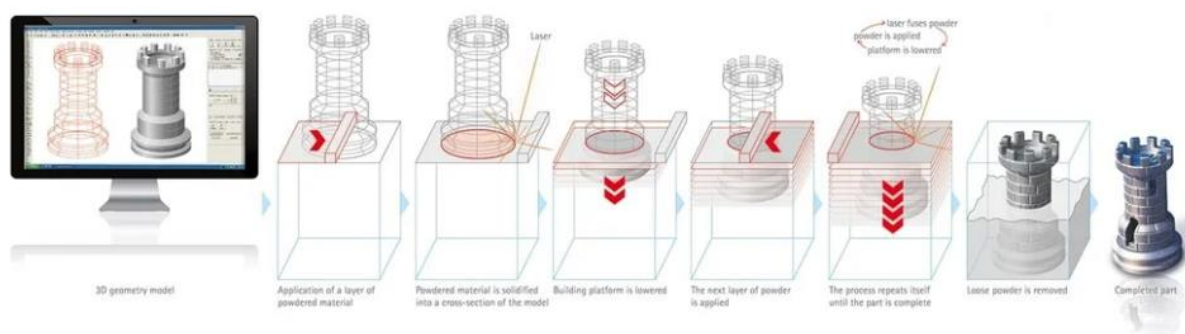
2.3.2. *Princip rada DMLS proizvodnog postupka*

Princip rada DMLS proizvodnog postupka je sljedeći: komora za gradnju puni se inertnim plinom (npr. argonom) kako bi se smanjila oksidacija metalnog praha, a zatim se zagrijava na optimalnu temperaturu gradnje [5]. Na platformu za gradnju nanosi se tanki sloj metalnog praha preko kojeg se prolazi laserskom zrakom. Zbog velike snage lasera dolazi do sinteriranja, tj. toplinskog srašćivanja sitnozrnatog materijala (Slika 4).



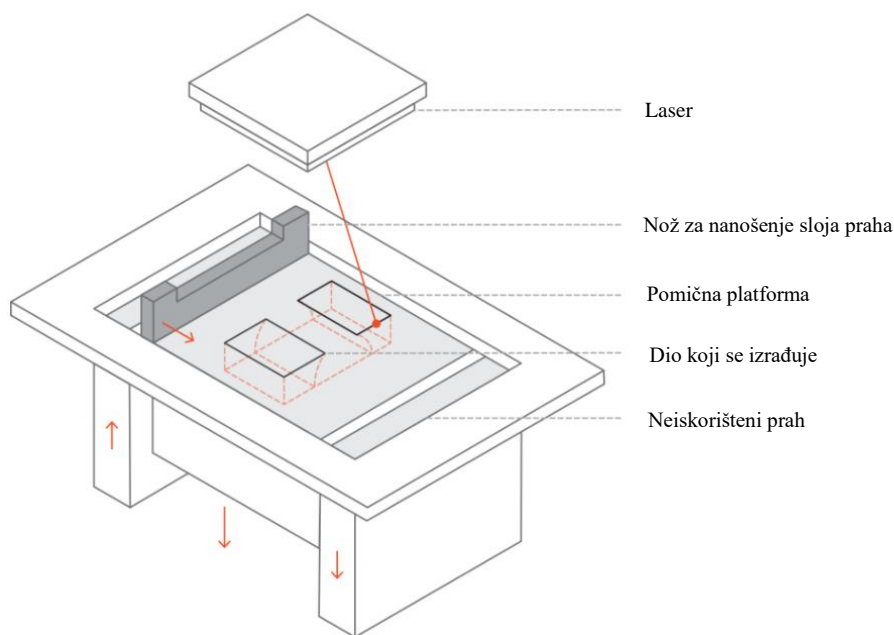
Slika 4. Postupak srašćivanja čestica praha [5]

Nakon završetka sloja, radna ploha na kojoj se obavlja postupak se spušta za iznos debljine jednog sloja (Slika 5).



Slika 5. Postupak izrade modela DMLS proizvodnim postupkom [5]

Na radnu plohu se nanosi novi sloj praha koji se izravnavava pomoću rotirajućeg valjka ili translatornog noža (Slika 6). Suprotna rotacija valjka ili translatorno gibanje noža gura neiskorišteni prah preko platforme. Po novom sloju praha ponovno prolazi laserska zraka. Svaki prolaz snopa preklapa se s prethodnim i ponovno topi sloj ispod, spajajući metal u homogenu masu i formirajući slojeve. Postupak nanošenja i srašćivanja praha sloj po sloj se ponavlja sve dok nije izrađen kompletni dio. Debljina sloja najčešće iznosi između 0,075 do 0,1 mm te ovisi o propisanim specifikacijama printera, vrsti materijala i funkciji proizvoda [1].



Slika 6. Shematski prikaz DMLS postupka [6]

Kada je postupak izrade gotov, dijelovi su u potpunosti pokriveni metalnim prahom. Gotove proizvode potrebno je postupno ohladiti prije vađenja iz printera. Svi dijelovi proizvoda moraju se ravnomjerno ohladiti kako bi se mogli izlagati sobnoj temperaturi. Ako su dijelovi i/ili praškasti sloj prerano izloženi sobnoj temperaturi, prah se može razgraditi u prisutnosti kisika, a dijelovi deformirati zbog neravnomjerne termičke kontrakcije. Vrijeme hlađenja ovisi o veličini i geometrijskoj kompleksnosti izrađenog modela. Nakon hlađenja, izrađeni proizvod se pažljivo uklanja s radne plohe na koju je spojen potpornim materijalom, čisti se od viška praha te se po potrebi šalje na dodatnu obradu [1]. Dijelovi se najčešće uklanjaju s platforme rezanjem, strojnom obradom ili EDM postupkom [6].

Nakon svakog postupka printanja, neiskorišteni prah se sakuplja i prosijava te mu se dodaje novi, svježi prah. Na taj način stvara se manje otpada te se povećava iskoristivost sirovog materijala.

2.4. Karakteristike EOS M 290 printera

Za potrebe izrade ovog rada, koristit će se printer M 290 tvrtke EOS (Slika 7) koji se temelji na DLMS proizvodnom postupku. Printer EOS M 290 nalazi se u vlasništvu Razvojno – edukacijskog centra za metalsku industriju – Metalska jezgra Čakovec.

EOS M 290 ima procesnu komoru radnog volumena 250 x 250 x 325 mm. U komori se nalazi podizni sustav i sustav za grijanje, optički sustav s laserom, sustav za upravljanje procesnim plinom, računalo kojim se kontrolira proces te skup standardne opreme (oprema za čišćenje, osnovni alati za pokretanje i uklanjanje dijelova, sustav za hlađenje) [7].



Slika 7. Printer EOS M 290 (Metalska jezgra Čakovec)

EOS M 290 omogućuje izradu proizvoda složene geometrije, uključujući elemente površine slobodnog oblika, duboke proreze ili kanale za rashladno sredstvo. Polazni materijali su metalne legure aluminija i titana, alatni čelik, kobalt krom legure, nehrđajući čelik te plemeniti metali. Promjer laserske zrake iznosi 0,1 mm, jačina laserske zrake 400 W, dok procesni plin može biti argon ili dušik. Najtanja debljina sloja koja se može izraditi iznosi 20 μm , a ovisi o vrsti materijala. Ostale karakteristike mogu se vidjeti u tablici 2 i 3.

Tablica 2. Osnovni podaci printera EOS M 290 [7]

Dimenzije (širina x dužina x visina)	2500 mm x 1300 mm x 2190 mm
Težina	Približno 1250 kg (bez praška)
Napajanje mreže (trofazni sustav)	400 V +6&/-10 % na 60/60 Hz
Zaštita mrežnog osigurača	3 x 32 A
Maksimalna potrošnja energije	5,5 kW
Dovod komprimiranog zraka	7000 hPa; 20 m ³ /h
Opskrba argonom	4000 hPa; 100 i/min
Brzina pozicioniranja	40 - 500 mm/s
Ponovljivost položaja	≤ ± 0,005 mm
Maksimalna visina izrade	323 mm uključujući platformu
Softver	EOSPRINT incl. EOS ParameterEditor, EOSTATE Everywhere, EOSCONNECT Core, Materialise Magics Metal Package and modules
Podržani CAD formati	STL, Neobvezno: pretvarač za sve standardne formate
Mreža	Ethernet

Tablica 3. Optički sustav printera EOS M 290 [7]

Vrsta lasera	Yb vlaknasti laser
Valna duljina	1060 – 1100 nm
Nominalna snaga	400 W
Promjer laserske zrake (ovisi o vrsti materijala)	0,1 mm
Žarišna duljina F – theta leće (ravno polje)	410 mm

2.5. Vrste metala

Svaki metal koji se može zavariti smatra se dobrim kandidatom za DMLS postupak. Najčešće korišteni metali su: nehrđajući čelik, alatni čelik, aluminijeve i titanove legure, legure na bazi nikla, krom kobalt legure i plemeniti metal poput srebra ili zlata [1]. Metal u praškastom obliku prikazan je na slici 8.



Slika 8. Metal u praškastom obliku [8]

Prah se najčešće dobiva postupkom raspršivanja, što uključuje atomizaciju materijala plinom, vodom, vakuumskom indukcijom ili centrifugom. Raspršivanje pomoću plina jedan je najčešćih postupaka za dobivanje praha, a djeluje tako da se rastaljeni metal raspršuje neutralnim plinskim mlazom. Prilikom izrade praha može doći do nedostataka poput izduženih čestica, malih zrnca zaglavljenih na površini većih te šupljih čestice koje uzrokuju teži ravnomjerni raspored prilikom nanošenja slojeva, a time i manju kvalitetu gotovog proizvoda [3]. Veličina čestica praha koja se najčešće koristi je između 30 i 40 μm , a česta je interakcija manjih i većih čestica. Manje čestice između većih omogućuju širenje gušćeg sloja praha. Ako su sve čestice iste veličine, to će ostaviti praznine između čestica praha, što će uzrokovati stezanjem gotovog proizvoda [3]. Gustoća praškastog materijala kreće se između 50 i 60%. Što je veća gustoća praha, veća je i toplinska vodljivost sloja i bolja su mehanička svojstva proizvoda [1]. U slučaju pogrešno postavljenih parametara, strategije izrade, orijentacije dijela ili nedovoljne količine praha, dolazi do određenih nedostataka poput nerastopljenih čestica praha, pora, pukotina, uključaka, zaostalih naprezanja ili slabe površinske hrapavosti.

U tablici 4 prikazani su najčešći materijali koji se koriste s EOS M 290 printerom. U tablici su opisana svojstva, glavne primjene, procesni plin te temperatura tališta.

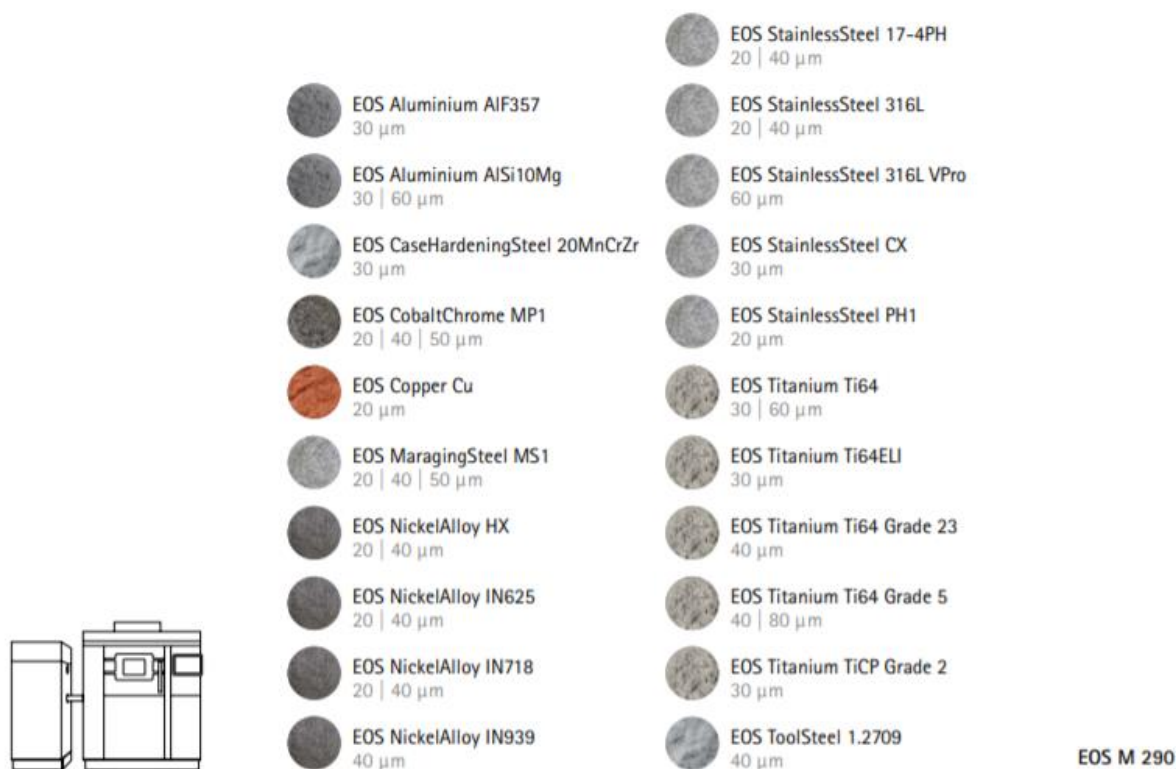
Tablica 4. Karakteristike materijala [7]

Metal (komercijalni naziv)	Svojstva	Primjena	Procesni plin	Temp. tališta (°C)
DirectMetal 20	<ul style="list-style-type: none"> - Sitnozrnati metalni prah koji se temelji na bronci - Gotovi dijelovi imaju dobra mehanička svojstva i kvalitetu površine 	<ul style="list-style-type: none"> - Kalupi za ubrizgavanje - Umetci za lijevanje 	Dušik	1000
EOS Maraging čelik MS1 (X3NiCoMoTi 18-9-5)	<ul style="list-style-type: none"> - Vrlo visoka čvrstoća u kombinaciji s visokom žilavosti - Može naknadno očvrstnuti do 55 HRC termičkim postupkom otvrdnjavanja 	<ul style="list-style-type: none"> - Složeni alati - Dijelovi zrakoplova - Kalupi za ubrizgavanje - Umetci za lijevanje 	Dušik	1000
EOS nehrđajući čelik GP1	<ul style="list-style-type: none"> - Vrlo dobra otpornost na koroziju - Dobra mehanička svojstva - Izvrsna duktilnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Dijelovi visoke otpornosti na koroziju - Dijelovi velike žilavosti i plastičnosti 	Dušik	1500
EOS nehrđajući čelik PH1	<ul style="list-style-type: none"> - Dobra čvrstoća popuštanja i vlačna čvrstoća 	<ul style="list-style-type: none"> - Dijelovi visoke čvrstoće i/ili tvrdoće 	Dušik	1420-1525
EOS Kobalt krom legura MP1	<ul style="list-style-type: none"> - Izvrsna mehanička svojstva - Otpornost na koroziju i temperaturna otpornost 	<ul style="list-style-type: none"> - Implantati - Dijelovi koji zahtijevaju dobra meh.svojstva pri povišenim 	Dušik	2870

		temp. i dobru otpornost na koroziju (dijelovi za motore)		
		- Dijelovi visoke čvrstoće i/ili krutosti		
EOS Kobalt krom legura SP2	- Kemijska i toplinska otpornost	- Zubni implantati		2870
EOS Titan Ti64 i Ti64ELI (ELI – vrlo mala razina nečistoća)	- Izvrsna mehanička svojstva - Otpornost na koroziju - Mala specifična težina - Biokompatibilnost	- Komponente zrakoplovnih motora i motora trkaćih vozila - Implantati	Argon	1670
EOS Titan TiCP	- Izvrsna biokompatibilnost - Otpornost na koroziju - Mala specifična težina - Mali udio nečistoća	- Implantati	Argon	1670
EOS Nikal legura IN718 (NiCr19Fe19NbMo3)	- Dobra otpornost na umor, puzanje i pucanje pri povišenim temp. (do 700°C) - Otpornost na koroziju	- Primjena na visokim temp. - Dijelovi motora - Dijelovi kemijske i procesne industrije - Dijelovi za naftnu i petrokemijsku industriju	Argon	1450
EOS Nikal legura IN625 (NiCr22Mo9Nb)	- Dobra otpornost na umor, puzanje i pucanje - Otpornost na toplinu i koroziju	- Primjena na visokim temp.	Argon	1450

EOS Aluminij legura AlSi10Mg	<ul style="list-style-type: none"> - Dobra mehanička svojstva i visoka tvrdoća - Dobra dinamička svojstva - Dobra kombinacija čvrstoće i žilavosti - Mala težina 	<ul style="list-style-type: none"> - Komponente motora za zrakoplove i trkaća vozila 	Argon	660
---	--	---	-------	-----

Na slici 10 prikazani su svi materijali koji se koriste za EOS M 290.



Slika 9. Materijali za EOS M 290 [5]

Legura AlSi10Mg

Za potrebe ovog rada, koristit će se legura AlSi10Mg. Legura AlSi10Mg karakteristična je po dobrim mehaničkim svojstvima, visokoj tvrdoći, nosivosti, maloj težini i dobrim toplinskom svojstvima. Zbog navedenih karakteristika, spomenuta aluminijska legura najčešće se koristi u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji za izradu dijelova podvrgnutih velikim opterećenjima gdje je potrebna kombinacija dobrih mehaničkih i toplinskih svojstava [5].

Veličina čestica praha iznosi 30 ili 60 μm . Zbog izgradnje u slojevima, dijelovi imaju anizotropna svojstva. Toplinskom obradom mogu se poboljšati mehanička svojstva proizvoda te umanjiti anizotropna svojstva [5].

Kako bi se održala kvaliteta metalnog praha i kako bi se postupak izrade odvijao bez problema, EOS preporučuje skladištenje praha na adekvatan način u originalnim spremnicima koji štite prah od mehaničkih oštećenja i vlage.

3. Identifikacija i prikaz konstrukcijskih principa za DMLS proizvodni postupak

U procesu razvoja proizvoda, konstruktori koriste različita konstrukcijska znanja za različite faze. Najčešći formalizirani načini pohrane konstrukcijskog znanje su principi, heuristike, pravila, smjernice. U ovom radu cilj je zabilježiti konstrukcijsko znanje vezano uz aditivnu proizvodnju metala, koje će biti korišteno u ranim fazama razvoja proizvoda. U literaturi trenutno postoje različiti pristupi za pohranu AM znanja, a dva najčešća su heuristike i principi [9]. Heuristike prikazuju mogućnosti aditivne proizvodnje na visokoj razini apstrakcije i služe za stimuliranje kreativnosti konstruktora kod kreiranja koncepata i istraživanje prostora konstruiranja, dok principi usmjeravaju na pronalazak odgovarajućih konstrukcijskih rješenja za pojedinu funkciju ili konstrukcijski zahtjev. Osnovna razlika između heuristika i principa je u tome da su heuristike bazirane na intuiciji, a principi na empirijskim dokazima [9]. Iako heuristike mogu poslužiti kao vodilja, one ne garantiraju pronalazak odgovarajućeg rješenja. Principi u većoj mjeri pomažu u pronalasku rješenja pojedine funkcije jer su na manjoj razini apstrakcije od heuristika [9]. U literaturi postoji nekoliko metoda kojima se pronalaze i određuju principi. To može biti iz analize postojećih proizvoda, korištenjem već postojećih principa iz literature, definiranjem principa koji su proizašli iz vlastitog ili iskustva konstruktora, principi primjenjivani u konstrukcijskoj ili laboratorijskoj praksi te principi uočeni analiziranjem konstrukcijske prakse [9], [10].

Nijedan pristup do sada nije bio isključivo fokusiran na aditivnu proizvodnju metala. Iz tog razloga će se u radu fokusirati na proizvode izrađene DMLS postupkom te će se definirati konstrukcijski principi temeljeni na toj tehnologiji. Pomoću njih će se prikazati pohranjeno konstrukcijsko znanje koje će olakšati izradu proizvoda aditivnom proizvodnjom metala.

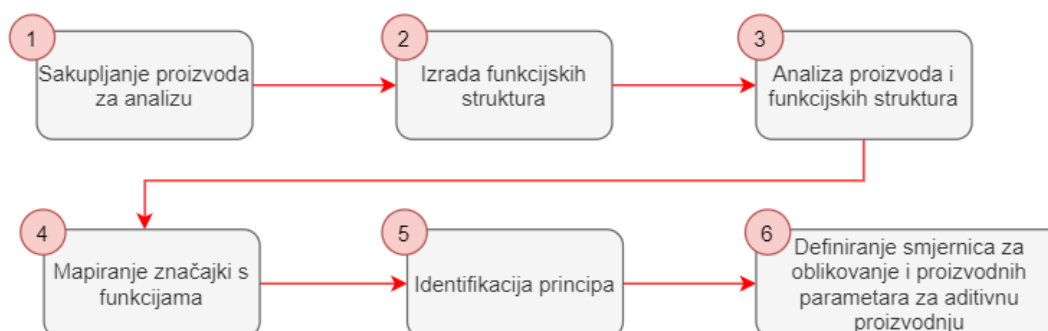
3.1. Metodologija

Prvi korak u definiranju principa aditivne tehnologije je definiranje metodologije koja će se primjenjivati.

Kako bi se identificirali konstrukcijski principi za DMLS proizvodni postupak, analizirat će se postojeći proizvodi izrađeni DMLS-om. Kod odabira proizvoda, glavni fokus stavio se na funkcije i značajke koje su olakšane ili poboljšane aditivnom proizvodnjom. Za definiranje principa prilagodit će se metodologija korištena kod Blösch-Paidosh i Sheae [11] te

Pereza [12]. U metodologijama navedenih autora, analizirali su se postojeći proizvodi izrađeni raznim tehnologijama aditivne proizvodnje. Blösch-Paidosh i Shea identificirale su 29 općih heuristika za aditivnu proizvodnju, a Perez 23 konstrukcijska principa. Zbog lakšeg shvaćanja i vizualizacije principa, principi će biti prikazani i u obliku CAD modela, a kasnije i na fizičkom.

Na slici 10 grafički je prikazana metodologija koja će biti korištena u radu.


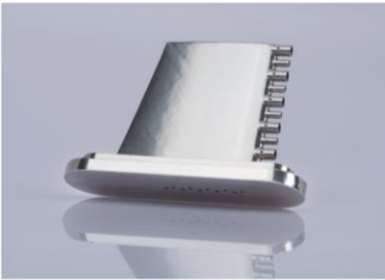







Slika 10. Dijagramski prikaz metodologija





3.2. Sakupljanje proizvoda za analizu



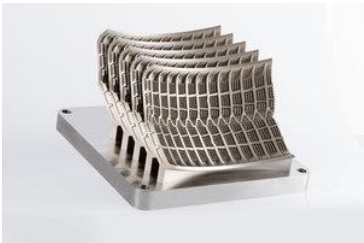

Analizirani proizvodi prikupljeni su na internetskim stranicama (ponajviše na stranicama tvrtke *EOS GmbH*, *Materialise* i *Stratasys*.) te u znanstvenim člancima. U obzir su uzeti proizvodi izrađeni DMLS proizvodnim postupkom. Prilikom odabira proizvoda, prednost se davala onim proizvodima koji posjeduju specifične značajke aditivne proizvodnje te koji se mogu teško ili nikako proizvesti konvencionalnim postupcima. Ukupno je prikupljeno i analizirano 15 proizvoda te su oni prikazani u tablici 5. Analizirani proizvodi najviše se koriste u svemirskoj, zrakoplovnoj i automobilske industriji te u medicini.

Tablica 5. Prikaz proizvoda izrađenih DMLS proizvodnim postupkom

Redni broj	Upotreba	Materijal	Slika
1.	LOPATICA TURBINE		
	Turbostroj	Ti	
	Izvor: EOS, Siemens, Materials Solutions; https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/production-and-industry/turbomachinery-turbines		
2.	SONDA ZA MJERENJE BRZINE I TEMPERATURE U TURBO MOTORIMA		
	Zrakoplovna industrija	Ni-Co legura	
	Izvor: EOS, Vectoflow; https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/all-3d-printing-applications/vectoflow-flow-measurement-probe-aerospace		
3.	RAKETNI MOTOR		
	Svemirska industrija	Incotel 718	
	Izvor: Protolabs; https://www.protolabs.com/resources/success-stories/university-of-minnesota-rocketry-group/		

	Svemirska industrija	Nehrđajući čelik; 316L	
Izvor: Betatype; https://3dprintingindustry.com/news/monash-additive-manufacturing-postdoc-reimagines-rocket-engine-design-betatype-118049/			
4.	UBRIZGAVAJUĆA GLAVA RAKETNOG MOTORA		
	Svemirska industrija	Ni legura; IN718	
Izvor: EOS, Ariane; https://www.eos.info/de/3d-druck-beispiele-anwendung/innovation-stories/aerospaces-ariane-3d-druck-triebwerk			
5.	DRŽAĆ SATELITA		
	Svemirska industrija	Al legura; AlSi10Mg	
Izvor: EOS, Citim GmbH (case study); https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/aerospace-3d-printing/space-propulsion-satellites			
6.	PEDALA		
	Automobilska industrija	Ti	
Izvor: EOS; https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/mobility-logistics/automotive-industry-3d-printing/motor-sports			

7.	OTVARAČ BOCA		
	Svakodnevna uporaba	CAD model	
	Izvor: Diegel, O., Nordin, A., Motte D.:A practical guide to design for additive manufacturing, Springer, 2019., str.67.		
8.	KIRURŠKI ALAT za rekonstrukciju prednjeg križnog ligamenta		
	Medicinska primjena	Nitinol (biokompatibilan)	
	Izvor: Stratasys; https://www.stratasysdirect.com/resources/case-studies/3d-printed-metal-surgical-tool-danamed		
9.	UMECI ZA PRIJENOS VISOKOG MEHANIČKOG OPTEREĆENJA		
	Zrakoplovna industrija	Ti legura; TiAl6V4	
	Izvor: Atos, Materialise; https://www.materialise.com/en/cases/titanium-inserts-for-spacecraft-66-lighter-metal-3d-printing		
10.	DIO SLOŽENOG LUKA		
	Sportska oprema	Nehrđajući čelik; 316L	
	Izvor: Graziosi, S., Rosaa, F., Casatia R., Solarinob P., Vedania M., Bordegonia, M.; Designing for Metal Additive Manufacturing: a case study in the professional sports equipment field		

11.	NOSAČ		
	Zrakoplovna industrija	Ti legura; Ti6Al4V	
	Izvor: Materialise; https://www.materialise.com/en/cases/a-63-lighter-titanium-aerospace-part		
12.	IMPLANTAT KAO ZAMJENA ZA INTERVERTEBRALNI DISK		
	Medicinska primjena	Ti legura; Ti6Al4V	
	Izvor: SHINING 3D, Mantiz; http://en.51shape.com/?p=2003		
13.	KALUP ZA GUME		
	Automobilska industrija	Nehrđajući čelik; 316L	
	Izvor: EOS, Marino Tire; https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/production-and-industry/tooling-diecast-molding		
14.	PLAMENIK		
	Turnostroj	Maraging čelik; MS1	
	Izvor: EOS, Linde; https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/advantages/functional-integration		

3.3. Izrada funkcijskih struktura

Oblik proizvoda proizlazi iz njegove funkcije [13]. Funkcijska struktura predstavlja apstraktni prikaz cjelokupne funkcije proizvoda koji ne sugerira tehničko rješenje. Funkcijska struktura rastavljena je na podfunkcije ili parcijalne funkcije koje su povezane tokovima materijala, energije i signala.

Funkcijska struktura važan je segment inženjerskih aktivnosti, od razumijevanja konstrukcijskog problema, preko izrade koncepata, modeliranja i oblikovanja proizvoda do organiziranja djelatnosti unutar tima [14]. Kako bi se ujednačile funkcijske strukture i kako bi se smanjio broj mogućih definicija funkcija i tokova, koristi se definirani rječnik funkcija i tokova. Korištenjem standardne terminologije, ograničava se broj mogućih izraza te tako pojednostavljuje traženje odgovarajućih značajki [14].

Kako bi se postigla ujednačenost između funkcijskih struktura i smanjio broj mogućih funkcija, korištena je standardna terminologija opisana u radu autora Hirtza et al. [14]. Kod Hirtzove terminologije na najvišoj razini apstrakcije, tokovi se dijele na tri kategorije (*material, signal, energy*), a funkcije se dijele na osam kategorija (*branch, channel, connect, control, convert, provision, signal, support*). Svaka od navedenih kategorija podijeljena je još i na sekundarne i tercijarne razine vokabulara. U radu je korištena samo druga razina vokabulara jer se prijašnjim istraživanjima pokazala kao najbolja. Korištenjem samo jedne razine vokabulara, postiže se ponovljivost koja pomaže u razumijevanju konstrukcijskih principa te pospješuje njihovu uporabu [15].

Nakon izrađenih funkcijskih struktura proizvoda, provjerava se jesu li svi tokovi i funkcije definirane Hirtzovom sekundarnom razinom.

3.4. Postupak izrade funkcijske strukture

Postupak izrade funkcijske strukture započinje izradom glavnog toka, a razrada ovisi o analiziranom proizvodu i iskustvu konstruktora.

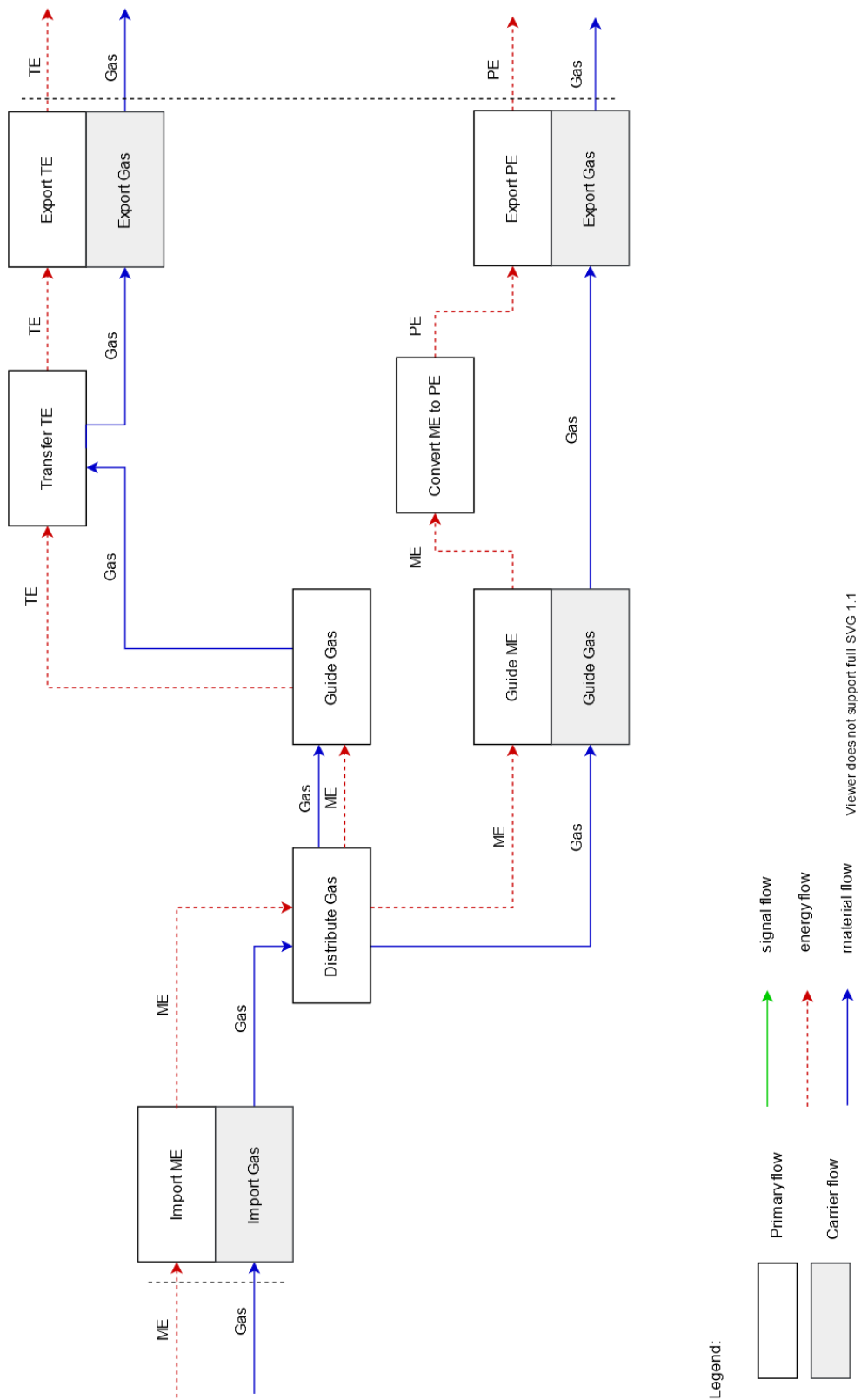
Tijekom izrade određuju se ulazi i izlazi te parcijalne funkcije koje su međusobno povezane tokovima.

Dodatna pozornost posvećena je i razlikovanju dviju vrsta tokova; primarnog i sekundarnog. Primarni tok (eng. *primary flow*) je tok od primarne važnosti i utjecaja na funkcijsku pouzdanost

sustava/proizvoda kojeg se analizira. Noseći ili sekundarni (eng. *carrier flow*) tok je tok koji je neaktivan ili od manje važnosti za sustav/proizvod [16]. U funkcijskim strukturama analiziranih proizvoda, noseći tok je prikazan sivom bojom te omogućuje prijenos primarnog toka kroz sustav.

Izrađeno je ukupno 14 funkcijskih struktura (dva proizvoda imala su istu funkcijsku strukturu). Primjer funkcijske strukture sonde za mjerenje brzine i temperature u turbo motorima prikazan je na slici 11.

Prilikom izrade funkcijske strukture spomenutog proizvoda, uočeno je da je glavni tok prijenos fluida, točnije plina, pomoću unutarnjih struktura. Prijenos fluida omogućen je ulaznom mehaničkom energijom. Upravo iz tog razloga energija se smatra primarnim tokom te se njoj pridodaje veća značajnost, a fluid sekundarnim tokom. Glavna funkcija je pretvorba mehaničke energije fluida /plina u pneumatsku kako bi senzori u ostatku konstrukcije mogli očitati razliku tlakova i izračunati brzinu gibanja zraka. Definiran je jedan ulaz i dva izlaza gdje se svaki od njih dijeli na primarni i sekundarni tok.



Slika 11. Primjer funkcijske strukture sonde za mjerenje brzine i temperature u turbo motorima

3.5. Analiza proizvoda i funkcijskih struktura

Analizom proizvoda i njihovih funkcijskih struktura, uočavaju se značajke karakteristične za aditivnu proizvodnju metala. Kod svake analizirane funkcijske strukture, pronađena je značajka aditivne proizvodnje koja je ključna u realiziranju određene funkcije ili bloka funkcija. Također je promatrano i koja je značajka poboljšana aditivnom proizvodnjom.

Analizom svih prikupljenih proizvoda, uočene su sljedeće značajke karakteristične za aditivnu proizvodnju metala:

- integracija potpornog materijala u proizvod,
- primjena rešetkaste strukture,
- primjena topološke optimizacije,
- primjena unutarnjih struktura (kanala),
- promjena teksture površine,
- jednostavna prilagodba individualnom korisniku,
- integracija dijelova,
- izrada proizvoda sloj po sloj radi smanjenja toplinskog opterećenja,
- prihvata objekta prilagođen standardnom sučelju,
- prihvata objekta prilagođen kompleksnoj/nestandardnoj geometriji,
- prilagodba veličine pora,
- omogućeno gibanje pomoću višestruko povezanih komponenti proizvoda,
- prijenos informacija geometrijom.

Navedene značajke bit će pobliže opisane u sljedećim poglavljima.

3.5.1. Integracija potpornog materijala u proizvod

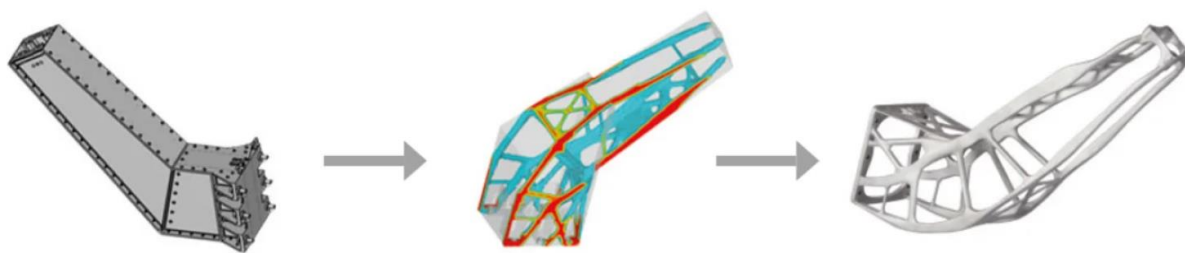
Potporni materijal je neizostavan prilikom izrade svakog proizvoda DMLS proizvodnim postupkom. Potporni materijal može biti različite orijentacije i oblika, a izrađen je od istog materijala kao i sam proizvod. On podupire model koji se izrađuje kako ne bi došlo do prevrtanja, ojačava i pričvršćuju model na platformu, odvodi višak topline i sprječava izvijanje modela. Potporni materijal se nakon izrade najčešće uklanja čime se narušava površinska hrapavost i javlja se potreba za dodatnom obradom čime se produžuje vrijeme procesa. No, konstrukcijom potpornih struktura, olakšava se sam proces izrade i ubrzava proces naknadne obrade.

3.5.2. Primjena rešetke strukture

DMLS postupak olakšava izradu različitih rešetkastih struktura integriranih u proizvod. Primjenom rešetkaste strukture smanjuje se težina konstrukcije uz zadržavanje visoke razine čvrstoće ili dobre krutosti. Rešetkasta struktura sastoji se od ponovljenih jedinica istog oblika s ciljem smanjenja količine materijala i težine konstrukcije. Postoji mnogo različitih oblika i veličina spomenutih jedinica, kao i uzoraka koji se ponavljaju. Primjenom rešetkaste strukture, poboljšava se odnos snage i težine i smanjuje se potreba za potpornim materijalom. Odabirom strukture ispune utječe se i na krutost/fleksibilnost proizvoda.

3.5.3. Primjena topološke optimizacije

Topološkom optimizacijom postiže se optimalan raspored materijalnih točaka gdje je referentna domena podijeljena na šuplje i pune (krute) elemente u diskretiziranoj mreži konačnih elemenata [3]. Unaprijed provedenim postupkom topološke optimizacije postiže se kompleksna geometrija, a štedi se na materijalu i masi proizvoda, proces izrade je ubrzani, a izgled proizvoda je autentičan i slobodniji (Slika 12). Kada se radi o većoj količini topološki optimiziranih dijelova u jednom proizvodu (npr. kopča sjedala u zrakoplovu), može se postići značajna ušteda na materijalu i u cijeni. Primjenom topološke optimizacije izvedba dijelova i oblika nije ograničena kao kod tradicionalnih proizvodnih postupaka te se model može jednostavno prilagoditi zahtjevu.



Slika 12. Topološka optimizacija držača satelita [5]

3.5.4. Primjena unutarnjih struktura (kanala)

Primjena kanala u proizvodima je višestruka:

- a) DMLS proizvodni postupak omogućuje izradu kanala za hlađenje ili prijenos energije i fluida. Kanali za hlađenje najčešće se koriste u izradi alata. Oni prate konturu oblika u kalupu. Presjek kanala ne mora uvijek biti kružni (Slika 13). Uporabom kanala postiže se ujednačeno hlađenje izratka koje rezultira boljim konačnim svojstvima proizvoda. Također, skraćuje se ciklus proizvodnje i postiže se visoka razina fleksibilnosti.



Slika 13. Različiti oblici presjeka kanala za koje, do određenog iznosa, nije potrebna potporna struktura [3]

- b) Kanali za prijenos energije ili fluida su najčešće manjih dimenzija te nepravilnog toka. Pospješuju prijenos i odvođenje energije ili fluida. Moguća je primjena većeg broja manjih kanala smještenih na kritičnom dijelu proizvoda ili jednog većeg koji prati konturu proizvoda i na taj način pospješuje performanse. Iako je kružni presjek kanala najčešći, to ne mora biti uvijek slučaj.
- c) S konstrukcijom unutarnjih struktura povezan je i odvod topline. Dobrom konstrukcijom kanala, smanjuje se toplinsko naprezanje [5].

3.5.5. Promjena teksture površine

U nekim slučajevima, teksturu površine proizvoda potrebno je prilagoditi iz estetskih ili funkcionalnih razloga. U kratkom vremenskom periodu i bez povećanja troškova, moguće je proizvoljno oblikovati površinu proizvoda ili utjecati na površinsku hrapavost proizvoda. Specifičnom teksturom površine, utječe se na prihvat između dvaju proizvoda ili između čovjeka i proizvoda.

3.5.6. Jednostavna prilagodba individualnom korisniku

U usporedbi s tradicionalnim tehnologijama, aditivna proizvodnja omogućuje personaliziranu izradu proizvoda. U kratkom vremenu postižu se preinake i prilagodbe svakom individualnom korisniku bez povećanja troškova proizvodnje, a efikasnost funkcije proizvoda se povećava. Do prilagodbe i preinaka dolazi iz estetskih i/ili ergonomskih razloga.

3.5.7. Integracija dijelova

Primjenom DMLS proizvodnog postupka moguće je izraditi jedan, potpuno funkcionalan dio čime se eliminira potreba za izradom više dijelova koje je potrebno naknadno spajati. Integracijom dijelova u jedan proizvod skraćuje se vrijeme proizvodnje i težina konstrukcije. Integriranim dijelovima povećava se i robusnost te tijekom vremena imaju veću otpornost prema trenju i vibracijama, a ujedno se smanjuje i mogućnost za stvaranjem zona koncentracije naprezanja [17].

3.5.8. Izrada proizvoda sloj po sloj radi smanjenja toplinskog opterećenja

Obilježje DMLS proizvodnog postupka je izrada proizvoda sloj po sloj gdje se svaki sloj, primjenom izvora energije, učvršćuje na prethodni. Odabirom ispravne debljine sloja, smanjuje se toplinsko opterećenje i naprezanje uvedeno u proizvod samim postupkom izrade. Debljina sloja se ne može generirati CAD modelom, već se definira prije samog postupka proizvodnje u postavkama printanja, a ovisi o vrsti materijala i specifikacijama printera.

3.5.9. Prihvat objekta prilagođen standardnom sučelju

Zbog određenih zahtjeva, poput smanjenja mase ili poboljšanja performansi, često se aditivnom tehnologijom, točnije DMLS proizvodnim postupkom, izrađuje samo jedan, tzv. kritični dio proizvoda. Kako bi dijelovi izrađeni konvencionalnim postupkom i dio izrađen aditivnom tehnologijom funkcionirali, potrebno je osigurati adekvatan prihvat. Zahvaljujući individualnom pristupu u rješavanju problema, aditivna tehnologija omogućuje prilagodbu standardnom obliku kako bi se omogućilo spajanje s drugim komponentama.

3.5.10. Prihvat objekta prilagođen kompleksnoj/nestandardnoj geometriji

U iznimnim slučajevima, potrebno je osigurati i adekvatan prihvat dvaju proizvoda izrađenih DMLS postupkom. I u tom slučaju, aditivna proizvodnja omogućuje jednostavnu prilagodbu kompleksnoj/nestandardnoj geometriji. No, treba napomenuti da su to ipak rijetki slučajevi jer aditivna tehnologija teži integraciji dijelova.

3.5.11. Prilagodba veličine pora

Porozni materijali definiraju se kao materijali koji imaju pore (šupljine, kanale ili međuprostore). Karakteristike poroznih materijala ovise o veličini i rasporedu pora, kao i poroznosti koja je definira kao omjer ukupnog volumena pora u odnosu na volumen materijala te o sastavu materijala. Poroznost ima značajan utjecaj na svojstva materijala i njegovu primjenu. U većini slučajeva je nepoželjna, no ne i u medicinskim primjenama. Za razliku od konvencionalnih postupaka, DMLS postupkom može se precizno kontrolirati veličina pora jer se metalni prah sinterira, odnosno srašćuje u krutu masu zadanog oblika, što je bitna značajka kod izrade implantata. Za rast i obnovu tkiva, važnu ulogu ima veličina pora. Potrebno je koristiti nekoliko parametara da bi se opisala porozna struktura. Neki od tih parametara su veličina i oblik pora, dimenzionalnost i usmjerenost kanala.

3.5.12. Omogućeno gibanje pomoću višestruko povezanih komponenti proizvoda

DMLS proizvodni postupak omogućuje izradu pomičnih dijelova u jednom ciklusu proizvodnje. Kako ne bi došlo do spajanja dijelova, između njih se ostavlja zračnost određenog iznosa. Na taj način smanjuje se ukupno vrijeme proizvodnje i eliminira se potreba za naknadnim spajanjem.

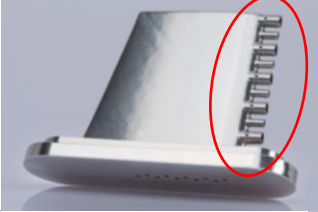
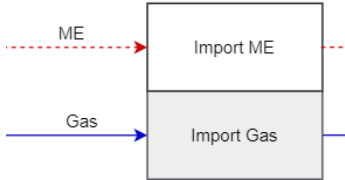
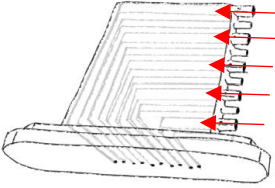
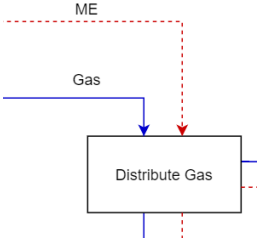
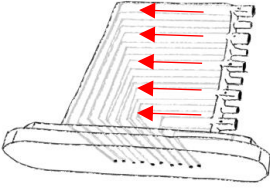

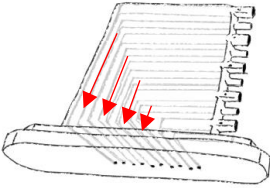

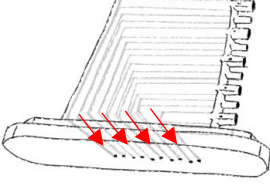
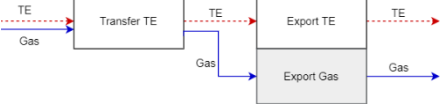

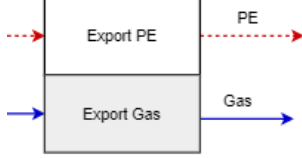
3.5.13. Prijenos informacija geometrijom

Aditivna proizvodnja, uključujući i DMLS postupak, omogućuje geometrijsku slobodu s niskim ili nikakvim dodatnim troškovima. Ispupčena ili udubljena tekstura površine, može poslužiti za prijenos informacija u obliku teksta ili oblika. Zahvaljujući geometrijskoj slobodi, na proizvodu se može prikazati tekstualni opis, upute ili upozorenje [17].

3.6. Mapiranje značajki proizvoda s funkcijama

Nakon analize proizvoda, slijedi povezivanje značajki i funkcija koje one rješavaju s ciljem identifikacije konstrukcijskih principa. Na primjeru sonde za mjerenje brzine i temperature u turbo motorima prikazan je proces mapiranja značajki s funkcijama. Sonda se ističe po unutarnjim strukturama tj. kanalici. Kanalići su oblici koji se mogu proizvesti aditivnom proizvodnjom (DMLS proizvodnim postupkom), a najčešće prate konturu proizvoda ili su smjera koji se ne može izraditi tradicionalnim postupkom (npr. bušenjem) te ih iz tog razloga svrstavaju u površinu nestandardnog oblika. Pomoću njih se postiže bolji prijenos fluida i energije te ujednačeno hlađenje izratka što dovodi do povećanja performansi proizvoda. Iz opisanog slijedi da su kanalići značajke DMLS proizvodnog postupka, a prijenos fluida i energija funkcija koju oni rješavaju. U tablici 6 prikazan je opis funkcije, slika modela s označenim dijelovima preko kojih se rješava određena funkcija te isječak iz funkcijske strukture.

Tablica 6. Analiza sonde za mjerenje brzine i temperature u turbo motorima

SONDA ZA MJERENJE BRZINE I TEMPERATURA U TURBO MOTORIMA		
Opis funkcije	Slika	Isječak iz funkcijske strukture
Uvođenje fluida i energije preko površine nestandardnog oblika („priključaka“)		
Distribucija fluida preko kompleksne/nestandardne geometrije (unutarnjih struktura)		
Vođenje fluida preko kompleksne/nestandardne geometrije (unutarnjih struktura)		
Poboljšana pretvorba jednog oblika u drugi pomoću kompleksne/nestandardne geometrije (većeg broja unutarnjih struktura)		
Prijenos energije fluida kroz unutarnje strukture		
Izlaz energije i fluida s ciljem povećanja performansi i/ili funkcionalnosti proizvoda pomoću nestandardne/kompleksne geometrije (unutarnjih struktura)		

Na ovaj način analiziran je svaki proizvod i njegova pripadajuća funkcijska struktura. Nakon provedenog mapiranja, značajke su grupirane prema međusobnim sličnostima iz kojih su proizašli principi. Identificirano je ukupno 15 principa:

1. Konstrukcijsko oblikovanje proizvoda s integracijom potpornog materijala kao sastavnog dijela proizvoda.
2. Upotreba rešetkaste strukture radi uštede na težini i smanjenju potrebe za potpornim materijalom.
3. Korištenje topološke optimizacije u svrhu postizanja biološke strukture.
4. Korištenje topološke optimizacije radi uštede na težini.
5. Integracija više dijelova u jednu komponenta kako bi se skratilo vrijeme proizvodnje, kompleksnost pojedinačnog dizajna i povećala performansa proizvoda.
6. Prilagodna proizvoda individualnoj ergonomiji čovjeka.
7. Prijenos informacija geometrijom.
8. Oblikovanje površine proizvoda iz estetskih razloga.
9. Oblikovanje površine proizvoda zbog povećanja performansi i regulacije površinske hrapavosti.
10. Upotreba kanala koji pospješuju prijenos fluida i energije te konstrukciju proizvoda.
11. Upotreba kanala promjenjive putanje radi distribucije toka.
12. Prilagodna proizvoda standardnoj geometriji sučelja.
13. Prilagodba proizvoda kompleksnoj geometriji sučelja.
14. Izrada funkcionalnih mehanizama/proizvoda unutar jednog postupka.
15. Prilagodba debljine sloja radi smanjenja toplinskog opterećenja.

U tablici 7 prikazan je popis proizvoda i definiranih principa koji su kod njih uočeni. Principi obilježeni oznakom (*) definiraju se prije samog postupka proizvodnje u postavkama printanja.

Tablica 7. Popis proizvoda i definiranih principa

Proizvod	Princip														
	1 *	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15 *
Lopatica turbine					X					X	X	X			X
Sonda					X					X	X				X
Raketni motor 1					X					X	X	X	X		
Raketni motor 2		X			X							X	X		
Ubrizgavajuća glava raketnog motora					X					X		X	X		
Držać satelita	X		X	X								X			
Pedala		X					X	X	X			X			
Otvarač boca	X			X		X									
Kirurški alat					X	X	X	X	X						
Umeci za prijenos visoko mehaničkog opterećenja		X										X			
Dio složenog luka					X							X		X	
Nosač		X										X			
Implantat		X				X			X			X			
Kalup za gume					X							X			
Plamenik					X					X	X				

3.7. Prikaz principa

Identificirane konstrukcijske principe potrebno je prikazati na način da prikažu konstrukcijsko znanje sadržano u pojedinom principu te da potaknu kreativnost konstruktora ili sugeriraju rješenje za dani problem. To se može postići tekstualnim ili slikovnim opisom te modelom (CAD model i/ili fizički model) [18]. Principi se mogu prikazati kao:

- slikovni opis,
- tekstualni opis,
- CAD model,
- fizički model.

Tekstualni opis izvrstan je način prikazivanja konstrukcijskih principa kada moraju biti opisani na visokom stupnju apstrakcije. Konstruktori tada riječi prepoznaju kao pojmove i iz njih izvlače šire značenje. Tekstualni oblik može se nadopuniti vizualnim opisom, tj. skicom, jer postoje ideje koje se ne mogu izraziti tekstualnim opisom [18].

Osim tekstualnog i slikovnog opisa, principi mogu biti prikazani i u obliku CAD i fizičkog modela te će na njima biti fokus u radu.

CAD model principa omogućuje vizualizaciju i percepciju principa. Na taj način konstruktor bolje razumije princip te lakše pronalazi njegovu namjenu. CAD model je 3D opis principa, ali i međukorak prema fizičkom modelu principa. Fizički model omogućuje još bolje shvaćanje i razumijevanje principa. Dokazano je da interakcija konstruktora s fizičkim modelom ubrzava razvoj ideja te iskorištavanje konstrukcijskih principa [19]. Fizički modeli također pružaju uvid u teksturu površine, težinu, oblik te potiču kreativnost konstruktora. Kako bi se olakšao proizvodni proces, potrebno je odrediti smjernice za oblikovanje i parametre proizvodnje.

3.8. Definiranje smjernica za oblikovanje i proizvodnih parametara za aditivnu proizvodnju metala

Za uspješno oblikovanje proizvoda i njihovu izradu aditivnom proizvodnjom metala, definiraju se smjernice za oblikovanje i proizvodni parametri. Prilikom konstruiranja samog proizvoda, potrebno je obratiti pozornost na [3]:

- rešetkastu strukturu,
- dodavanje potpornog materijala,
- ujednačenu debljinu stijenke,
- pravilno konstruiranje rebara radi povišenje krutosti,
- izbjegavanje oštih rubova i kutova,
- izbjegavanje naglih prijelaza u debljini stijenke.

Parametri za oblikovanje proizvoda postupkom aditivne proizvodnje, poput minimalne veličine značajke, maksimalnog samopotpornog kuta, itd. razlikuju se ovisno o proizvođaču i modelu printera. Kako bi se dobile točne vrijednosti parametara, poželjno je napraviti probni/testni model i utvrditi preporuku proizvođača. Pomoću prikupljenih proizvoda i literature, utvrđuju se parametri za oblikovanje pomoću kojih će se izraditi CAD modeli, a kasnije i fizički modeli. Praćenjem utvrđenih vrijednosti, konstruiranje proizvoda je olakšano, a funkcionalnost poboljšana. Pregledom literature, dana su ograničenja i preporuke za sljedeće parametre proizvodnje:

- potporni materijal,
- samopotporni kut,
- rešetkastu strukturu,
- zaostala naprezanja,
- koncentraciju naprezanja,
- izradu pokretnog modela,
- debljinu stijenke,
- ispupčenih i urezanih dijelova,
- površinsku hrapavost,
- izradu navoja,
- korištenja istog materijala,
- dužeg životnog vijeka proizvoda.

Utvrđene smjernice za oblikovanje i parametri za proizvodnju pobliže su objašnjeni u sljedećim poglavljima.

3.8.1. Potporni materijal

Prilikom dizajniranja proizvoda, potrebno je obratiti pažnju na što manju primjenu potpornog materijala ili na njegovo jednostavno uklanjanje kako se ne bi narušila kvaliteta površine. Potporna struktura može biti zid, rešetkasta struktura, linija, točka, stožac, blok. Koji oblik potpore će se koristiti, ovisi o geometriji proizvoda. Ako je moguće, dijelovi bi se trebali orijentirati tako da se izbjegnu velike vodoravne površine. Na slici 14 prikazan je proizvod pod orijentacijom od 45° te s rešetkastim potpornim strukturama.

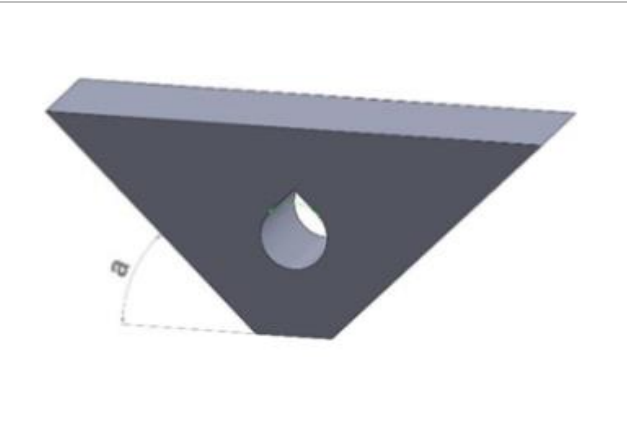


Slika 14. Metalni nosač pod orijentacijom od 45° prije uklanjanja potpornih struktura [20]

3.8.2. Samopotporni kut

Samopotporni kut predstavlja kut, pod kojim se dio može printati bez potrebe za potpornom strukturom, a dobiva se mjereći se od vodoravne površine radnog komada [3]. Kutovi manji od 45° , zahtijevaju dodatak pomoćnog materijala ili potporne strukture. Dodatni materijal se uklanja ručno čime se produžuje vrijeme naknadne obrade te negativno utječe na površinsku hrapavost. U tablici 8 prikazani su najčešće korišteni materijali za DMLS proizvodni postupak i iznos kuta koji moraju zadovoljiti kako bi se eliminirala potreba za potpornom strukturom.

Tablica 8. Maksimalni iznos samopotpornog kuta bez potrebe za potpornom strukturom [3]

Materijal	Maksimalni iznos samopotpornog kuta bez potrebe za potpornom strukturom (a)	
Nehrđajući čelik	60°	
Titan	60°	
Aluminij	45°	
Kobalt krom	60°	

3.8.3. Rešetkasta struktura

Rešetkasta struktura karakterističan je prikaz ispune površine kod aditivne proizvodnje metala. Rešetke mogu biti jednolike (Slika 15), pri čemu se ista veličina jedinice ponavlja u svim smjerovima dijela, ili promjenjiva, pri čemu se veličina i razmak jedinica razlikuju u različitim smjerovima. Promjenjive rešetkaste strukture popularne su u medicini (implantati).

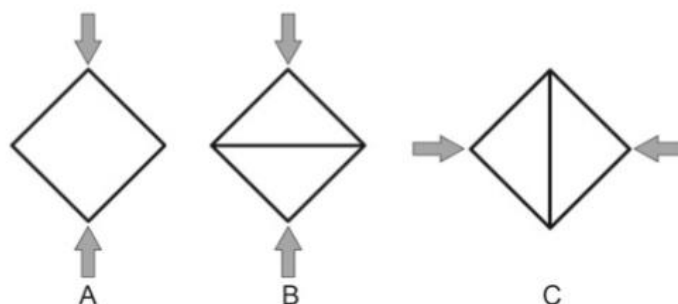


Slika 15. Jednolike rešetke u različitim veličinama [21]

Postoji više načina pretvaranja konstrukcije u rešetkastu strukturu [3]:

1. Pretvorba cijelog dijela u rešetkastu strukturu (npr. implantati).
2. Pretvorba unutrašnjeg dijela u rešetkastu strukturu, a vanjski rub ostaje određene debljine (ako je pravilno konstruirana, unutarnja konstrukcija djeluje i kao potporni materijal za prijenos topline unutar dijela).
3. Model je podijeljen na kruta i rešetkasta područja (potrebno je već izvorni CAD model podijeliti na određena područja, kako bi se lakše provelo spajanje dijelova rešetki i krutih dijelova).
4. Pretvorba na temelju analize konačnih elemenata (veličina i razmak jedinica varira na temelju analize konačnih elemenata).

Pri dizajniranju rešetki, važno je koristiti rešetke koje su samonosive i mogu se isprintati bez potrebe za potpornim materijalom. Ispravan način izrade rešetkaste strukture prikazan je na slici 16. Ako su prisutne sile u smjeru usmjerenja rešetke, rešetka neće biti dovoljno izdržljiva (oblik A). Dodavanjem potpornja između, oblik B će biti izdržljiviji od oblika A, ali će ga biti teže isprintati zbog vodoravnog potpornja. Međutim, stavljanjem vertikalnog potpornja, oblik će se moći lakše isprintati i bit će otporan na sile (oblik C) [3].



Slika 16. Oblici rešetke [3]

Zbog rešetkaste strukture, DMLS je idealan za izradu satelita i satelitskih komponenata zbog mogućnosti smanjenja težine i do 70%. Iako manje težine, DMLS dijelovi i dalje održavaju istu čvrstoću i cjelovitost dijelova kao i tradicionalno izrađeni dijelovi [22].

3.8.4. *Zaostalo naprezanje*

Kao i kod postupka zavarivanja, tako je i kod postupaka aditivne proizvodnje za metale, prisutna određena količina zaostalih naprezanja koja u velikoj količini može utjecati na funkcionalnost proizvodnog dijela. To su naprezanja koja ostaju u materijalu i nakon što se ukloni uzrok naprezanja, a mogu dovesti do savijanja cijelog dijela, pucanja ili kraćeg vijeka trajanja. Kako bi se izbjeglo zaostalo naprezanje, može se primijeniti i nekoliko jednostavnih, a učinkovitih tehnika prilikom konstruiranja, poput izbjegavanja područja velike debljine (prilikom hlađenja, unutrašnjost može ostati topla te time dovesti do naprezanja) te velikih promjena u debljini stijenke. Primjenom toplinske obrade također se smanjuje zaostalo naprezanje [3].

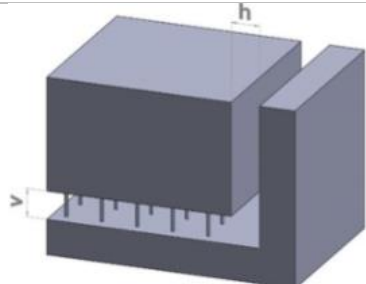
3.8.5. *Koncentracija naprezanja*

Osim zaostalih naprezanja, česta je i pojava koncentracije naprezanja, tj. mjesta gdje je prisutna veća količina naprezanja. Ta mjesta često dovode do umora materijala, a u konačnici do izobličenja ili pucanja [3]. Kako bi se smanjila koncentracija naprezanja, potrebno je na sve oštre rubove staviti zaobljenja (*fillet*), smanjiti debljinu stijenke i izbjegavati velike količine materijala na jednom mjestu.

3.8.6. *Izrada pokretnog modela*

DMLS postupak omogućuje izradu pokretnog modela bez potrebe za naknadnim spajanjem. Kako bi se to postiglo, potrebno je osigurati minimalnu horizontalnu prazninu (Tablica 9) između dva dijela, tj. zračnost, koja iznosi 0,2 mm [3]. Pri ovoj vrijednosti neće doći do sjedinjenja dijelova, a nakon završenog procesa, dijelovi će se moći pokretati.

Tablica 9. Definirani iznosi za izradu pokretnog modela [3]

Minimalna praznina	
Horizontalna = 0,2 mm	
Vertikalna = Odgovarajući razmak kako bi se naknadno mogao ukloniti potporni materijal	

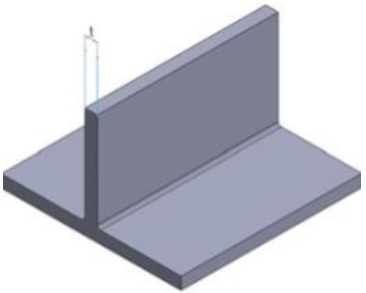
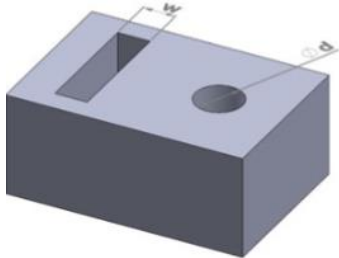
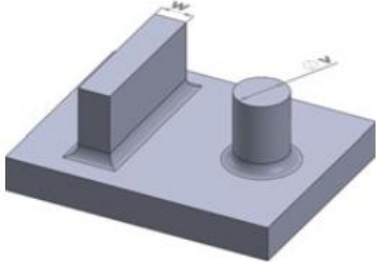
3.8.7. Debljina stijenke

Kako su velike površine s malom debljinom stijenke sklone izobličenju, potrebno je definirati i minimalnu debljinu stijenke. Poželjno je da minimalna debljina stijenke iznosi 0,3 mm, a preporučena je 1 mm (Tablica 10) [3]. Ukoliko je potrebno izraditi stijenku veće debljine, moguće ju je ojačati rebrima ili dodatnim potpornim materijalom. Dodatkom rebra, debljina stijenke ostaje ista, a krutost postaje veća.

3.8.8. Ispupčeni i urezani dijelovi

Postoje i definirana minimalna ograničenja kod ispupčenih dijelova te ureza i proreza (Tablica 10). Premale vrijednosti dovode do nepravilnog oblika i mogućeg nepoželjnog spajanja dviju stijenki prilikom procesa izrade. Iznos minimalne moguće širine pravokutnog oblika i iznos minimalnog dijametra iznosi 0,5 mm (vrijedi za ispupčeni i urezani dio). Kod pravokutnih oblika poželjno je napraviti unutarnja zaobljenja kako bi se smanjila koncentracija naprezanja.

Tablica 10. Grafički prikaz ograničenja za debljinu stijenke, proreza i utora te ispupčenih dijelova [3]

Debljina stijenke	Prorezi i utori	Ispupčeni dijelovi
		
Minimalna debljina stijenke (t) = 0,3 mm	Minimalna širina proreza (w) = 0,5 mm	Minimalna širina za pravokutni ispupčeni dio (w) = 0,5 mm
Preporučena minimalna debljina stijenke (t) = 1 mm	Minimalni dijametar za utor (d) = 0,5 mm	Minimalni dijametar za kružni ispupčeni dio (d) = 0,5 mm

3.8.9. Površinska hrapavost

DMLS postupak omogućuje izradu preciznih dijelova s dopuštenim odstupanjima od 0,076 mm [23]. Kao i kod svakog drugog postupka aditivne proizvodnje, i kod DMLS postupka u obzir treba uzeti blago izraženi „stepeničasti efekt“ koji nastaje tijekom izrade sloja na sloj. Ako je potrebna potpuno glatka površina, moguće je to postići naknadnom obradom, postupcima poput poliranja ili pjeskarenja.

3.8.10. Izrada navoja

Izrada navoja aditivnom proizvodnjom nije uobičajena, no teoretski se mogu printati od veličine M4. Zbog boljih karakteristika navoja, preporuka je da se na provrt naknadno ureže navoj.

3.8.11. Upotreba istog materijala radi lakšeg recikliranja

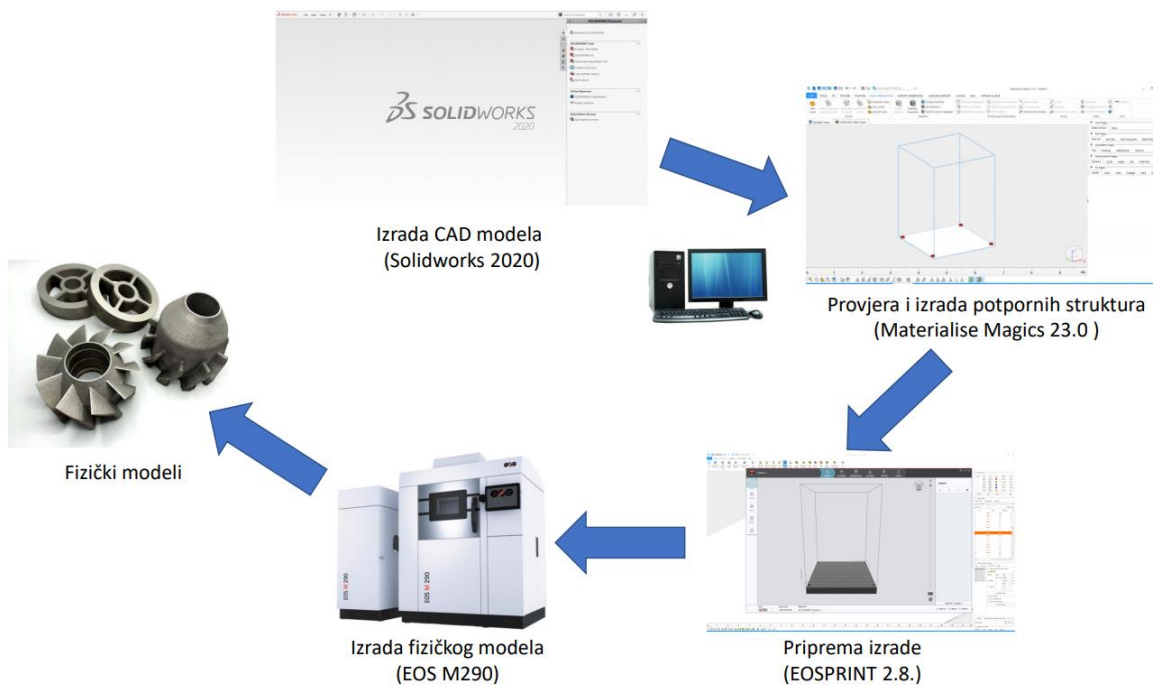
U današnje vrijeme, recikliranje se smatra neizostavnim postupkom na kraju životnog vijeka proizvoda te u nekim slučajevima predstavlja veliki izazov. Koristeći samo jedan gradivni materijal, postupak recikliranja je uvelike olakšan. Recikliranjem se smanjuje onečišćenje okoliša i izrabljivanje sirovina. Metalni dijelovi se recikliraju na način da se usitnjavaju, razvrstavaju i tale u novi željeni oblik te je na taj način omogućeno njihovo ponovno korištenje.

3.8.12. Brza proizvodnja i dugi životni vijek proizvoda

Iako je proizvodnja DMLS postupkom skuplja od tradicionalnih postupaka, brzina proizvodnje, jednostavnost prilagodbe dizajna i dugi životni vijek proizvoda, prednosti su koje se uzimaju u obzir prilikom odabira proizvodnog postupka.

4. Izrada CAD modela

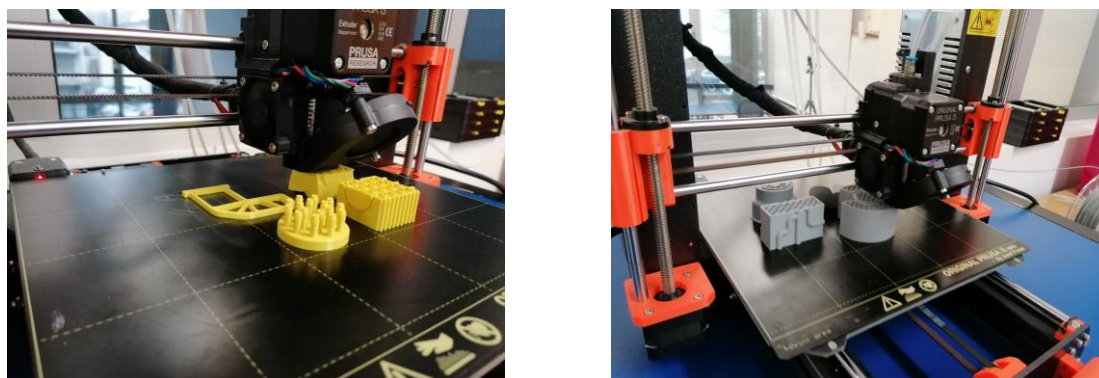
Nakon utvrđenih značajki, principa i parametara za oblikovanje, slijedi izrada modela. Na slici 17 prikazan je tijek razvoja CAD modela u fizički model za DMLS proizvodni postupak.



Slika 17. Tijek razvoja CAD modela u fizički model za DMLS proizvodni postupak

4.1. Prikaz pojedinačnih principa

Prije same izrade modela DMLS proizvodnim postupkom, CAD modeli identificiranih konstrukcijskih principa najprije su printani FDM tehnikom na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Zagreb, u Laboratoriju za konstruiranje – CADLab (Slika 18).

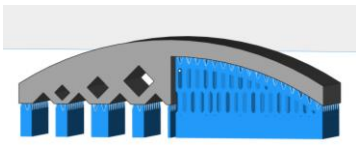

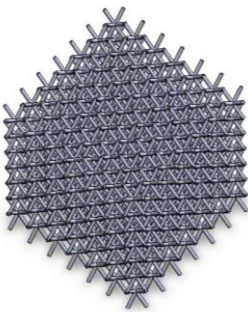
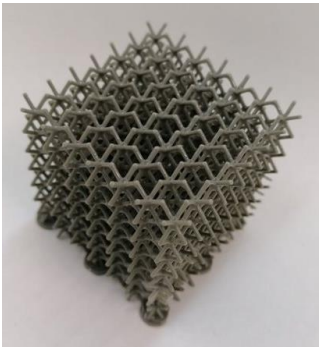

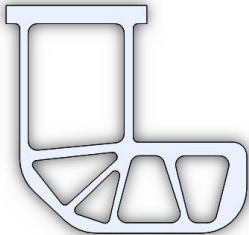



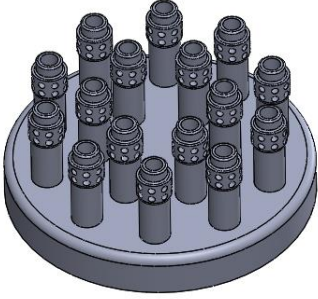

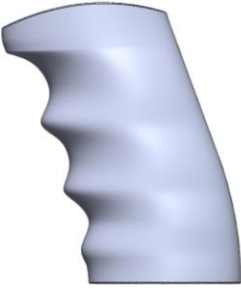

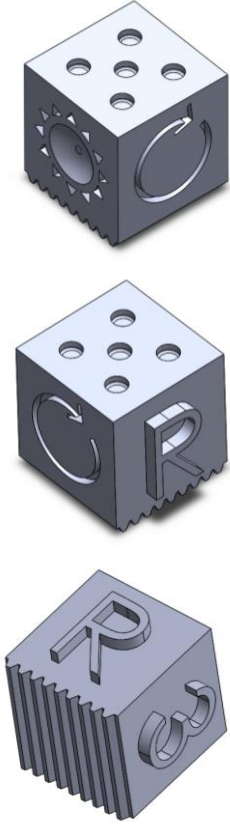
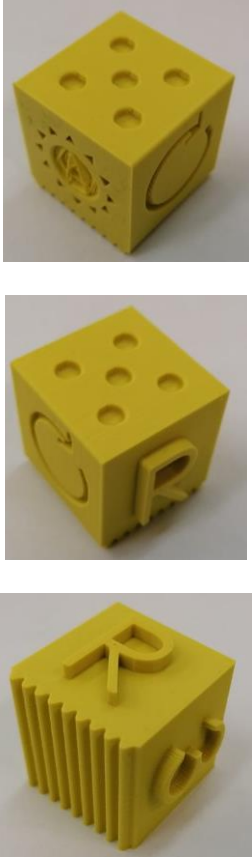
Slika 18. Printanje modela pojedinačnih principa FDM tehnikom (CADLab, FSB Zagreb)

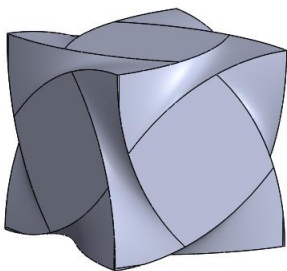

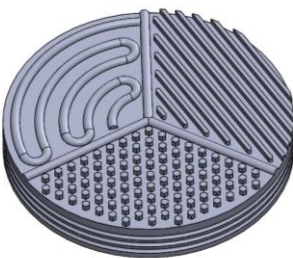



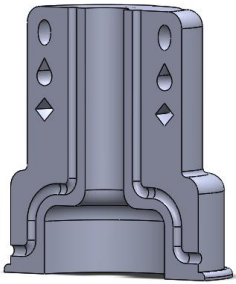

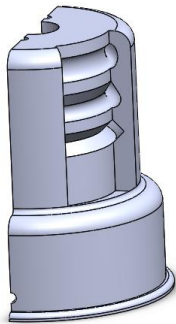

Fizički modeli pojedinačnih principa olakšali su njihovo grupiranje te izradu CAD modela za DMLS proizvodni postupak.

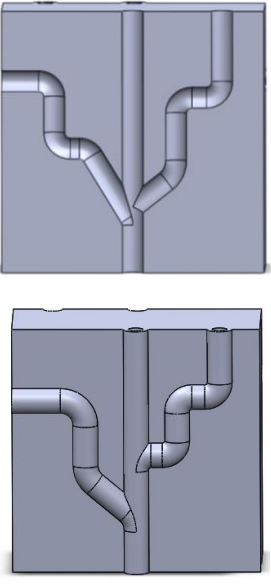
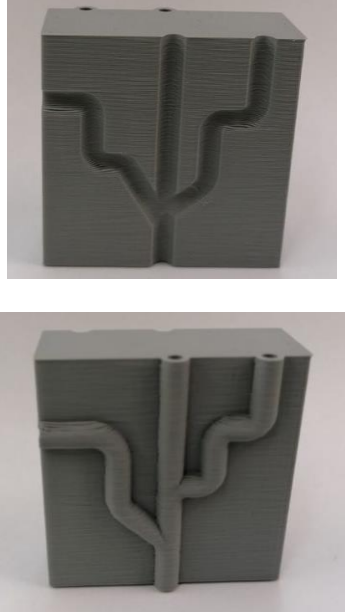
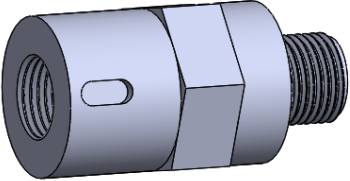

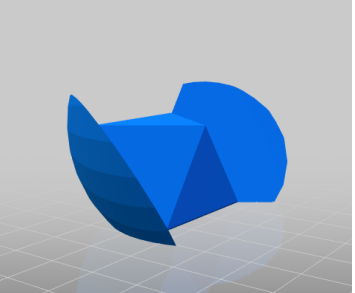



Modeli pojedinačnih principa prikazani su u tablici 11.

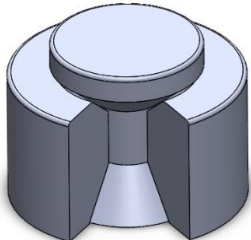
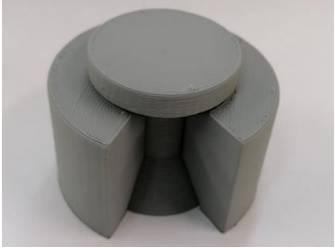
Tablica 11. 3D prikaz modela principa

	PRINCIP	CAD MODEL	FIZIČKI MODEL
1	Konstruktivno oblikovanje proizvoda s integracijom potpornog materijala kao sastavnog dijela proizvoda		
2	Upotreba rešetkaste strukture radi uštede na težini i smanjenju potrebe za potpornim materijalom		
3	Korištenje topološke optimizacije u svrhu postizanja biološke strukture		
4	Korištenje topološke optimizacije radi uštede na težini		

5	Integracija više dijelova u jednu komponentu kako bi se skratilo vrijeme proizvodnje, kompleksnost pojedinačnog dizajna i povećale performanse proizvoda		
6	Prilagodna proizvoda ergonomiji čovjeka / lakšeg prihvata		
7	Prijenos informacija geometrijom		

8	Oblikovanje površine proizvoda iz estetskih razloga		
9	Oblikovanje površine proizvoda zbog povećanja performansi i regulacije površinske hrapavosti		
			
10	Upotreba kanala koji pospješuju prijenos fluida i energije te konstrukciju proizvoda		
			

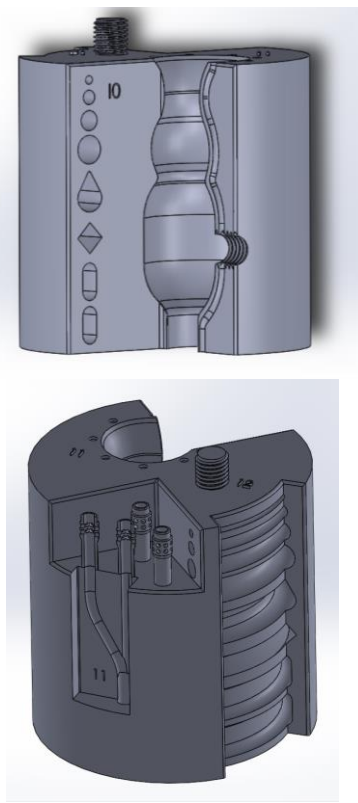
11	Upotreba kanala promjenjive putanje radi distribucije toka		
12	Prilagodna proizvoda standardnoj geometriji sučelja		
13	Prilagodba proizvoda kompleksnoj geometriji sučelja	 	 

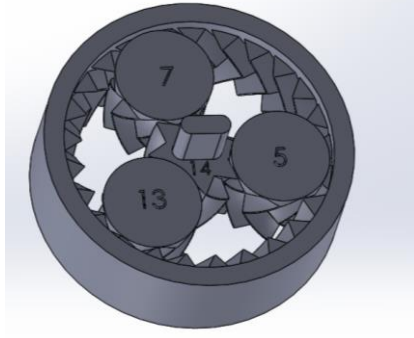
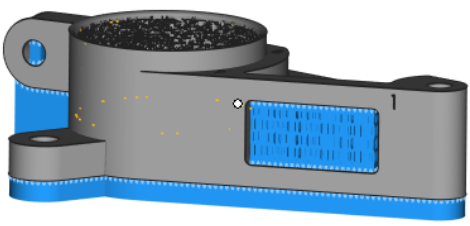
14	Izrada funkcionalnih mehanizama/proizvoda unutar jednog postupka		
15	Moguća prilagodba debljine sloja radi smanjenja toplinskog opterećenja	Navedeni princip ne može se prikazati CAD modelom, već se definira prije samog postupka proizvodnje u postavkama printanja, a ovisi o vrsti materijala i specifikacijama printera.	

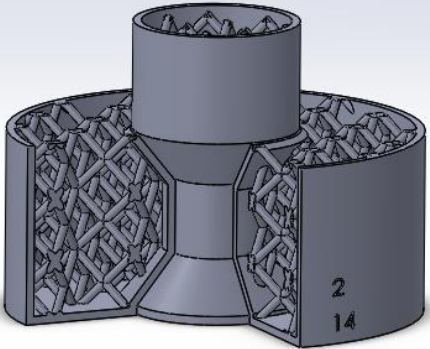
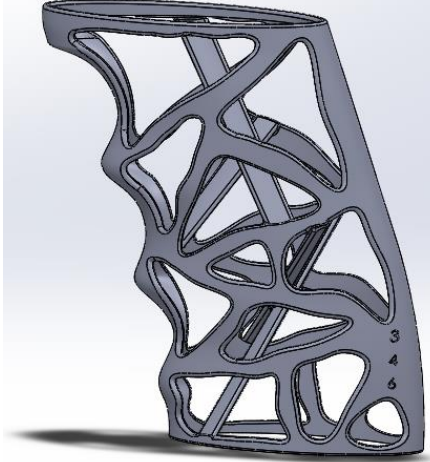
4.2. Integrirani modeli principa

Nakon vizualizacije principa, principi su grupirani po kompatibilnosti i raspoređeni na pet modela. Zbog tehničkih ograničenja (uštete na materijalu), na svakom modelu prikazano je više principa. Korištena je aluminijska legura oznake AlSi10Mg te argon kao inertni plin. Debljina sloja korištenog za izradu modela iznosi 30 μm , a debljina sloja potporne strukture iznosi 60 μm . Modeli su printani u suradnji s Metalskom jezgrom Čakovec na printeru EOS M 290. Na izrađenim modelima nalaze se brojevi koji označuju broj identificiranog principa. CAD modeli za DMLS proizvodni postupak prikazani su u tablici 12:

Tablica 12. Prikaz CAD modela za DMLS tehniku proizvodnje

BROJ	PRINCIPI	CAD MODEL
1	<ul style="list-style-type: none"> - Integracija više dijelova u jednu komponentu (5) - Upotreba kanala koji pospješuju prijenos fluida i energije te konstrukciju proizvoda (10) - Upotreba kanala promjenjive putanje radi distribucije toka (11) - Prilagodna proizvoda standardnoj geometriji sučelja (12) 	
<i>Komentar</i>	Na Modelu 1 prikazane su mogućnosti i oblici koji se mogu izraditi aditivnom proizvodnjom kako bi se postigao bolji prijenos fluida i energije. Također, na modelu su prikazani i standardni priključci.	

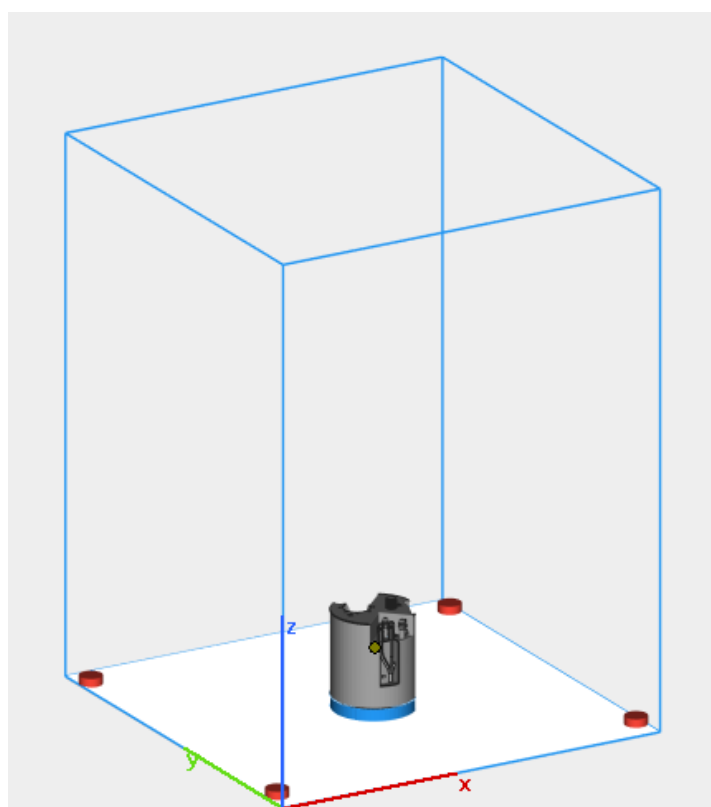
2	<ul style="list-style-type: none"> - Integracija više dijelova u jednu komponenata (5) - Prijenos informacija geometrijom (7) - Prilagodba proizvoda kompleksnoj geometriji sučelja (13) - Izrada funkcionalnih mehanizama/proizvoda unutar jednog postupka (14) 	
<i>Komentar</i>	<p>Na Modelu 2 jasno se vidi princip izrade funkcionalnog proizvoda unutar jednog postupka. Za izradu ovog modela nije potrebno naknadno spajanje, a zahvaljujući zračnosti između zupčanika, neće doći do sljepljivanja, već će njihova rotacija biti moguća. Prilikom procesa izrade, ovaj model će se printati u tri primjerka. Jedan primjerak će biti printan s postavkama kao i kod ostalih modela, dok će se kod druga dva modela primijeniti „Beam offset“. Tom tehnikom se zraka lasera odmakne od vanjskog ruba proizvoda te je time predmet manji za stotinku mm, a zračnost veća. Ovom metodom manja je vjerojatnost da će doći do sljepljivanja dijelova. Kod primjerka broj dva, beam offset je postavljen na 0,02 mm, a na trećem 0,03 mm.</p>	
3	<ul style="list-style-type: none"> - Konstrukcijsko oblikovanje proizvoda s integracijom potpornog materijala kao sastavnog dijela proizvoda (1) - Oblikovanje površine proizvoda iz estetskih razloga (8) - Oblikovanje površine proizvoda zbog povećanja performansi i regulacije površinske hrapavosti (9) 	
<i>Komentar</i>	<p>U Modelu 3, potporna struktura je sastavni dio proizvoda. Na taj način štedi se na materijalu, dok funkcionalnost ostaje ista. Od ostalih principa, na unutarnjoj površini je dodana hrapavost.</p>	

4	<ul style="list-style-type: none"> - Upotreba rešetkaste strukture radi uštede na težini i smanjenju potrebe za potpornim materijalom (2) - Izrada funkcionalnih mehanizama/proizvoda unutar jednog postupka (14) 	
Komentar	<p>Model 4 je pokretan te je na njemu prikazana i karakteristična ispunjena površina kod aditivne proizvodnje metala, rešetkasta struktura. Zračnost između prstena i središnjeg dijela modela iznosi 0,3 mm.</p>	
5	<ul style="list-style-type: none"> - Korištenje topološke optimizacije u svrhu postizanja biološke strukture (3) - Korištenje topološke optimizacije radi uštede na težini (4) - Prilagodna proizvoda ergonomiji čovjeka / lakšeg prihvata (6) 	
Komentar	<p>Model 5 je ergonomski oblikovan te su napravljeni oblici koji asociraju na topološku optimizaciju.</p>	

Svi modeli izrađeni su u skladu s prethodno definiranim smjernicama za oblikovanje i proizvodnim parametrima.

5. Izrada fizičkog modela

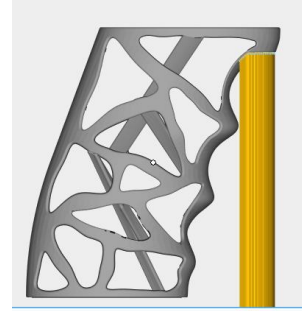
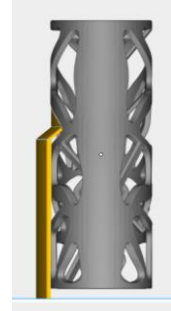
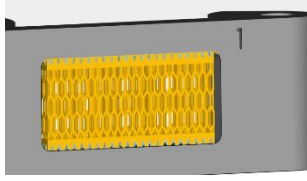
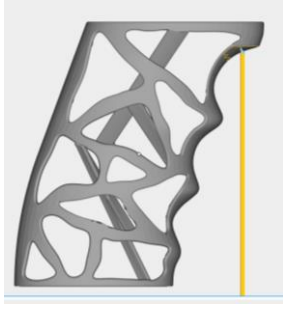
Prije same izrade fizičkog modela DMLS postupkom, modeli su prebačeni u *Materialise Magics 23.0* softver. U navedenom softveru provjerava se jesu li zatvorene sve površine te se postavljaju potporne strukture. Modeli su od radne plohe udaljeni 5 mm. Kod DMLS proizvodnog postupka, potporne strukture uvijek se nalaze i na donjoj plohi modela te se naknadno uklanjaju. Primjer modela na radnoj plohi prikazan je slikom 19. Plavom bojom označene su potporne strukture.



Slika 19. Model na radnoj plohi u softveru *Materialise 23.0*

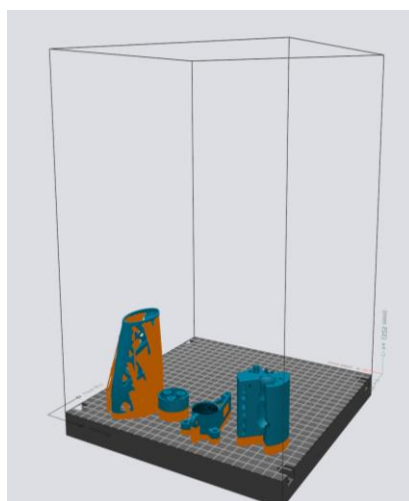
Neki su modeli, poput modela sa Slike 19, izrađeni tako da potporne strukture nisu potrebne, dok su kod nekih dodatne potporne strukture neizostavne. *Materialise Magics 23.0* nudi više modela potpornih struktura poput bloka, strukture pod kutem, s uzorkom dijamanta ili linije. U tablici 13 prikazani su modeli potpornih struktura. Žutom bojom označene su potporne strukture.

Tablica 13. Najčešći oblici potpornih struktura

Blok	Pod kutom	Oblik dijamanta	Linija
			

5.1. Priprema izrade

Nakon postavljanja i prilagodbe potpornih struktura, model se sprema i prebacuje u softver *EOSPRINT 2.8*. U softveru se model pozicionira na radnu plohu (Slika 20). Temeljem odabira materijala, određuje se broj slojeva i vrijeme potrebno za izradu modela. Također se provjerava količina materijala kojim se printa te inertnog plina. Nakon odabira željenog i provjere, model se pušta na printanje.

Slika 20. Modeli s potpornim strukturama u softveru *EOSPRINT 2.8*

Ukoliko se na radnu plohu stavlja više modela, potrebno je obratiti pozornost na udaljenost između dva modela i njihovu orijentaciju. Modeli se spremaju i šalju na print. Printaju se u jednom postupku.

5.2. Priprema za postupak printanja

Prije samog postupka printanja, potrebno je napraviti i određene pripreme na uređaju koje uključuju:

- prosijavanje praha i punjenje komore s prahom,
- ugrijavanje radne plohe na 35°C,
- niveliranje radne plohe u tri točke s točnom vrijednošću od stotinke,
- poravnavanje komore s prahom do ravnine radne plohe,
- postavljanje oštrice translatorsnog noža na radnu plohu (potrebno je da oštrica noža dodiruje plohu i da ništa ne „zapinje“ prilikom kretanja).

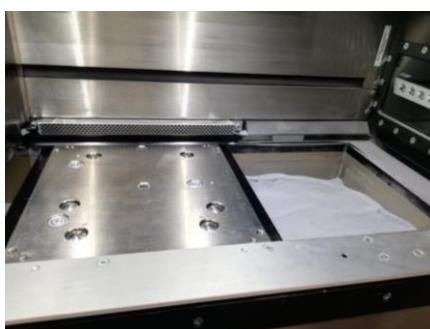
Na slici 21 prikazana je unutrašnjost komore za printanje, postupak punjenja komore prahom te niveliranje radne plohe.



Otvorena komora printera EOS M 290



Unutrašnjost otvorene komore printera EOS
M 290



Punjenje komore prahom



Niveliranje radne plohe

Slika 21. Priprema komore za printanje

Prilikom baratanja s prahom potrebno je nositi zaštitne naočale, masku te rukavice.

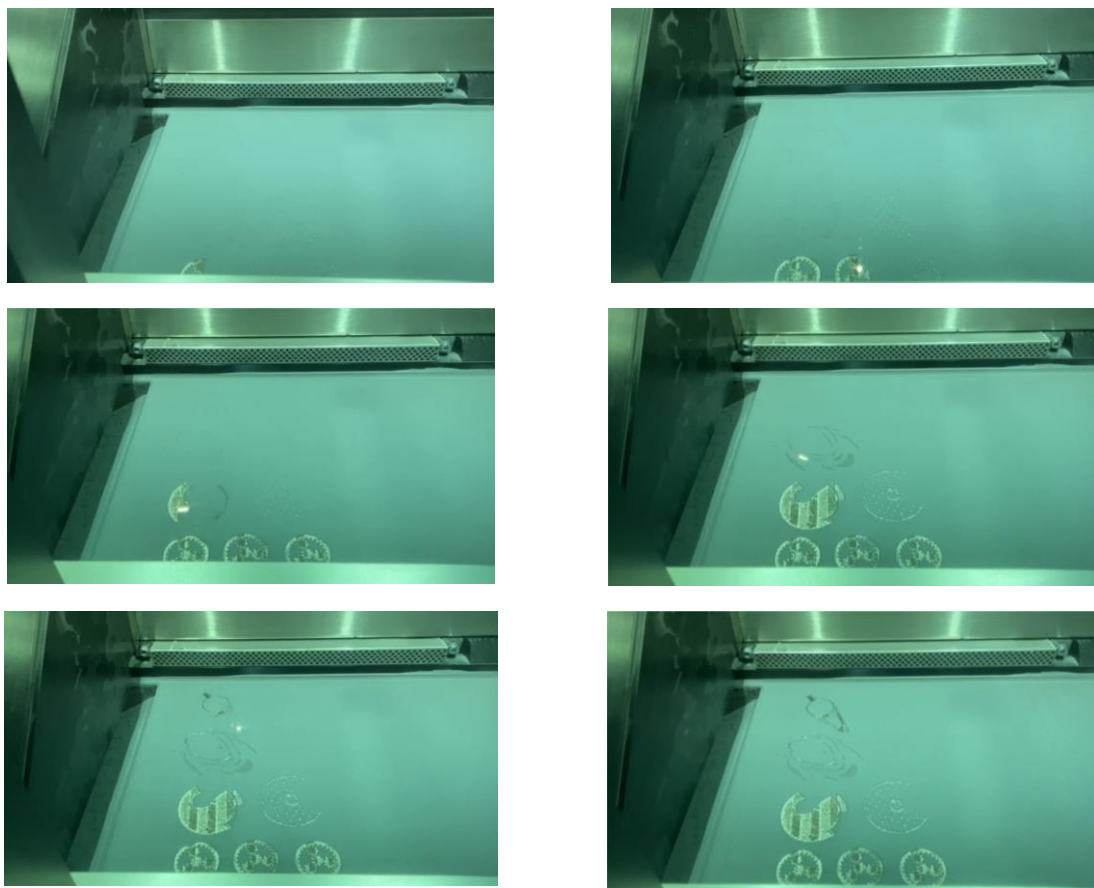
Nakon odrađene pripreme, zatvaraju se vratašca komore te se kreće s postupkom postavljanja atmosfere. Tek nakon što je atmosfera u komori postavljena, počinje se s postupkom printanja (Slika 22).



Slika 22. Početak printanja

5.3. Postupak izrade modela

Postupak izrade započinje printanjem donjih potpornih struktura. Nakon njih kreće se s izradom modela. U jednom procesu printa se više modela sloj po sloj (Slika 23). Nakon isprintanog jednog sloja, nanosi se novi sloj praha pomoću translatornog noža te se postupak ponavlja idućih 16 sati koliko traje izrada ovih modela.



Slika 23. Postupak izrade modela

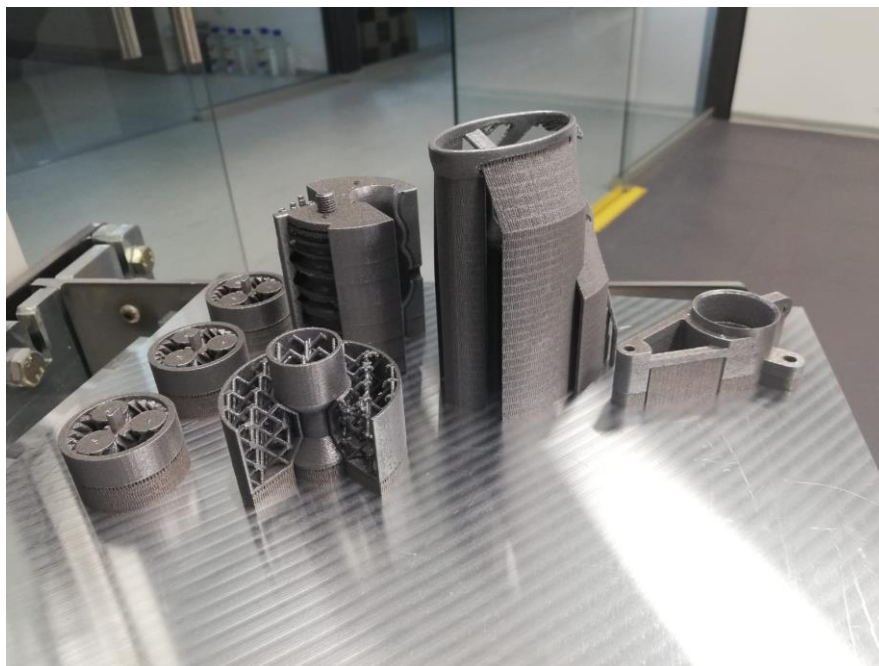
5.4. Završetak postupka izrade modela

Nakon 16h printanja, postupak izrade je završio. Kako je radna ploha bila ispunjena prahom, višak praha se uklonio (Slika 24) i prosijao.



Slika 24. Postupak uklanjanja viška praha s radne plohe

Prah koji se nije mogao ukloniti ručno, uklonio se usisavačem (Slika 25).



Slika 25. Uklonjen prah s radne plohe

Nakon uklanjanja viška praha, uklonile su se i potporne strukture. Potporne strukture uklanjale su se ručno te je bilo potrebno par sati rada. Ostaci potpornih struktura na modelima su se naknadno uklonili kliještima te ručnom brusilicom. Kako bi se očistila površina modela te kako bi dobili završni sjaj, modeli su se staklarili u uređaju FerroECOBlast (Slika 26).



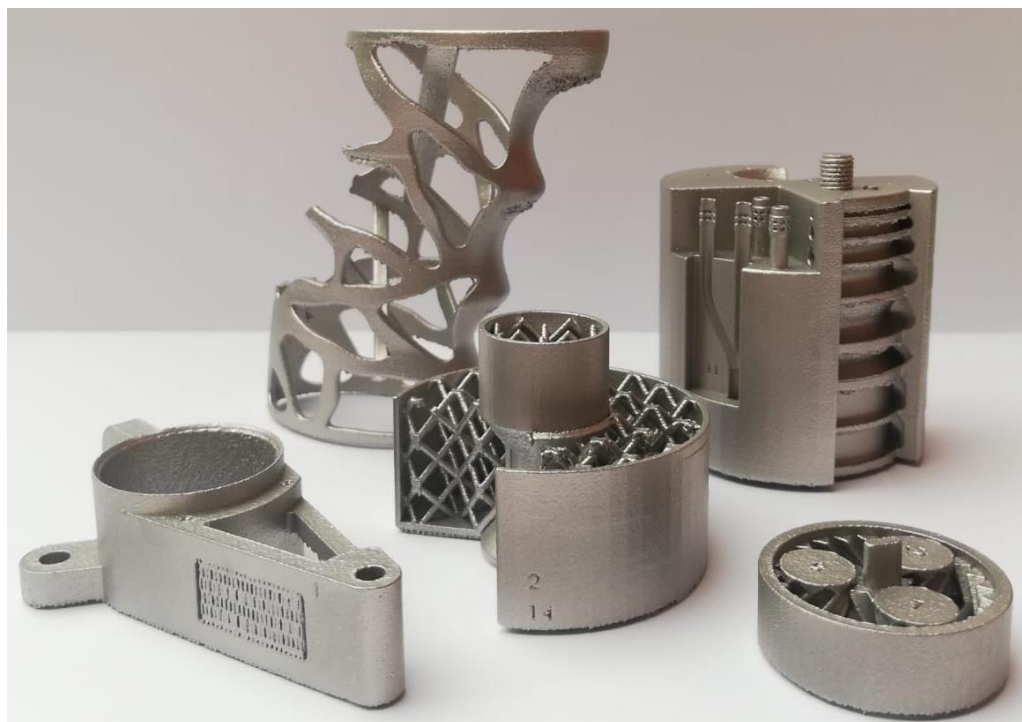
Slika 26. Uredaj za pjeskarenje FerroECOBlast

Staklarenje je proces sličan pjeskarenju, no umjesto pijeska koriste se sitne kuglice stakla, a služi za izgladivanje i čišćenje tvrdih površina čvrstim česticama velike brzine, uz pomoć komprimiranog zraka, čime se željena površina obrađuje do željenog stupnja čistoće. Staklarenje je izvrstan način čišćenja površina koje su izrađene od aluminijevih legura. Na slici 27 vidi se razlika između nestaklarenog i staklarenog modela.



Slika 27. Primjer nestaklarenog i staklarenog modela

Na slici 28 prikazani su modeli nakon staklarenja.



Slika 28. Konačan izgled modela

5.5. Opažanja na fizičkim modelima

Nakon staklarenja, modeli su još jednom detaljno pregledali te se provjerila njihova funkcionalnost. Kod „Modela 5“ je prilikom postupka izrade došlo do pogreške te se odvojila stražnja strana modela. Pretpostavlja se da je uzrok bio nepravilno odvođenje topline. Slično se dogodilo se i kod „Modela 4“. Dio rešetkaste strukture se odvojio prilikom postupka izrade, a dio prilikom uklanjanja od radne plohe. Kako bi se to u budućnosti izbjeglo, potrebno je staviti vertikalnu gredu kako bi cijela struktura bila čvršća. „Model 2“ printan je na tri načina, standardno kao i ostali modeli te beam offset-om. Modeli koji su printani beam offset-om rotiraju se kao što je i zamišljeno. Model s izrađen beam offsetom od 0,03 mm se rotira bez preskakanja među zupčanicima. „Model 4“ se rotira bez zapinjanja. Kako bi se utvrdili točni parametri i ograničenja, potrebno je učiniti još par eksperimentalnih printeva.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je identificirati i definirati konstrukcijske principe temeljene na mogućnostima i karakteristikama DMLS proizvodnog postupka jer se oblikovanje proizvoda temelji na drugačijim principima od tradicionalnih metoda proizvodnje.

Za svaki odabrani DMLS proizvod napravljena je funkcijska struktura. Iz analize odabranih proizvoda i njihovih konstrukcijskih struktura, proizašlo je ukupno 15 principa. Usporedi li se dobiveni broj principa s identificiranim heuristikama od Blosch–Paidosh [11] ili principima od Pereza [12], radi se o realnom broju. Navedeni autori identificirali su više heuristika (29) i principa (23), no njihovo istraživanje obuhvaćalo je više tehnologija aditivne proizvodnje.

Identificirani konstrukcijski principi za aditivnu proizvodnju metala prikazani su na CAD modelima, a kasnije i na fizičkim. Konstrukcijski principi olakšavaju i ubrzavaju postupak konstruiranja u ranoj fazi razvoja proizvoda. Prikaz principa na fizičkim modelima ubrzava taj postupak i kod aditivne proizvodnje metala te olakšava vizualizaciju. Također, modeli potiču kreativnost ili sugeriraju rješenje za dani problem.

Dodatnim zapažanjem, definirane su smjernice za oblikovanje i proizvodni parametri za aditivnu proizvodnju metala.

Utvrđeni principi uočeni su i na drugim proizvodima koji nisu analizirani u ovom radu. Za utvrđivanje točnijih ograničenja i parametara za aditivnu proizvodnju metala te kako bi se eliminiralo moguće odvajanje dijelova prilikom postupka izrade, potrebno je napraviti još par eksperimentalnih modela.

Proširenjem proizvoda i njihovom analizom, utvrdila bi se sličnost među značajkama i postupku izrade. No, radi verifikacije modela, poželjno je napraviti eksperimentalne modele i na drugim strojevima aditivne proizvodnje i drugim polaznim materijalom.

Kako bi se potvrdila primjenjivost principa i kako bi se utvrdio utjecaj CAD modela i fizičkih modela na konstruktora u ranoj fazi razvoja proizvoda, potrebno je provesti istraživanje gdje bi se na temelju danih modela pratila kreativnost konstruktora u rješavanju problema. Tako bi se ispitala njihova primjena u praksi i mogućnost implementacije u proizvod.

7. LITERATURA

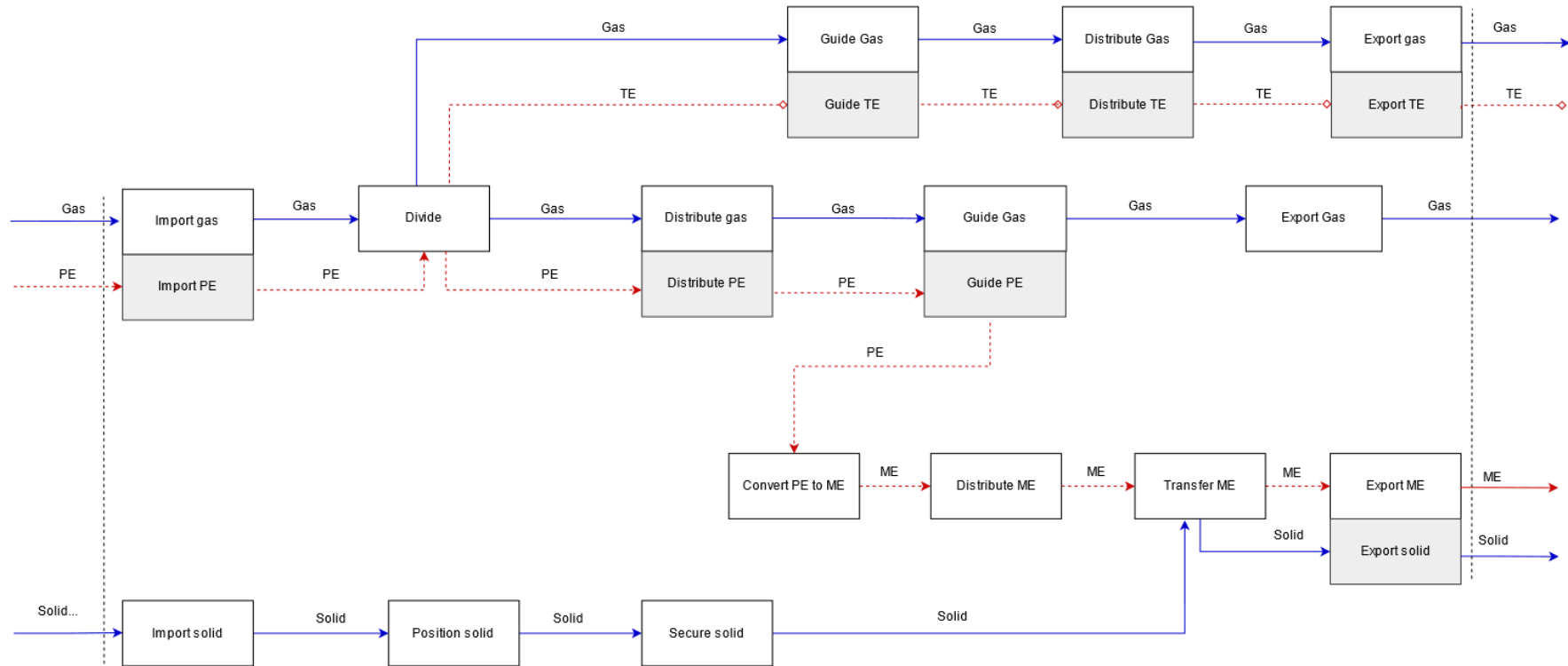
- [1] Gibson, I., Rosen, D., Stuetgen, B., Additive Manufacturing Technologies, Springer, 2015.
- [2] Šercer, M., Goder, D., Pilipović, A., Katalenić, M., Aditivna proizvodnja s polimerima, Zagreb: Centar za aditivne tehnologije, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2020.
- [3] Diegel, O., Nordin, A., Motte D., A practical guide to design for additive manufacturing, Springer, 2019.
- [4] »3D Hubs,« [Mrežno]. Available: <https://www.3dhubs.com/blog/3d-printing-consolidates-satellite-antenna-from-100-parts-to-1/>. [Pokušaj pristupa 5 9 2020].
- [5] »EOS GmbH,« [Mrežno]. Available: <https://www.eos.info/de>. [Pokušaj pristupa 1 9 2020].
- [6] »Introduction metal 3d printing,« [Mrežno]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/#what>. [Pokušaj pristupa 16 09 2020].
- [7] EOS, »EOS M20 Machine; Operating instructions«.
- [8] »Preparation Methods Of Metal Powder,« [Mrežno]. Available: <https://www.refractorymetal.org/industry-info-preparation-methods-of-metal-powder/>. [Pokušaj pristupa 11 11 2020].
- [9] Fu, K.K., Yang, M.C. and Wood, K.L. , "Design Principles: The Foundation of Design", Volume 7: 27th International Conference on Design Theory and Methodology, ASME, Boston, Massachusetts, USA, p. V007T06A034., 2-5 August 2015. [Mrežno].
- [10] Valjak, F., Bojčetić, N., »Conception of Design Principles for Additive Manufacturing. Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design,« pp. 689-698, 2019.
- [11] Blosch-Paidosh, A., Shea, K., »Design Heuristics for Additive Manufacturing, Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (IDETC/CIE) Vol 5: Design for x, Design to X,« *The Design Society*, pp. 91-10, 21-25 August 2017.
- [12] Perez, K.B., Anderson, D.S. and Wood, K.L., »Crowdsourced Design Principles for Leveraging the Capabilities of Additive Manufacturing, 20th International Conference on Engineering Design (ICED,« *The Design Society*, pp. 1-10, 27-30 July 2015.
- [13] Ullman, D., G., »The Mechanical Design Process, McGraw-Hill Education, Boston,« 2010. [Mrežno]. Available: <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [14] Hirtz, J., Stone, R.B., McAdams, D.A., Szykman, S. and Wood, K.L., »A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts, Research in Engineering Design, Vol. 13 No. 2,« pp. 65-82, 2002.
- [15] Sridharan, P., Campbell, M., I., »A study on the grammatical construction of function structures,« *AIE EDAM*, pp. 19, str. 139-160 doi:10.1017/S0890060405050110, 07 October 2005.
- [16] Bohm, M.R., Nagel, R., L., »Formalizing flow relationship in data archival and reuse for product design,« u *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011* , August 28-31, 2011, Washington, DC, USA, 2011.

- [17] Paisosh, A. B., Shea, K., »Design Heuristics for Additive Manufacturing,« ETH Zürich, Engineering Design and Computing.
- [18] Goldschmidt, G. and Sever, A.L. , »Goldschmidt, G. and Sever, A.L. (2011), “Inspiring design ideas with texts”, Design Studies, Vol. 32 No. 2,« <http://doi.org/10.1016/j.destud.2010.09.006> , pp. str. 139-155, 2011.
- [19] Neeley, W.L., Lim, K., Zhu, A., Yang, M.C., »“Building Fast to Think Faster: Exploiting Rapid Prototyping to Accelerate Ideation During Early Stage Design”,« Volume 5: 25th International Conference on Design Theory and Methodology; ASME 2013 Power Transmission and Gearing Conference, Portland, Oregon, USA, August 4–7, 2013, ASME, Portland, USA, ASME, Portland, USA, p. V005T06A022, 4-7 August 2013. [Mrežno]. Available: <http://doi.org/10.1115/DETC2013-12635> .
- [20] »GE Aditive,« [Mrežno]. Available: <https://www.ge.com/additive/de/who-we-are/concept-laser>. [Pokušaj pristupa 2 11 2020].
- [21] »3D printing lattices,« [Mrežno]. Available: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-software/lattice-generation-tools/>. [Pokušaj pristupa 9 15 2020].
- [22] »3D-Printed Rocket Engines & The Future of Spaceflight,« [Mrežno]. Available: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/19189/3D-Printed-Rocket-Engines-The-Future-of-Spaceflight.aspx>. [Pokušaj pristupa 12 12 2020].
- [23] »How to Design and Manufacture Metal 3D-Printed Parts,« [Mrežno]. Available: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/how-to-design-and-manufacture-metal-3d-printed-parts/>. [Pokušaj pristupa 11 11 2020].
- [24] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K., H., Engineering Design, A Systematic Approach, London: Springer, 2007.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Funkcijske strukture
- III. Fizički modeli konstrukcijskih principa

1. LOPATICA TURBINE

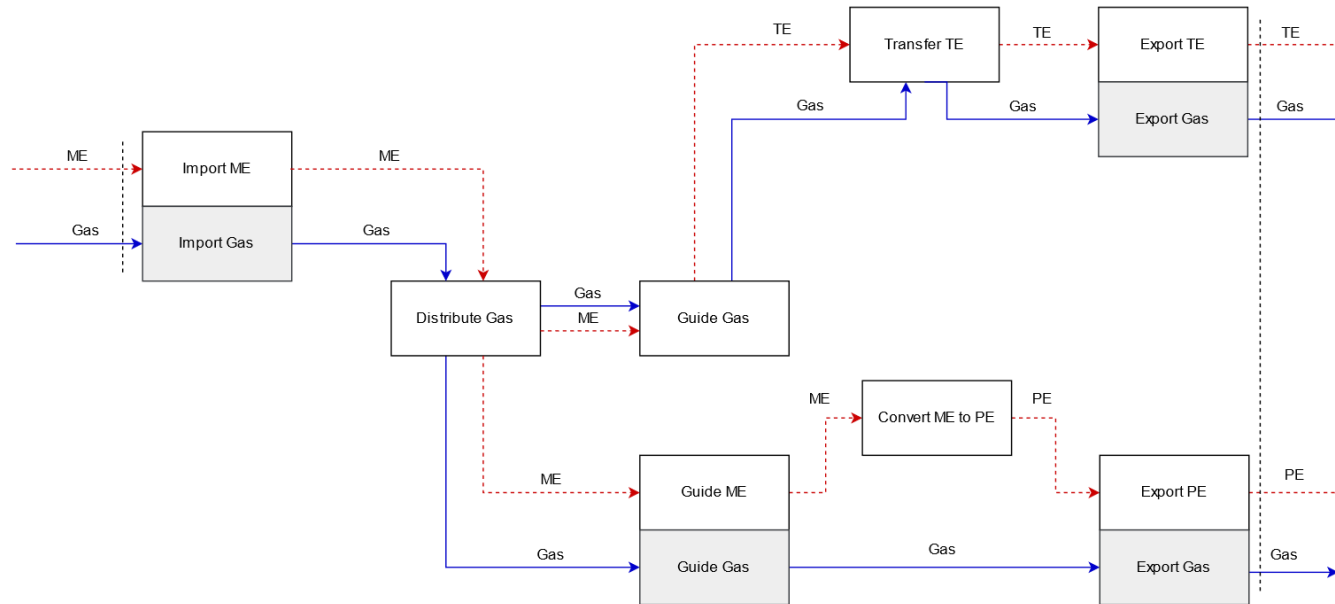


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

2. SONDA ZA MJERENJE BRZINE I TEMPERATURE U TURBO MOTORIMA

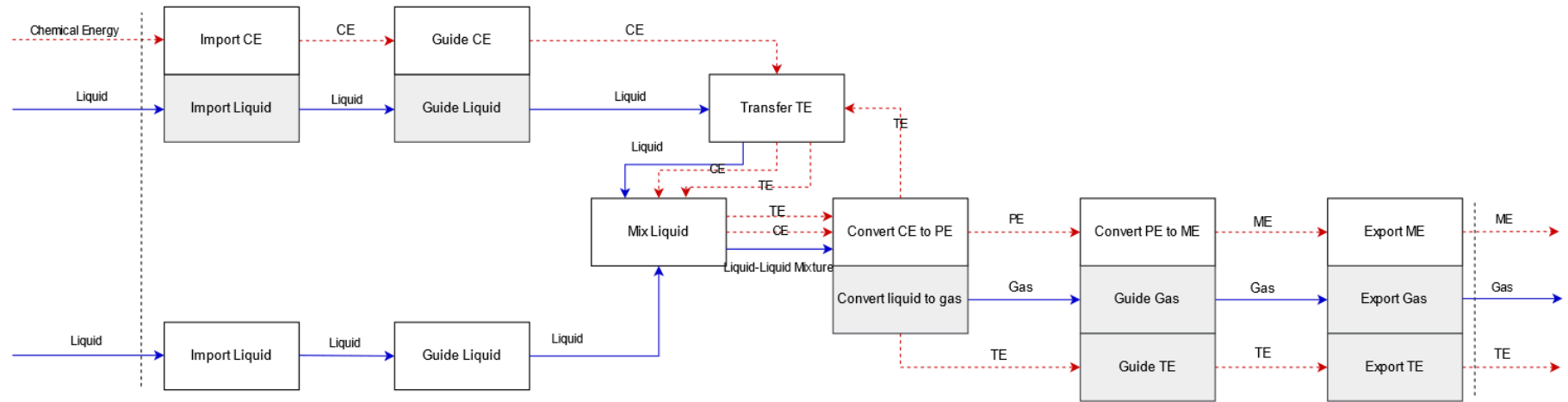


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

3. RAKETNI MOTOR

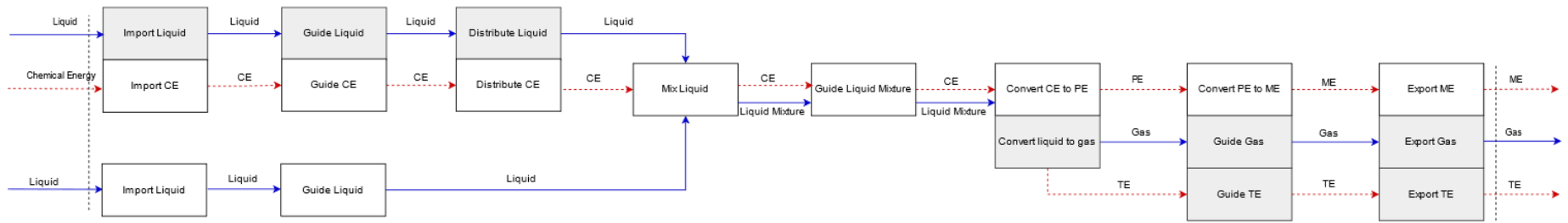


Legend:

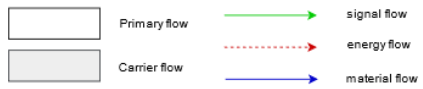


Viewer does not support full SVG 1.1

4. UBRIZGAVAJUĆA GLAVA RAKETNOG MOTORA

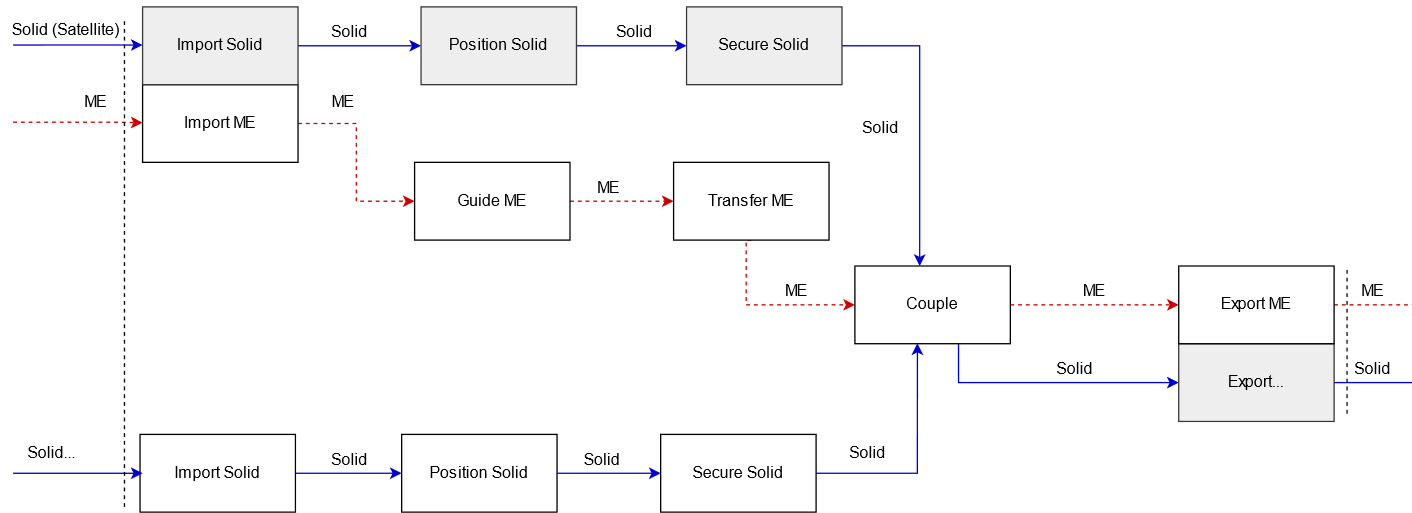


Legend:

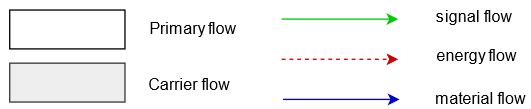


Viewer does not support full SVG 1.1

5. DRŽAČ SATELITA

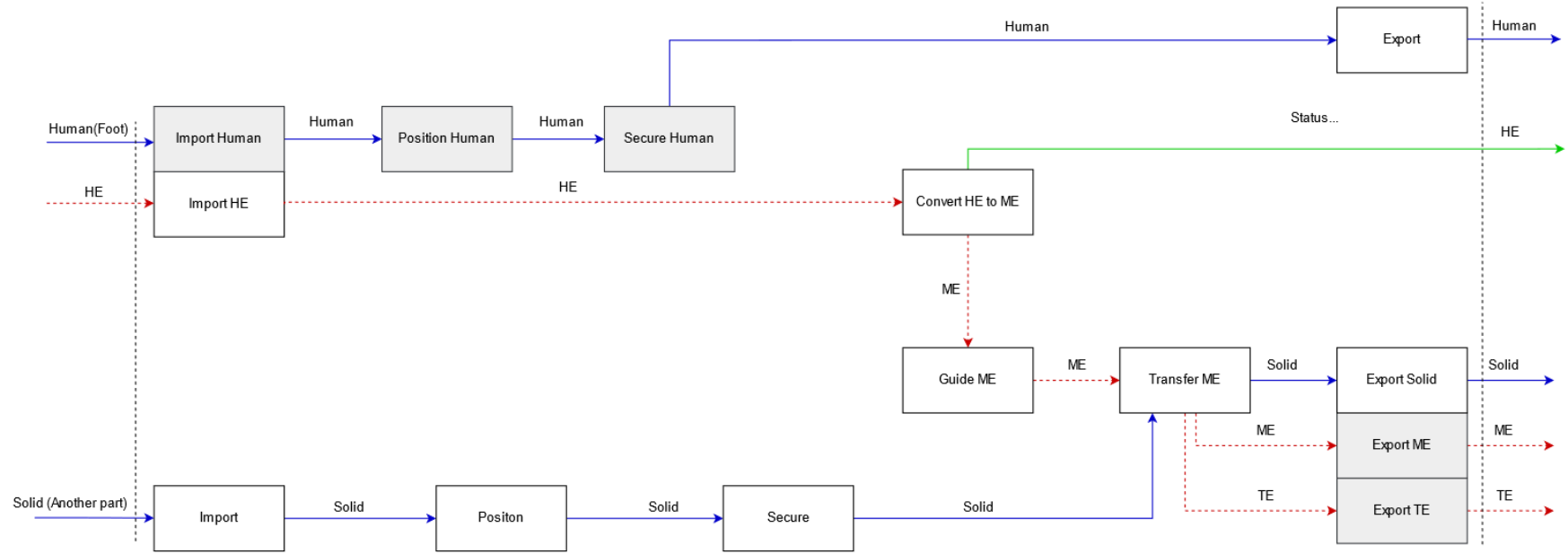


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

6. PEDALA

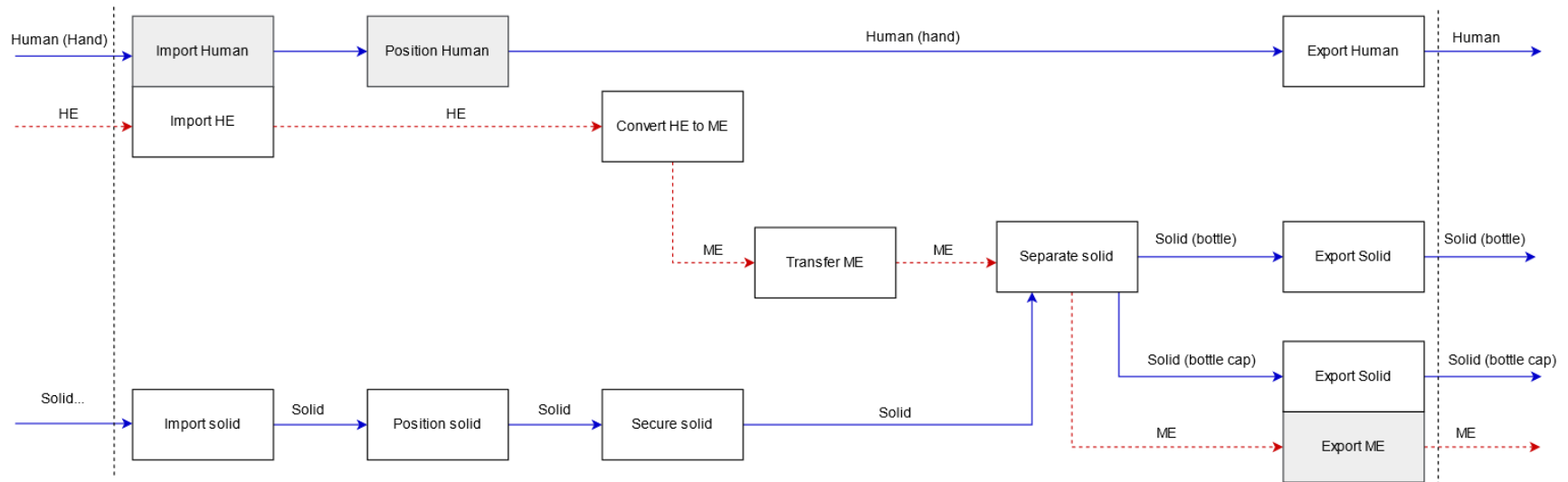


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

7. OTVARAČ BOCA

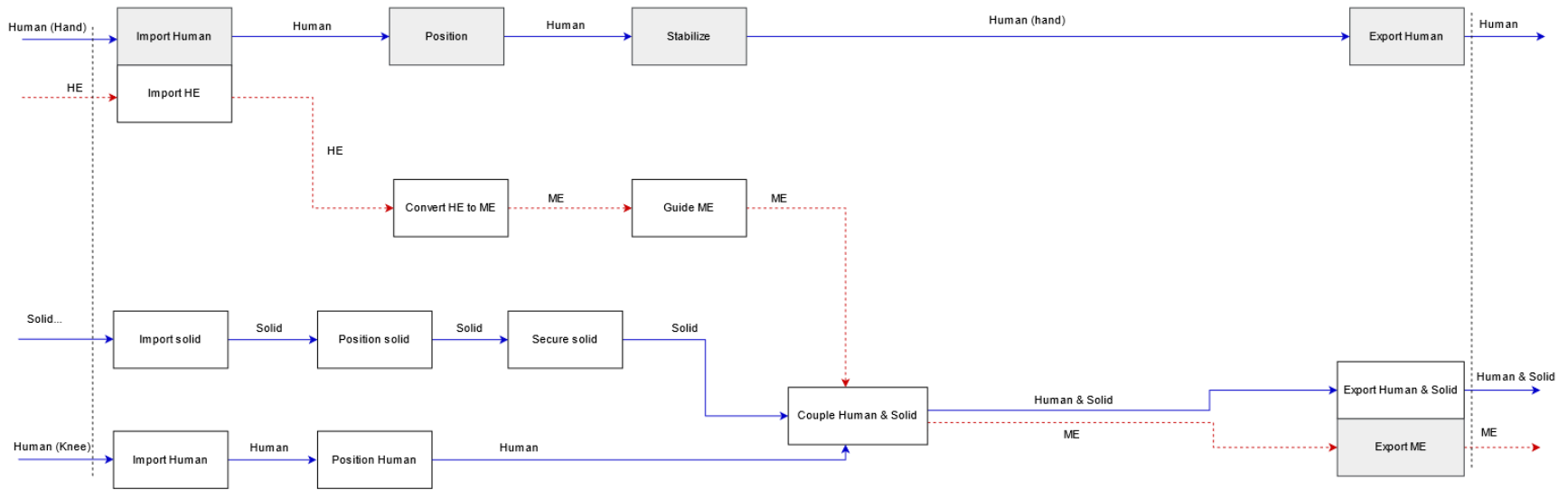


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

8. KIRURŠKI ALAT

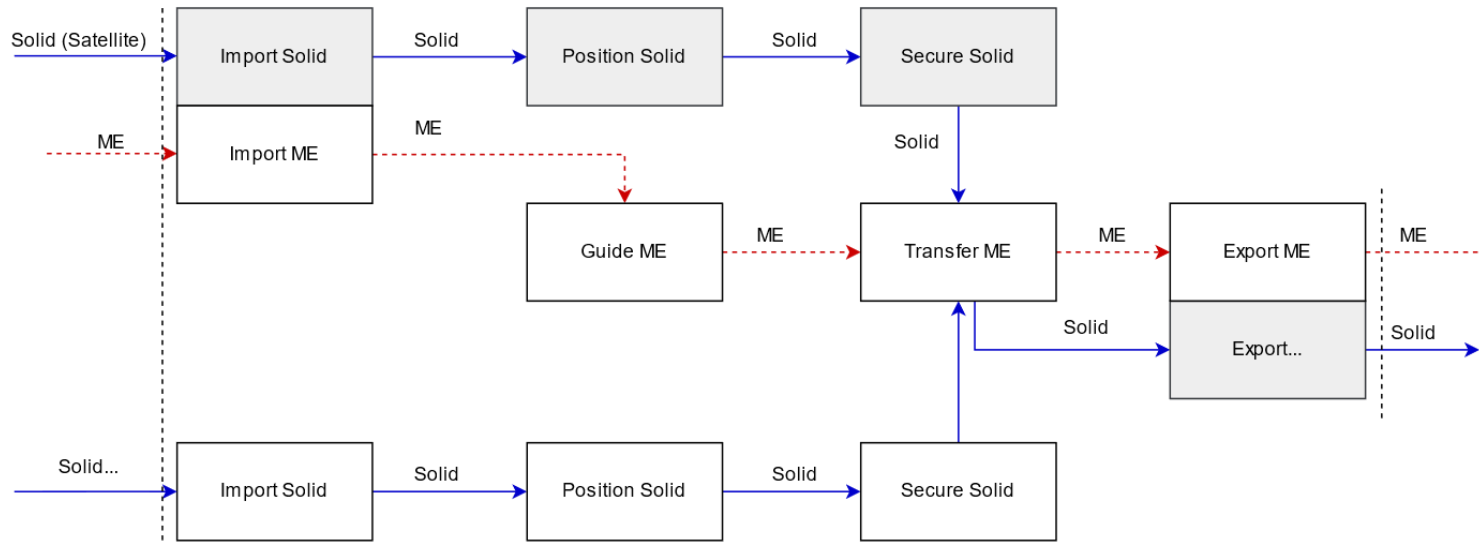


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

9. UMECI ZA PRIJENOS VISOKOG MEHANIČKOG OPTEREĆENJA

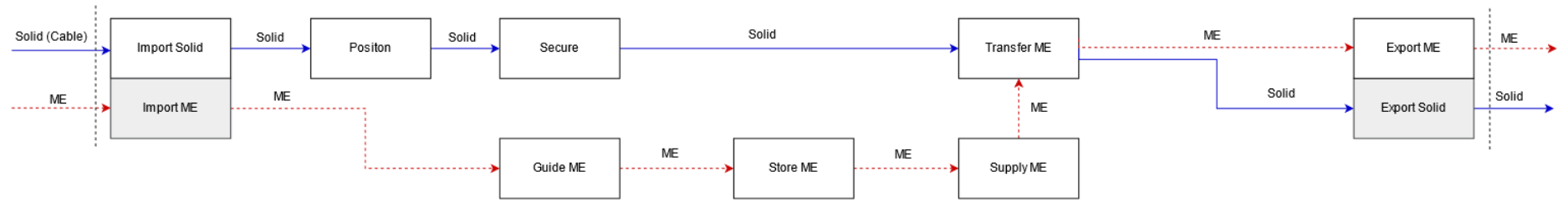


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

10.DIO SLOŽENOG LUKA

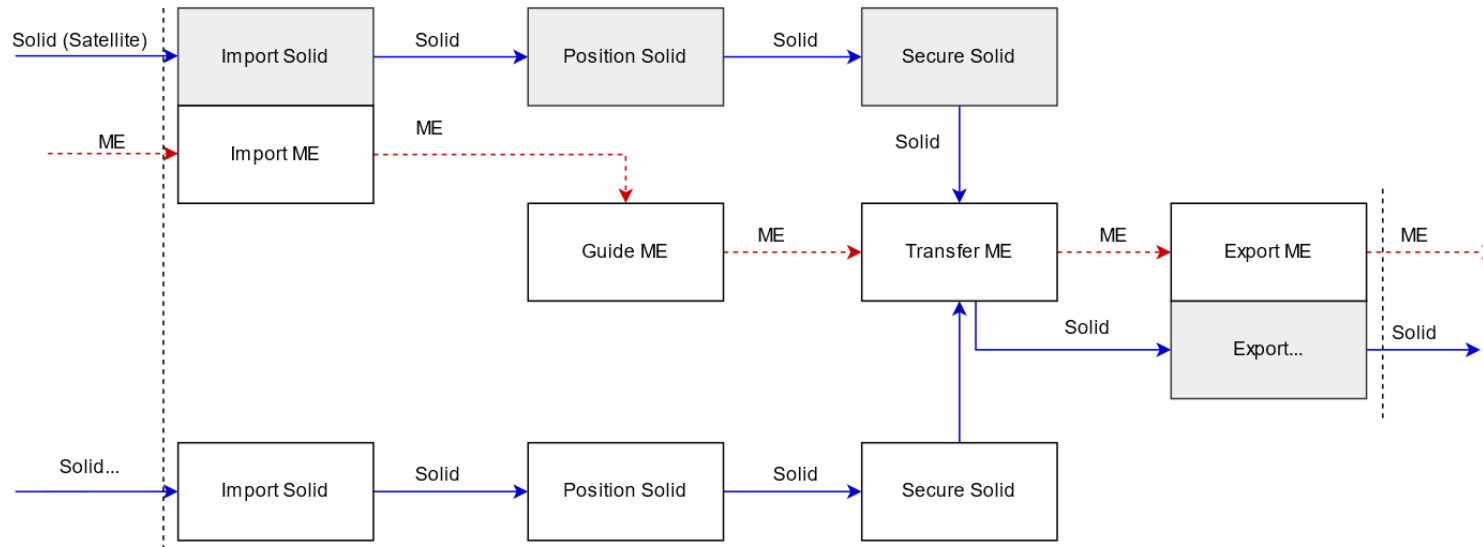


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

11.NOSAČ

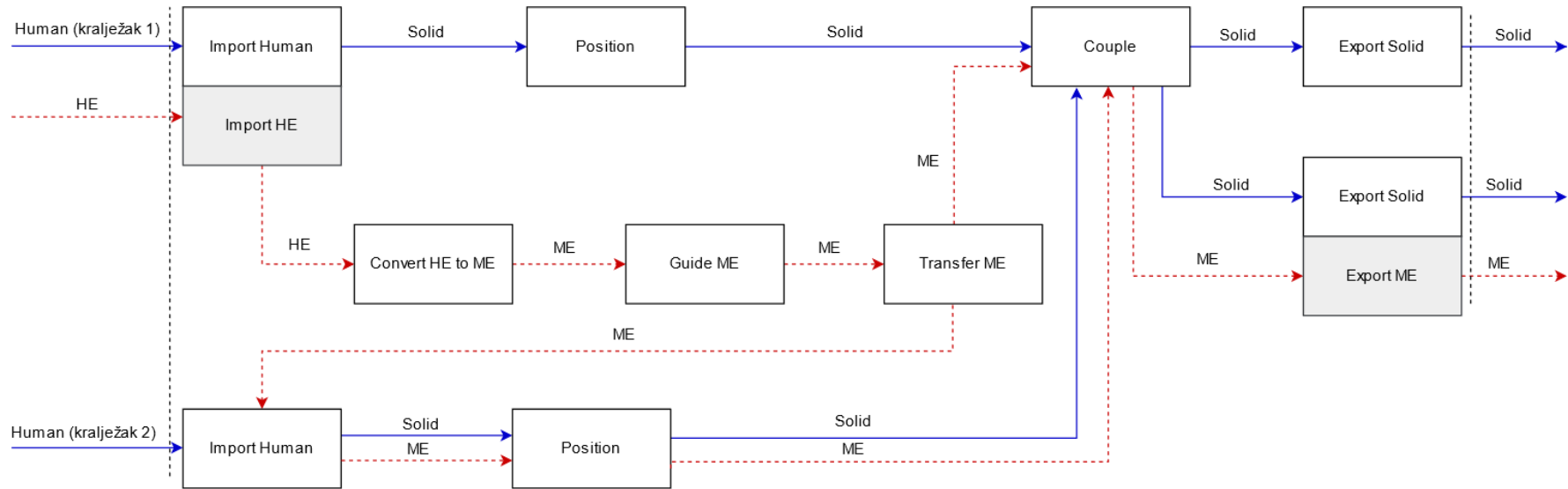


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

12.IMPLANTAT KAO ZAMJENA ZA INTERVERTEBRALNI DISK

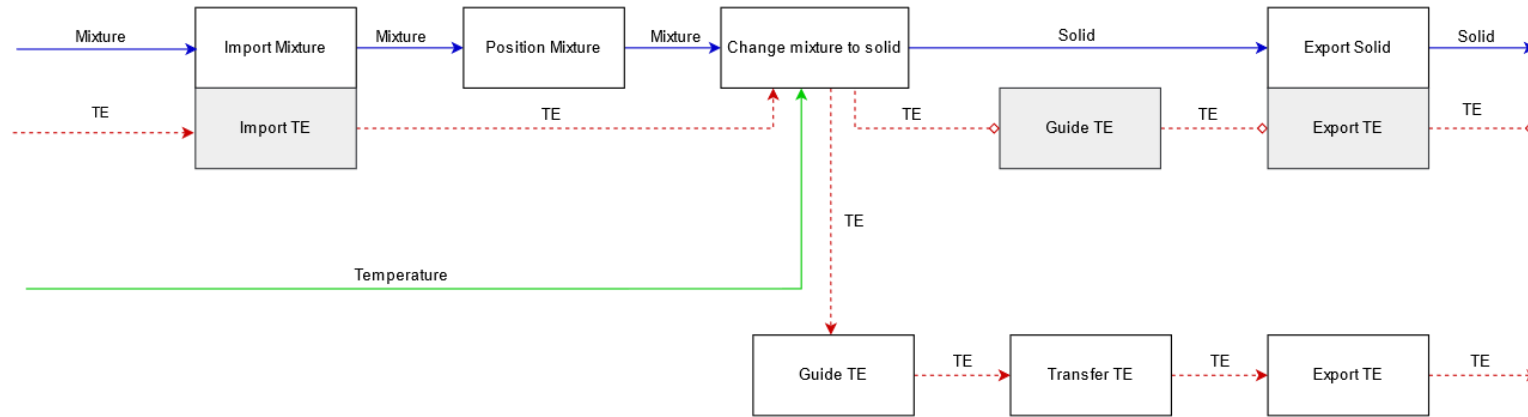


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

13.KALUP ZA GUME

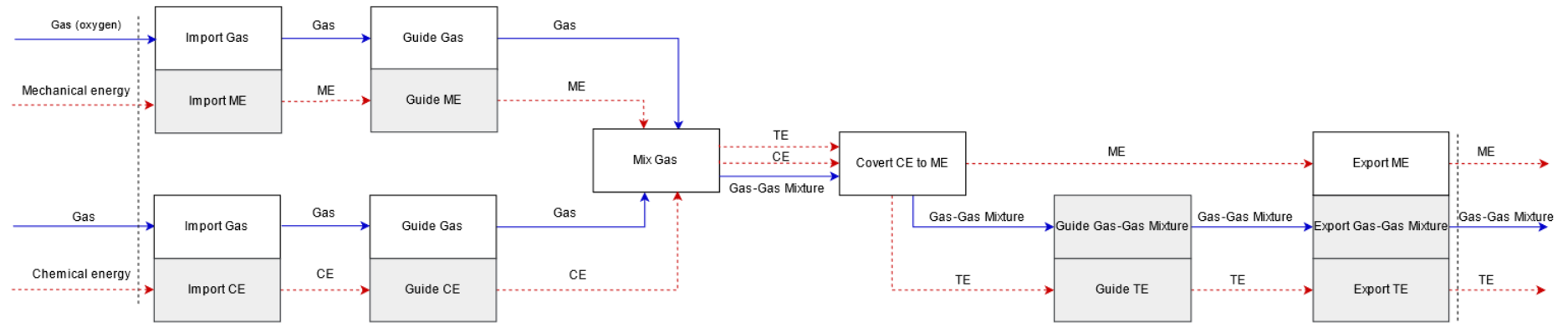


Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1

14.PLAMENIK



Legend:



Viewer does not support full SVG 1.1