

Razvoj konstrukcijskih principa temeljenih na mogućnostima FDM proizvodnog procesa

Jenkač, Mateja

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:103415>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mateja Jenkač

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Mateja Jenkač

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Nenadu Bojčetiću i asistentu Filipu Valjku, mag.ing.mech. na stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Mateja Jenkač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa	
Ur. broj	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Mateja Jenkač

Mat. br.: 0035268183

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Razvoj konstrukcijskih principa temeljenih na mogućnostima FDM
proizvodnog procesa

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Development of design principles based on FDM manufacturing
process

Opis zadatka:

FDM (eng. Fused Deposition Modelling) je tehnologija aditivne proizvodnje temeljena na dodavanju materijala ekstrudiranjem polimernog žice, sloj po sloj, kako bi se izradio željeni proizvod. Budući da je priroda FDM tehnologije drugačija od proizvodnih postupaka temeljenih na oduzimanju i deformiranju materijala, oblikovanje proizvoda se temelji na drugačijim konstrukcijskim principima. Stoga je potrebno analizom funkcija postojećih proizvoda izrađenih FDM tehnologijom identificirati i definirati konstrukcijske principe temeljene na mogućnostima i karakteristikama FDM proizvodnog procesa.

U radu je potrebno:

- definirati skup proizvoda, izrađenih FDM tehnologijom, potrebnih za provođenje analize.
- izraditi funkcijske strukture proizvoda iz definiranog skupa, te povezati funkcije s tehničkim rješenjima korištenim za rješavanje pojedine funkcije ili skupa funkcija.
- analizom funkcijskih struktura i povezanih tehničkih rješenja identificirati konstrukcijske principe temeljene na FDM tehnologiji.
- definirati i opisati svaki identificirani konstrukcijski princip.
- izraditi računalne 3D modele koji prikazuju definirane konstrukcijske principe.

Opseg skupa proizvoda, analize funkcijskih struktura te opisa definiranih principa dogovoriti tijekom izrade rada.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. - 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS TABLICA	III
SAŽETAK	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	3
2.1. Opis aditivne proizvodnje	3
2.2. Postupak aditivne proizvodnje	5
2.3. Taložno očvršćivanje (FDM)	7
2.4. DfAM	9
3. POSTUPAK IDENTIFIKACIJE KONSTRUKCIJSKIH PRINCIPA	11
3.1. Definiranje grupe proizvoda.....	11
3.2. Izrada funkcijskih struktura proizvoda.....	14
3.3. Identifikacija konstrukcijskih principa.....	17
4. KONSTRUKCIJSKI PRINCIPI.....	21
5. ZAKLJUČAK.....	23
LITERATURA	24
PRILOZI	26

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz FDM principa	8
Slika 2.	Metodni dijagram.....	11
Slika 3.	Funkcijska struktura uređaja za otkoštavanje višanja.....	16
Slika 4.	Označavanje značajka proizvoda.....	17
Slika 5.	Baza značajka	18
Slika 6.	Grupiranje značajka	18
Slika 7.	Primjer kartice principa	21
Slika 8.	3D model	22

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne karakteristike proizvodnih tehnologija [8].....	4
Tablica 2. Popis analiziranih proizvoda.....	12
Tablica 3. Detaljniji primjer grupiranja značajka	19

SAŽETAK

U ovom radu opisana je aditivna proizvodnja općenito, s naglaskom na FDM (eng. *Fused Deposition Modeling*) tehnologiju proizvodnje, te važnost DfAM-a (eng. *Design for Additive Manufacturing*) u ranim fazama razvoja proizvoda kod proizvodnje aditivnim tehnologijama koje su temeljene na drugačijim principima od tradicionalnih metoda proizvodnje. Analizom postojećih proizvoda identificirano je 15 principa temeljenih na mogućnostima i karakteristikama FDM tehnologije proizvodnje. Opisan je postupak provedbe analize koja se sastoji od definiranja skupa postojećih proizvoda, izrade funkcijskih struktura te označavanja postojećih rješenja funkcija na postojećim proizvodima, odnosno definiranja značajki FDM tehnologije proizvodnje. Analiziranjem i usporedbom uočenih značajki, identificirani su konstrukcijski principi koji su prezentirani u obliku kartica i 3D modela.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, konstruiranje proizvoda, razvoj proizvoda, konceptualna faza razvoja, konstrukcijski principi

SUMMARY

This paper describes additive manufacturing in general, with an emphasis on FDM manufacturing technology, and the importance of DfAM (Design for Additive Manufacturing) in the early stages of product development with additive technologies based on principles other than traditional manufacturing methods. By analyzing existing products, 15 principles are identified based on the capabilities and characteristics of Fused Deposition Modeling (FDM) production technology. Principle identification procedure is described. Analysis consists of defining a set of existing products, designing a functional structure and marking and defining a solution of functions on existing products and defining a feature of FDM production technology. By analyzing and comparing the observed features, the design principles are identified and presented in the form of cards and 3D models.

Key words: additive manufacturing, product design, product development, conceptual design, design principles

1. UVOD

Aditivna proizvodnja je novi oblik proizvodnje koji se temelji na izradi proizvoda dodavanjem materijala što je u suprotnosti sa tradicionalnom proizvodnjom koju karakterizira proizvodnja oduzimanjem materijala. Ovakav način proizvodnje pruža nove mogućnosti, ne samo u proizvodnji, nego i u oblikovanju proizvoda. [1]

Razvoj aditivnih postupaka proizvodnje javlja se u drugoj polovici 80-tih godina 20.st., a u samom početku razvoja tehnologija se koristila za brzu izradu prototipova (e. *Rapid Prototyping – RP*) u svrhu vizualizacije i prezentacije proizvoda u konceptualnoj fazi proizvodnje. Nadalje, zbog mogućnosti postizanja visoke točnosti, aditivna proizvodnja se počela koristiti za izradu alata i kalupa i njihovih ključnih elemenata. [2]

Kako je aditivna proizvodnja relativno nova proizvodna tehnologija, danas još uvijek postoji značajni nedostatak iskustva i znanja o mogućnostima koje aditivna proizvodnja pruža, ali jasno je da ovakav način proizvodnje otvara nove mogućnosti kad je riječ o inovativnom dizajnu i poboljšanju performansi proizvoda značajkama koje je nemoguće ostvariti tradicionalnim tehnologijama. Visoki stupanj geometrijske slobode jedna je od najvažnijih značajki aditivne proizvodnje koja ju stavlja u prednost naspram drugih tehnologija. Nadalje, može se ostvariti brza i ekonomična prilagodba dijelova jer za aditivnu proizvodnju ne trebaju specifični alati. [3] Unatoč još uvijek nedovoljnoj razvijenosti, prepoznati su potencijali aditivne proizvodnje te se u budućnosti može očekivati njena sve veća zastupljenost u raznim industrijama.

DfAM (e. *Design for Additive Manufacturing*) metode su također još uvijek u razvoju te ne postoji mnogo metoda koje bi pomogle konstruktoru da već u ranoj fazi razvoja, koja je od velike važnosti za cjelokupni razvoj proizvoda, primijeni prednosti i značajke aditivne proizvodnje. [4] U području konstrukcijskih znanosti postoji nekoliko formalnih načina na koje znanja mogu biti predstavljena konstruktoru. Znanje može biti preneseno u obliku vodilja, heuristika, principa, pravila i strateških nacrti. [5]

Cilj ovog završnog rada je na temelju skupa proizvoda proizvedenih aditivnom tehnologijom prepoznati i prezentirati konstrukcijske principe po kriteriju prihvatljivosti za aditivnu proizvodnju, na način da mogu konstruktoru poslužiti kao vodilja u procesu razvoja proizvoda s naglaskom na konceptualnu fazu. Konstrukcijski principi predstavljaju rješenja

koja su klasificirana prema tome koje funkcije rješavaju. Principi su bazirani na empirijskim dokazima i mogu pomoći konstruktoru da pronade efikasno rješenje funkcije. [6] Konceptualizacija je definirana kao „proces kreiranja nečega što je otprije nepoznato ili neviđeno, odnosno, kreiranje novog proizvoda". [7]

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

2.1. Opis aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja (AM) obuhvaća niz tehnologija koje omogućuju izradu fizičkog modela proizvoda dodavanjem materijala sloj po sloj sve do završetka procesa gdje je svaki sloj izveden na temelju virtualnog 3D modela. [8]

Materijali koji se koriste u aditivnoj proizvodnji, ovisno o tehnologiji, mogu biti u krutom, tekućem i praškastom stanju. Najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali, kao akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamidi (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretan (PUR), epoksidne smole, ali i kompozitni materijali, keramika, čelik, aluminij, titanij i druge lake slitine. [8]

Prema primijenjenoj tehnologiji postupci aditivne proizvodnje dijele se na [8]:

- Vat photopolymerization
- Material extrusion
- Material jetting
- Binder jetting
- Powder bed fusion
- Direct energy deposition
- Sheet lamination

Svaka od navedenih tehnologija ima i komercijalnu podjelu, a međusobno se razlikuju prema stanju sirovine, materijalima koje procesuiraju te izvoru energije koju koriste za formiranje i povezivanje materijala. U Tablici 1. prikazana je podjela tehnologija i navedene razlike.

Tablica 1. Osnovne karakteristike proizvodnih tehnologija [8]

	FORMA SIROVOG MATERIJALA	KOMERCIJALNI NAZIV	MATERIJAL	IZVOR ENERGIJE ZA FORMIRANJE I KREIRANJE MATERIJALA
Vat photopolymerization	smola	SLA Stereolithography	plastika	ultraljubičasto svjetlo, zračenje, vidljiva svjetlost, elektronska zraka
		DLP Digital Light Processing	plastika	
		CDLP Continuous DigitalLight Processing	plastika	
Material extrusion	žica	FDM Fused Deposition Modeling	kompoziti	toplinska energija
			plastika	
Material jetting	smola	MJ Material Jetting	plastika	UV zračenje topline
		NPJ NanoParticle Jetting	metali	
		DOD Drop On Demand	vosak	
Binder jetting	prah, smola	BJ Binder Jetting	gips, pijesak	Toplinska energija
			metal	
Powder bed fusion	atomizirani prah	MJF Multi Jet Fusion	plastika	laserska zraka, elektronska zraka
		SLS Selective Laser Sintering	plastika	
		DMLS/SLM Direct Metal Laser Sintering Selective Laser Melting	metal	
		EBM	metal	

		Electron Beam Melting		
Direct energy deposition	prah, žica	LENS Laser Engineering Net Shape	metal	laserska zraka, elektronska zraka
		EBAM Electron Beam Additive Manufacturing	metal	
Sheet lamination	listovi, filmovi	LOM Laminated Object Manufacturing	kompozit	mehanički rezač, laserski snop, ultrazvuk, ljepilo i termičko ograničenje
			papir	

Kako su u ovom radu u svrhu identificiranja konstrukcijskih principa analizirani predmeti izrađeni metodom taložnog očvršćivanja (FDM), spomenuta metoda detaljnije je objašnjena u odlomku 2.3.

2.2. Postupak aditivne proizvodnje

Generalno se postupak aditivne proizvodnje može podijeliti na osam koraka [8]:

1. Izrada CAD modela

Prvi i osnovni korak (bez kojeg aditivna proizvodnja ne bi postojala), je generiranje 3D modela u nekom od 3D CAD softwera, digitaliziranjem postojećeg prostornog objekta skeniranjem ili nekom od kombinacija.

2. Konverzija CAD modela u STL datoteku

Definirani 3D model konvertira se u STL format koji se može koristiti u gotovo svakom uređaj za aditivnu proizvodnju. STL radi tako da uklanja sve konstrukcijske podatke, uključujući i povijest modeliranja, te aproksimira površinu modela sa serijama trokutastih elementa. Također, STL format ne sadrži informacije o mjernim jedinicama, boji, materijalu ili korištenim značajkama, te je u osnovi STL sadrži

samo opis površine. Iako je STL glavni format, za otklanjanje navedenih nedostataka koriste se i drugi formati, npr. AMF format.

3. Prijenos STL formata u uređaj za aditivnu proizvodnju i manipulacija STL-om

Nakon što je STL format kreiran može se direktno poslati na uređaj za aditivnu proizvodnju. AM softveri imaju opciju vizualizacije gdje korisnik može vizualno vidjeti model i upravljati njime, odnosno, mijenjati orijentaciju i poziciju proizvoda koji će biti izrađivan. Također, moguće je postaviti da se istovremeno izrađuje više proizvoda.

4. Upravljanje postavkama uređaj za aditivnu proizvodnju

U ovom koraku potrebno je odrediti potrebne parametre na uređaju za izradu proizvoda. Iako se postavni parametri razlikuju od uređaja do uređaja, neki od osnovnih parametara su: protok materijala, vrsta materijala, temperatura brizgalice, brzina izrade, debljina slojeva i sl. Korak 3) i korak 4) djelomično su povezani kada je riječ o postavkama vezanih za debljinu ekstrudiranog materijala, za boju i vrstu materijala izrađivanog proizvoda te postavkama o ispuni, odnosno gustoći, unutrašnjosti izrađivanog proizvoda.

5. Izrada proizvoda

Izrada predmeta je automatizirani proces, ali ponekad je potreban povremeni nadzor operatera nad uređajem kako bi se uočile eventualne greške tijekom izrade ili uočilo eventualno pomanjkanje materijala za izradu. Ako je potrebno, proces izrade se u svakom trenutku može zaustaviti .

6. Uklanjanje i čišćenje proizvoda

Kad proces izrade završi, potrebno je ukloniti predmet. Ako je predmet dovoljno ohlađen, može se ukloniti s postolja te mu se može ukloniti eventualni višak materijala, potporni materijal, ljepilo i sl. Kad se uređaj ohladi potrebno je očistiti i uređaj.

7. Naknadna obrada proizvoda

Pojedini proizvodi zahtijevaju naknadnu obradu kao što je abrazivna dorada, poliranje ili obrada brusnim papirom. Ovisno o korištenom materijalu, moguće su kemijske ili toplinske obrade, npr., metalni proizvodi mogu se kaliti kako bi se učvrstila vanjska površina.

8. Korištenje gotovog proizvoda

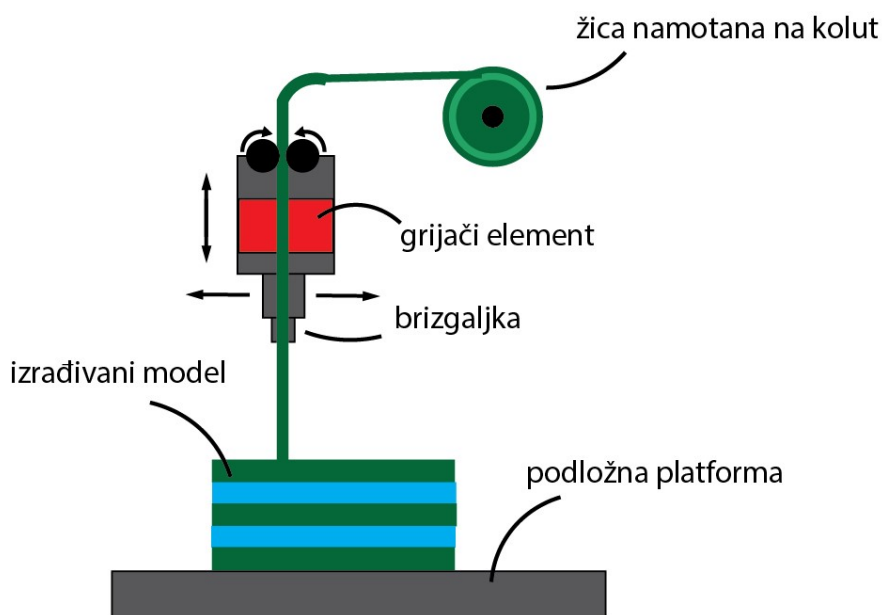
Ako su svi prethodni koraci bili uspješni i na izrađenom proizvodu nema uočenih grešaka, proizvod je spreman za korištenje.

Koraci aditivne proizvodnje, ovisno o primijenjenoj tehnologiji, mogu se međusobno u nekim fazama razlikovati, a u nekim tehnologijama (ovisno o samom dizajnu proizvoda) neki koraci mogu i izostati (npr. naknadna obrada). Također, u nekim slučajevima može se pojaviti potreba za dodatnim koracima.

2.3. Taložno očvršćivanje (FDM)

FDM (eng. *Fused Deposition Modeling*) je tehnologija proizvodnje kod koje se zagrijana polimerna žica ekstrudira kroz brizgaljku te nanosi sloj po sloj kako bi se izradio željeni proizvod. [8] Od svih aditivnih tehnologija, FDM tehnologija je trenutno najrasprostranjenija zbog jednostavnosti korištenja i zbog lake dostupnosti uređaja. Na tržištu postoji velik izbor uređaja za FDM proizvodnju, od jeftinijih i jednostavnijih uređaja, koji su namijenjeni za svakodnevnu uporabu hobi korisnika, pa sve do profesionalnih uređaja namijenjenih industrijskoj proizvodnji.

Na Slici 1. prikazan je shematski prikaz FDM postupka izrade. Materijal koji se koristi za izradu je u obliku žice koja se nalazi namotana na kolut. Žica se pomiče pomoću zupčanika te tako ulazi u brizgaljku u kojoj se zagrijava i tali pomoću grijača. Materijal mora biti u dovoljno omekšanom obliku kako bi pomoću stvorenog tlaka mogao biti ekstrudiran i kako bi se mogao nanositi. Također, kako bi materijal bio nanošen s konstantnom presjekom, stvoreni tlak mora biti konstantan kao i brzina gibanja brizgaljke.



Slika 1. Shematski prikaz FDM principa

Brizgaljka određuje oblik i veličinu ekstrudiranog materijala. Veći promjer brizgaljke će dati nižu preciznost nego manja brizgaljka u usporedbi s izvornim CAD modelom. Iako će tanji promjer ekstrudiranog materijala dati veću preciznost po z osi, to znatno usporava vrijeme izrade što je jedan od značajnijih nedostataka ove metode. Također, veličina brizgaljke definira i najmanju veličinu značajke koja može biti izrađena. Brizgaljka se može izmijeniti, pa time i promjer ekstrudiranog materijala, što utječe na preciznost i vrijeme izrade, ali se tijekom jednog ciklusa proizvodnje u većini slučajeva može koristiti samo jedna brizgaljka.

Ekstrudirani materijal mora se prihvatiti za prethodno ekstrudirani sloj, a prvi sloj mora se prihvatiti za podlogu. Na sposobnost spajanja slojeva materijala najviše utječe temperatura na koju je materijal zagrijan, a određuje se na samom uređaju za proizvodnju. Temperatura materijala mora biti dovoljno visoka da održava materijal u tekućem stanju u brizgaljci, ali ne previsoka da ne bi imala negativni utjecaj na materijal jer neki polimeri brzo poprimaju negativan utjecaj na visokim temperaturama.

U svakom sloju prvo se izrađuju vanjske konture proizvoda, a potom se ispunjava unutrašnjost. Vanjski slojevi se izrađuju znatno sporije od unutrašnjih kako bi se postigla veća preciznost. Važno je napomenuti da se može kontrolirati stupanj ispunjenosti unutrašnjosti

proizvoda. Unutrašnji slojevi izrađuju se u obliku rešetaka većom brzinom pa se tako štedi materijal i ubrzava proces izrade. Između vanjskih i unutarnjih slojeva na smije doći do preklapanja ili do prevelikih razmaka jer to negativno utječe na funkcionalnost i estetski izgled proizvoda.

Za omogućavanje izrade proizvoda u nekim slučajevima je potrebno primijeniti potporne strukture. Ako uređaj za ispis ima samo jednu ekstruzijsku brizgaljku, potporni materijal mora biti od istog materijala kao i model. U tom slučaju, ponekad je teško nakon izrade ukloniti potporni materijal, pa je zato za potporni materijal bolje upotrijebiti materijal različiti od osnovnog, odnosno sa različitim svojstvima. Za ovakav način izgradnje potporne strukture potrebne su dvije ekstruzijske brizgaljke.

Za razliku od tradicionalnih tehnologija temeljenih na oduzimanju ili deformiranju materijala, FDM tehnologija je temeljena na dodavanju materijala te se stoga izrada proizvoda FDM uređajima temelji na drugačijim konstrukcijskim principima.

2.4. DfAM

Dizajn za aditivnu proizvodnju (DfAM) je skup konstrukcijskih kriterija koji su fokusirani na specifičnosti i na ograničenja aditivne proizvodnje, a kroz skup metoda i alata usmjeravaju konstruktore i podržavaju proces cjelokupnog razvoja proizvoda s novim mogućnostima koje pruža aditivna proizvodnja, kao što su nove funkcije, oblici i kompozicija materijala. [9]

Mogućnosti i karakteristike aditivne proizvodnje mogu se prezentirati na više načina. Tako npr. heuristike prikazuju mogućnosti aditivne proizvodnje na visokoj razini apstrakcije i služe za stimuliranje kreativnosti konstruktora kod kreiranja koncepata, dok principi usmjeravaju na pronalazak odgovarajućih konstrukcijskih rješenja. Osnovna razlika između heuristika i principa je u tome što su heuristike bazirane na intuiciji i tzv. „prešutnom znanju“, a principi su bazirani na empirijskim dokazima. Iako heuristike mogu poslužiti kao vodilja, ne garantiraju pronalazak odgovarajućeg rješenja. Principi su određeniji i na manjoj razini apstrakcije od heuristika te u većoj mjeri mogu poslužiti za pronalazak rješenja funkcije. [5]

Danas postoje mnogi DfAM pristupi koji pokrivaju različite faze razvoja proizvod. Kako aditivna proizvodnja pruža mogućnost izrade proizvoda s novim oblicima i funkcijama, posebnu pažnju primjeni aditivne proizvodnje potrebno je primijeniti u konceptualnoj fazi. Na žalost, nema mnogo dostupnih metoda koje se odnose na najranije faze razvoja, već je većina metoda usmjerena na kasnije faze razvoja, oblikovanje i detaljiranje. [10]

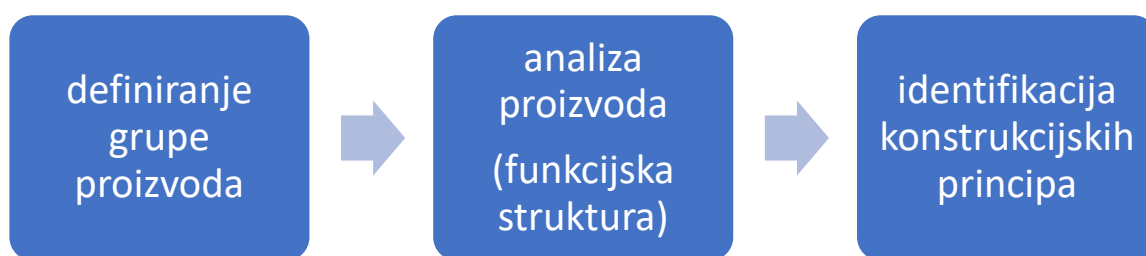
Postoje mnoge značajke koje razlikuju aditivnu tehnologiju od tradicionalnih proizvodnih tehnologija te je dovode u prednost naspram drugih tehnologija, a vezane su uz samu konceptualizaciju proizvoda. Primjer nekih od jedinstvenih mogućnosti ove tehnologije su: kompleksnost oblika, hijerarhijska kompleksnost, kompleksnost materijala te funkcionalna kompleksnost. [8] Navedene značajke omogućuju individualnu prilagodbu proizvoda, multifunkcionalnost te omogućuju ekonomski isplativu maloserijsku proizvodnju koja s tradicionalnim metodama rijetko moguća.

Prednosti i ograničenja aditivne proizvodnje često ovise o tehnologiji izrade proizvoda i samom uređaju kojim će se izrađivati proizvod. Iz tog razloga može biti korisno prije same izrade ispitati mogućnosti proizvoda, tzv. *benchmarking*. Ako se rezultati analize primjene na samo oblikovanje proizvoda, i ako se slijede određena pravila vezana uz samu orijentaciju izrađenog proizvoda i sl., može se poboljšati uspješnost izrade i kvaliteta izrađenog proizvoda.

3. POSTUPAK IDENTIFIKACIJE KONSTRUKCIJSKIH PRINCIPA

Prvi korak u definiranju principa aditivne tehnologije je odabir metodologije koja će se primjenjivati. U praksi postoji nekoliko načina analiziranja kojima se određuju principi. To može biti iz analize postojećih proizvoda, korištenjem već postojećih principa iz literature, definiranjem principa koji su proizašli iz vlastitog ili iskustva iskusnih konstruktora, principi primjenjivani u konstrukcijskoj ili laboratorijskoj praksi ili su principi uočeni analiziranjem konstrukcijske prakse. [5] [11]

Kako se u analizi heuristika u radu Blösch-Paidosh i Sheae [4] metoda analiziranja postojećih proizvoda pokazala učinkovitom, ista metoda prikupljanja primijenjena je i u ovom radu. Grafički slijed postupaka prikazan je na Slici 2. Prvi korak je prikupljanje postojećih proizvoda, zatim slijedi analiza prikupljenih proizvoda u kojoj se traže ključne funkcije, značajke i oblici. Te se na kraju, s obzirom na funkcije koje izvršavaju, izvode principi koji su opisani tekstualno, skicom i u obliku 3D modela. [11]



Slika 2. Metodni dijagram

3.1. Definiranje grupe proizvoda

Analizirani proizvodi prikupljeni su na stranici <https://www.thingiverse.com/> na kojoj razni korisnici objavljuju svoje radove, odnosno modele, koji drugi korisnici mogu preuzeti, izmijeniti i poboljšati. U obzir su uzeti proizvodi koji su izrađeni FDM tehnologijom i koji se često pojavljuju, odnosno kod kojih za jednu grupu proizvoda postoji više varijanti proizvoda koji istu funkciju rješavaju na različite načine. Smjernica, ali ne i uvjet, kod biranja proizvoda bila je da to budu proizvodi sa značajkama specifičnim za aditivnu tehnologiju proizvodnje, odnosno proizvodi koje bi bilo teško ili nemoguće proizvesti standardnim tehnologijama.

Ukupno je analizirano 26 proizvoda iz 9 različnih grupa. Svi analizirani predmeti su predmeti iz kategorije kućanskih pomagala jer su to najzastupljeniji proizvodi na spomenutoj stranici pa je lako pronaći različite izvedbe jedne grupe proizvoda. Također, ti proizvodi imaju jasnu funkciju što je bitno kod analize. Sve grupe proizvoda, nazivi proizvoda, autori i poveznica na stranicu s proizvodom prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Popis analiziranih proizvoda

GRUPA PROIZVODA	NAZIV	AUTOR	POVEZNICA
ISTISKIVAČ ZUBNE PASTE	ChatterComa Simple Toothpaste Squeezer	ChatterComa Simple	https://www.thingiverse.com/thing:867811
	Toothpaste Tube Squeeze	ottenjr	https://www.thingiverse.com/thing:1147252
	Toothpaste roller	Deviator2x	https://www.thingiverse.com/thing:1261318
	EeZee SqueeZee	mussy	https://www.thingiverse.com/thing:3656107
UREĐAJ ZA ODVAJANJE ŽUMANJKA	Egg Separator (Kitchen)	mussy	https://www.thingiverse.com/thing:2756265
	Egg Separator	muzz64	https://www.thingiverse.com/thing:3115183
	Egg Separator	3DP_PARK	https://www.thingiverse.com/thing:2877325
UREĐAJ ZA UKLANJANJE LJUSKE ORAHA	Aerospace Nut Cracker	Gyrobot	https://www.thingiverse.com/thing:159451
	Nut and walnut	3d-dragar	https://www.thingiverse.com/thing:3205609

	cracker (My grandma design)		
	Nutcracker	konstrux	https://www.thingiverse.com/thing:3468331
	Crab/Nut Cracker remixed	Kimlg	https://www.thingiverse.com/make:674259
UREĐAJ ZA OTKOŠTAVANJE VIŠANJA	Cherry pitter with a spring mechanism	SKaranko	https://www.thingiverse.com/thing:2483190
	Better printable Cherry Pitter	Pogoner	https://www.thingiverse.com/thing:2937320
	Denoyauteur Cerise „Ma Cherry“	Snipou	https://www.thingiverse.com/thing:2924006
ČAŠA ZA MJERENJE	bakercube	iomaa	https://www.thingiverse.com/thing:2676324
	Customizable Measuring Cup/Scoop	wstein	https://www.thingiverse.com/thing:619626
MJERAČ VIJKA	Screw Gauge	Chattel	https://www.thingiverse.com/thing:4075176
	FT-5 Screw Gauge (helpful assembly tool)	pwkalahar	https://www.thingiverse.com/thing:1902483
	Metric Screw Gauge/Ruler	micwilli77	https://www.thingiverse.com/thing:3131240
STEZALJKA	spring clamp with teeth	s_p_e_x	https://www.thingiverse.com/thing:2988949
	ChipClip	mistertech	https://www.thingiverse.com/thing:3005988

	Ben Heck's Chip Clip	benheck	https://www.thingiverse.com/thing:416583
LOKOTNI MEHANIZAM	minimal mini lock with working mechanism and key	RaffoSan	https://www.thingiverse.com/thing:2811491
	Fully Printable Padlock	ttsalo	https://www.thingiverse.com/thing:27205
MOMENTNI KLJUČ	Crescent Wrench Pair	O3D	https://www.thingiverse.com/thing:1727884
	Kanger Subtank mini wrench	jmhtau	https://www.thingiverse.com/thing:1474801

3.2. Izrada funkcijskih struktura proizvoda

U inženjerstvu svaki proizvod ima svoju namjenu, odnosno funkciju, koju mora ispuniti. Funkcijska struktura predstavlja apstraktni, ali razumljiv prikaz cjelokupne funkcije proizvoda koji ne sugerira tehničko rješenje. Funkcijska struktura važan je segment inženjerskih aktivnosti kao što su dekompozicija problema proizvoda, modeliranje i oblikovanje proizvoda, izrada koncepata i organiziranje djelatnosti unutar tima. Za ostvarivanje primarnog cilja funkcijske strukture, razumijevanje funkcije proizvoda, i za postizanje smislenih rezultata u navedenim aktivnostima, kod izrade funkcijskih struktura korisno je koristiti formalnu standardnu terminologiju naziva funkcija i tokova. [12]

Bez obzira na metodologiju izrade funkcijske strukture, svaka metodologija započinje definiranjem cjelokupne funkcije proizvoda. Zatim se cjelokupna funkcija proizvoda dijeli na podfunkcije koje su međusobno povezane tokom materijala, energije i signala. [13]

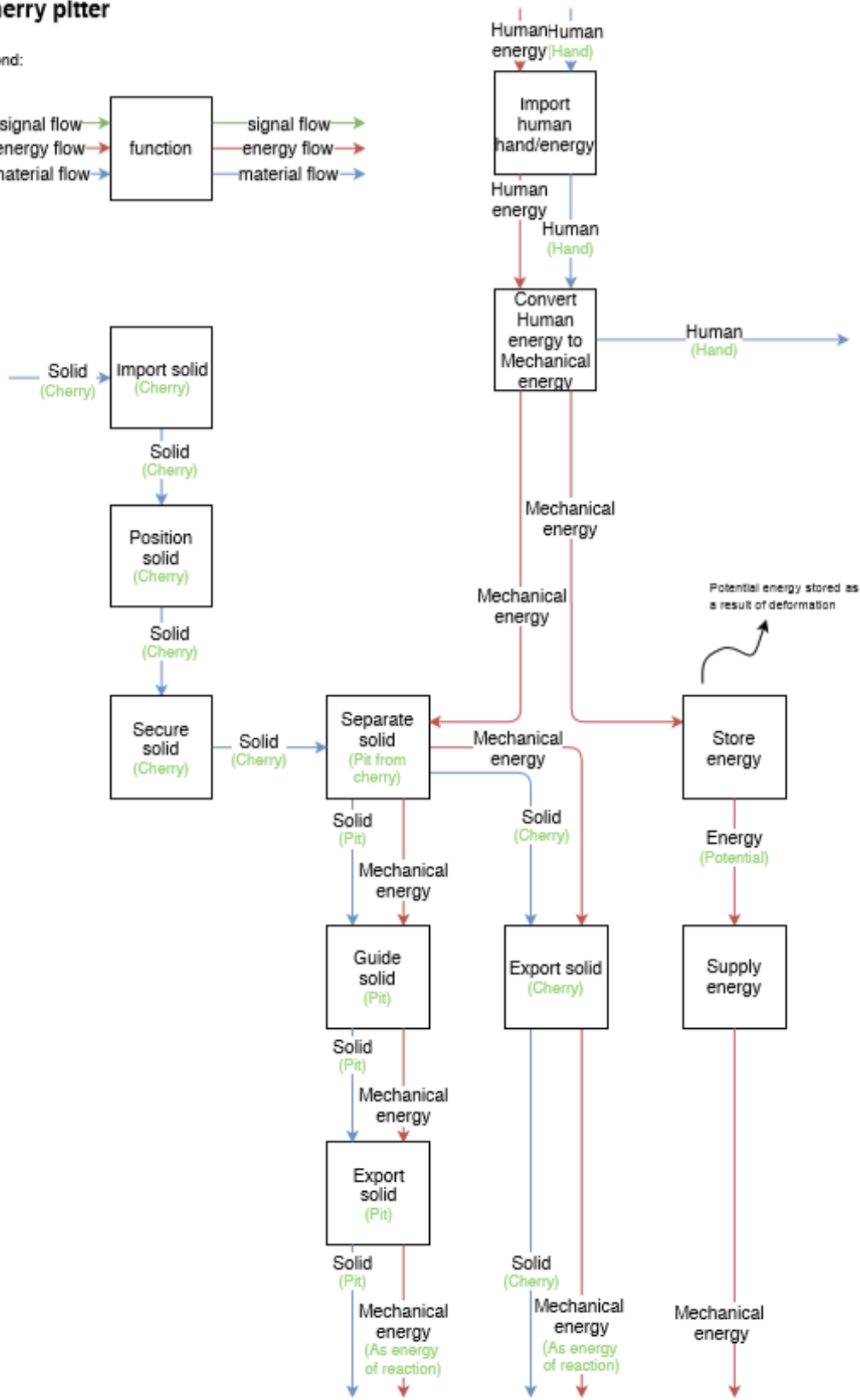
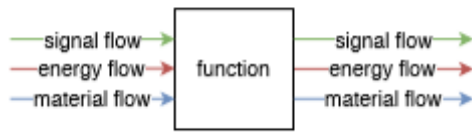
U svrhu ostvarivanja konzistentnost, te posljedično olakšane analize funkcija proizvoda, u ovom radu za izradu funkcijskih struktura korištena je standardna terminologija opisana u Hirtz et al. [12]

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 magnitude, convert, provision, signal, support*). Svaka od navedenih kategorija podijeljena je još i na sekundarne i tercijarne kategorije. Sve kategorije imaju definiciju koja je popraćena primjerom.

Za potrebu analize, izrađeno je ukupno 9 funkcijskih struktura za 9 različitih grupa proizvoda na dovoljno visokoj razini apstrakcije da vrijedi za svaki proizvod unutar grupe. Primjer funkcijske strukture prikazan je na Slici 3.

Cherry pitter

Legend:



Slika 3. Funkcijska struktura uređaja za otkoštavanje višanja

3.3. Identifikacija konstrukcijskih principa

Nakon što su funkcijske strukture kreirane, sljedi povezivanje funkcija s tehničkim rješenjima korištenim za rješavanje pojedine funkcije ili skupa funkcija. Iz svih funkcijskih struktura je za svaku pojedinu funkciju pronađena i na slici proizvoda označena značajka aditivne proizvodnje koja je ključna u ostvarivanju funkcije. Primjer označavanja značajka kod tri različite verzije proizvoda uređaja za otkoštavanje višanja za funkciju „store energy“ prikazan je na Slici 4. Iz slike je vidljivo da jedna funkcija može biti riješena na više različitih načina. U prikazanim proizvodima A i B, funkcija „store energy“ rješena je tako da se integrira opruga, a ista funkcija kod proizvoda C rješena je tako da se iskoristi elastično svojstvo materijala, odnosno da se koristi odgovarajuća distribucija materijala da bi se postigla fleksibilnost dijela proizvoda.



Slika 4. Označavanje značajka proizvoda

Nakon određivanja značajki proizvoda i povezivanja značajki s funkcijom koju ostvaruju, značajke su analizirane i grupirane prema međusobnim sličnostima. Isječak baze značajka određenih na proizvodima prikazan ja na Slici 5.



Slika 5. Baza značajka


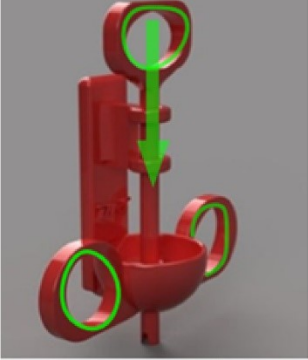



U excel tablici za svaki princip u svakom redu grupirane su značajke sa sličnim karakteristikama pod kodnim nazivom i oznakom funkcije koje rješavaju. Djelomični prikaz grupacije značajki proizvoda prikazan je na Slici 6.


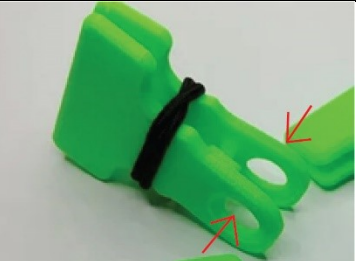


1 Prilagodba oblika proizvoda statičkom objektu	Position so	Position so	Position so	Secure soli	Secure soli	Secure so
	CP-A-2	CP-B-2	CP-C-2	CP-A-3	CP-B-3	CP-C-3
2 Prilagodba oblika proizvoda dinamičkom objektu	Guide solid	Guide solid	Export soli	Guide solid	Import hur	Import hu
	CP-A-5	CP-B-5	CP-A-6	CP-B-6	NC-A-5	NC-B-5
3 Prilagodba ergonomije proizvoda čovjeku	Import hur	Import hur	Import hur	Import Hur	Import Hur	Import Hu
	CP-A-8	CP-B-8	CP-C-8	ES-A-7	ES-B-7	ES-C-7
4 Integracija komponente u svrhu postizanja potrebna funkcije proizvoda	Convert Hl	Convert Hl	Store ener	Store ener	Supply ene	Supply en
	CP-A-9	CP-B-9	CP-A-10	CP-B-10	CP-A-11	CP-B-11
5 Korištenje distribucije materijala za postizanje krutosti	Separate s	Separate s	Separate s	Separate s	Separate s	Convert H
	CP-A-4	CP-B-4	CP-C-4	NC-A-3	NC-B-3	TR-A-4
6 Korištenje distribucije materijala za postizanje fleksibilnosti	Convert Hl	Store ener	Supply ene	Transform	Transform	Store ene
	CP-C-9	CP-C-10	CP-C-11	CC-A-2	CC-C-2	CC-C-3
7 Omogućavanje/integracija rotacijskog gibanja komponente proizvoda	Separate s	Separate s	Convert Hl	Convert Hl	Convert Hl	Separate
	NC-A-3	NC-B-3	NC-C-6	TR-B-4	TR-C-4	TR-B-5
8 Korištenje strukture ispunje proizvoda	Store ener	Secure soli	Secure soli	Secure soli	Transform energy	
	CP-C-10	NC-A-7	NC-B-7	NC-C-7	WB-B-7	

Slika 6. Grupiranje značajka

U Tablici 3. prikazan je detaljniji prikaz značajki za princip „Integracija komponente u svrhu postizanja potrebne funkcije proizvoda“.

Tablica 3. Detaljniji primjer grupiranja značajka

Integracija komponente u svrhu postizanja potrebne funkcije proizvoda		
FUNKCIJA	KODNI NAZIV	PRIKAZ ZNAČAJKE
Convert energy (Human energy into Mechanical energy)	CP-A-9	
Convert energy (Human energy into Mechanical energy)	CP-B-9	
Store energy	CP-A-10	
Store energy	CP-B-10	
Supply energy	CP-A-11	

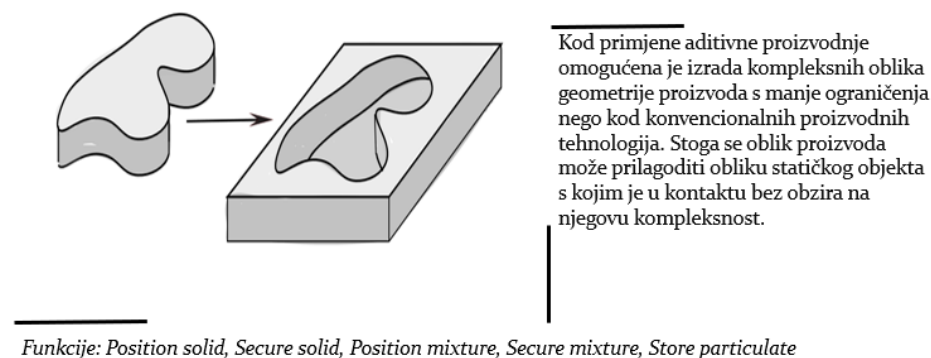
Supply energy	CP-B-11	
Convert energy	CC-B-2	
Store energy	CC-B-3	
Supply energy	CC-B-3	

Iz tablice je vidljivo da su različite funkcije rješene na sličan način, odnosno uporabom sličnih rješenja. Funkcije *Convert energy*, *Store energy*, *Supply energy* kod proizvoda pod kodnim nazivom **CP** (Uređaj za otkoštavanje višanja) su rješene ugradnjom opruge. Iste funkcije kod proizvoda pod kodnim nazivom **CC** (Stezaljka) rješene su ugradnjom elastičnog elementa. Karakteristika oba rješenja je da su funkcije rješene integracijom elemenata. U ovom slučaju integrirani elementi su proizvedeni nekom od tradicionalnih metoda. Na temelju uočenih sličnosti identificirani je princip „*Integracija komponente u svrhu postizanja potrebne funkcije proizvoda*“. Svaka grupa značajki, odnosno tehničkih rješenja, predstavlja mogućnosti i karakteristike FDM proizvodnog procesa. Na prethodno objašnjen način identificirani su principi za sve grupe značajki, a identificirano je ukupno 15 principa. Principi proizašli analizom biti će predstavljeni u poglavlju 4.

4. KONSTRUKCIJSKI PRINCIPI

Uočeni principi prezentirani su u obliku kartica. Svaka kartica sadrži redni broj principa, naziv principa, skicu, opis te su navedene funkcije koje rješava. Primjer kartičnog prikaza principa prikazan je na Slici 7., te je ukratko opisan u nastavku, a preostale kartice principa nalaze se u prilogu.

⇒ Prilagodba oblika proizvoda statičkom objektu



1

**KONSTRUKCIJSKI
PRINCIPI**

Slika 7. Primjer kartice principa

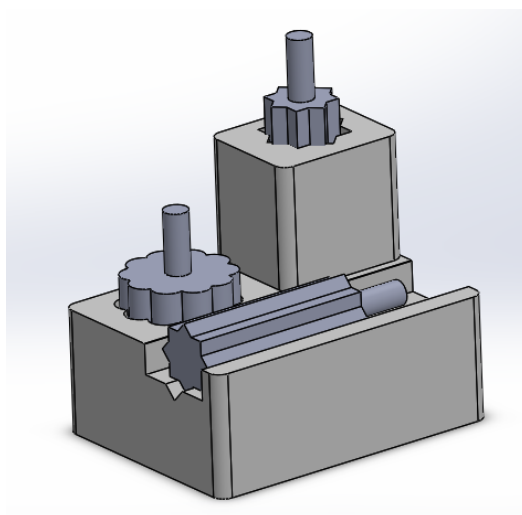
Primjerice, za rješavanje funkcija, npr. *Position solid*, *Secure solid*, *Secure mixture*, *Store mixture*, korištena su ista ili slična tehnička rješenja, odnosno uočene su slične značajke. Za tu grupu značajki definiran je princip „Prilagodba oblika proizvoda statičkom objektu“. Navedeni princip prikazuje mogućnost FDM aditivne tehnologije da se proizvode kompleksi oblici geometrije proizvoda s manje ograničenja nego kod konvencionalnih proizvodnih tehnologija, odnosno, da se oblik proizvoda može prilagoditi statičkom objektu s kojim je u kontaktu bez obzira na njegovu kompleksnost što je prednost naspram konvencionalnim tehnologijama proizvodnje.

Tekstualni opis izvrstan je obrazac za prikaz konstrukcijskih principa kad moraju biti opisani na visokom stupnju apstrakcije jer konstruktori mogu prepoznati riječi kao pojmove i izvući suštinu i šire značenje. Tekstualni oblik može se nadopuniti vizualnim opisom, jer postoje ideje koje se ne mogu izraziti tekstualnim opisom.[14]

U ovom radu iz analize proizašlo je ukupno 15 principa:

1. Prilagodba oblika proizvoda statičkom objektu
2. Prilagodba oblika proizvoda dinamičkom objektu
3. Prilagodba ergonomije proizvoda čovjeku
4. Integracija komponente u svrhu postizanja potrebne funkcije proizvoda
5. Korištenje distribucije materijala za postizanje krutosti
6. Korištenje distribucije materijala za postizanje fleksibilnosti
7. Korištenje strukture ispune proizvoda
8. Integracija rotacijskog gibanja komponente proizvoda
9. Prijenos informacije bojom
10. Prijenos informacije oblikom
11. Korištenje različitih materijala
12. Integracija više dijelova u jednu komponentu
13. Oblikovanje površine proizvoda

Osim što su opisani tekstualno i skicom, principi su prikazani i u fizičkom obliku kao 3D modeli. Fizički modeli principa mogu olakšati njihovo shvaćanje te mogu u većoj mjeri nego opisi i skice stimulirati kreativnost. Izrađeno je ukupno 15 modela, za 15 principa, i svi modeli su izrađeni na FDM uređaju za izradu proizvoda. Na Slici 8. prikazan je 3D model principa „Prilagodba oblika proizvoda statičkom objektu“.



Slika 8. 3D model

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je definirati principe i izraditi 3D modele koji bi, kao i kartice sa tekstualnim opisom i skicom procesa, mogli poslužiti u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda kao vodilja za izradu proizvoda aditivnom proizvodnjom, odnosno da sugeriraju rješenje ili potaknu novu ideju za rješavanje određene funkcije. Da bi se utvrdila uspješnost ove metode prezentiranja mogućnosti FDM aditivne tehnologije principima, bilo bi potrebno izvršiti testiranje u kojem bi predstavljeni principi u obliku kartica i 3D modela bili korišteni u razvoju nekog proizvoda u konceptualnoj fazi.

Analiza je bila ograničena na predmete proizvedene FDM tehnologijom, a kao rezultat provedene analize identificirano je ukupno 15 principa. Analizirani su svakodnevni uporabni predmeti za koje je postojalo više varijanta istog proizvoda. Može se pretpostaviti da ako bi se analiza proširila na veći broj proizvoda, odnosno na kompleksnije proizvode iz više različitih kategorija, i ako bi bili obuhvaćeni proizvodi izrađeni i drugim aditivnim tehnologijama, da bi se uočilo još više mogućnosti aditivne proizvodnje te bi se identificiralo još više principa.

LITERATURA

- [1] O. Diegel, A. Nordin and D. Motte, *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Singapore: Springer, 2020.
- [2] M. Šercer, D. Godec, *Aditivna proizvodnja tvorevina*, Zagreb: Školska knjiga, 2012..
- [3] M. Kumke, H. Watschke, T. Vietor (2016.) "A new methodological framework for design for additive manufacturing," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11 Bo.1, pp.3-19,+ <https://doi.org/10.1080/s00163-001-0008-3>
- [4] A. B. Paidosh, and Shea.K, (2017) "Design Heuristics for Additive Manufacturing" *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (IDETC/CIE) Vol 5: Design for x, Design to X, Vancouver, Canada, August 21-25, 2017, The Design Society*, pp. 91-100
- [5] Fu, K.K., Yang, M.C. and Wood, K.L. (2015), "Design Principles: The Foundation of Design", *Volume 7: 27th International Conference on Design Theory and Methodology*, Boston, USA August 2–5, 2015, ASME, Boston, Massachusetts, USA, p. V007T06A034.<http://doi.org/10.1115/DETC2015-46157>
- [6] Weiss, F., Binz, H. and Roth, D. (2016), "Conception of a design catalogue for the development of functionalities with additive manufacturing", *Proceedings of NordDesign 2016, Volume 2*, Trondheim, Norway, August 10-12, 2016, The Design Society, Trondheim, Norway, pp. 1-10.
- [7] M. M. Andreasen, C. T. Hansen and P. Cach, "Conceptual Design: Interpretations, Mindset and Models," in *Springer International Publishing*, Cham, 2015..
- [8] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, New York: Springer, 2015..

- [9] Laverne, F., Segonds, F., Anwer, N. and Le Coq, M. (2015), “Assembly Based Methods to Support Product Innovation in Design for Additive Manufacturing: An Exploratory Case Study”, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 137 No. 12, p. 121701. <http://doi.org/10.1115/1.4031589>
- [10] Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R. and Moultrie, J. (2018), “Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice”, *Journal of Engineering Design*, Vol. 29 No. 4–5, pp. 165–200. <http://doi.org/10.1080/09544828.2018.1454589>
- [11] Ref 11 nije potpuna: Valjak, F., & Bojčetić, N. (2019). Conception of Design Principles for Additive Manufacturing. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 689-698. doi:10.1017/dsi.2019.73
- [12] Hirtz, J., Stone, R.B., McAdams, D.A., Szykman, S. and Wood, K.L. (2002), “A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts”, *Research in Engineering Design*, Vol. 13 No. 2, pp. 65–82. <http://doi.org/10.1007/s00163-001-0008-3>
- [13] B. R. Stone and L. K. Wood, "Development of a Functional Basis for Design," in *JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN*, 2000..
- [14] Goldschmidt, G. and Sever, A.L. (2011), “Inspiring design ideas with texts”, *Design Studies*, Vol. 32 No. 2, pp. 139–155. <http://doi.org/10.1016/j.destud.2010.09.006>

PRILOZI

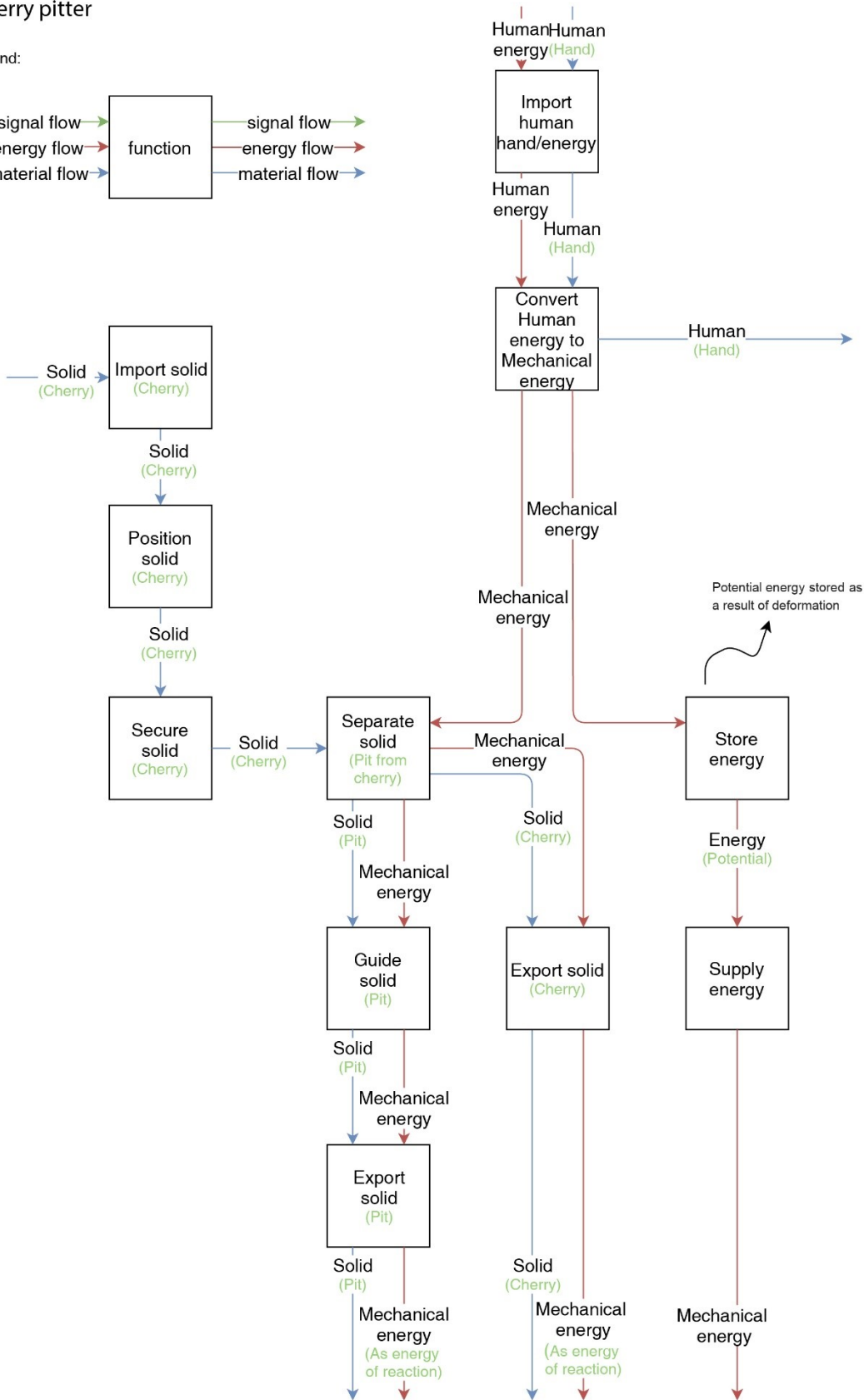
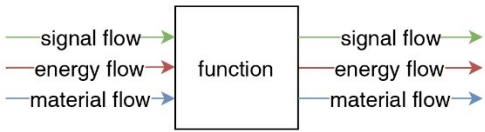
- I. CD-R disc
- II. Funkcijske strukture
- III. Kartice konstrukcijskih principa
- IV. 3D modeli konstrukcijskih principa

FUNKCIJSKE STRUKTURE:

1. UREĐAJ ZA OTKOŠTAVANJE VIŠANJA

Cherry pitter

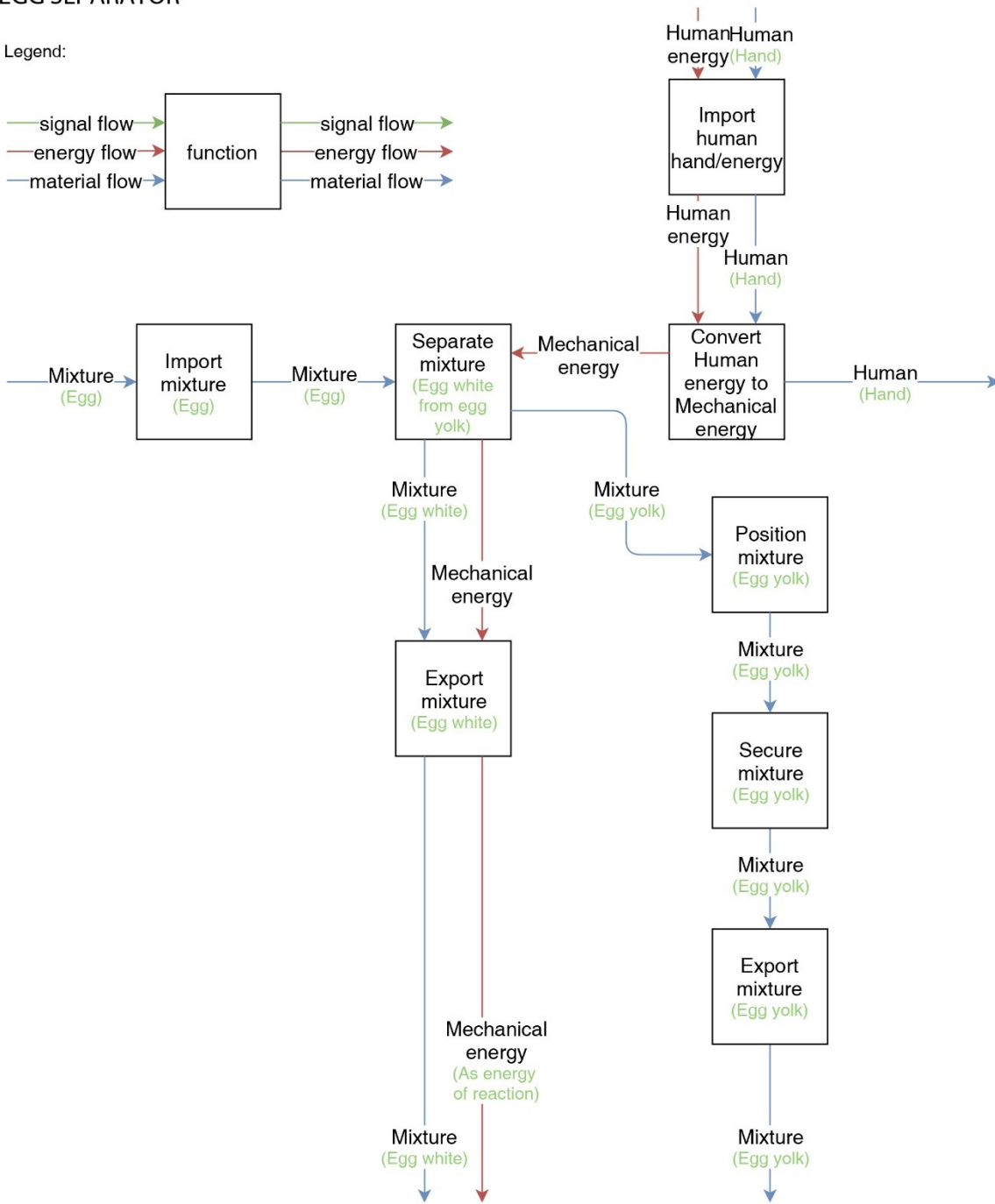
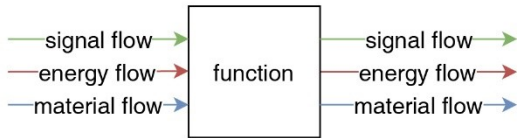
Legend:



2. UREĐAJ ZA ODVAJANJE ŽUMANJKA

EGG SEPARATOR

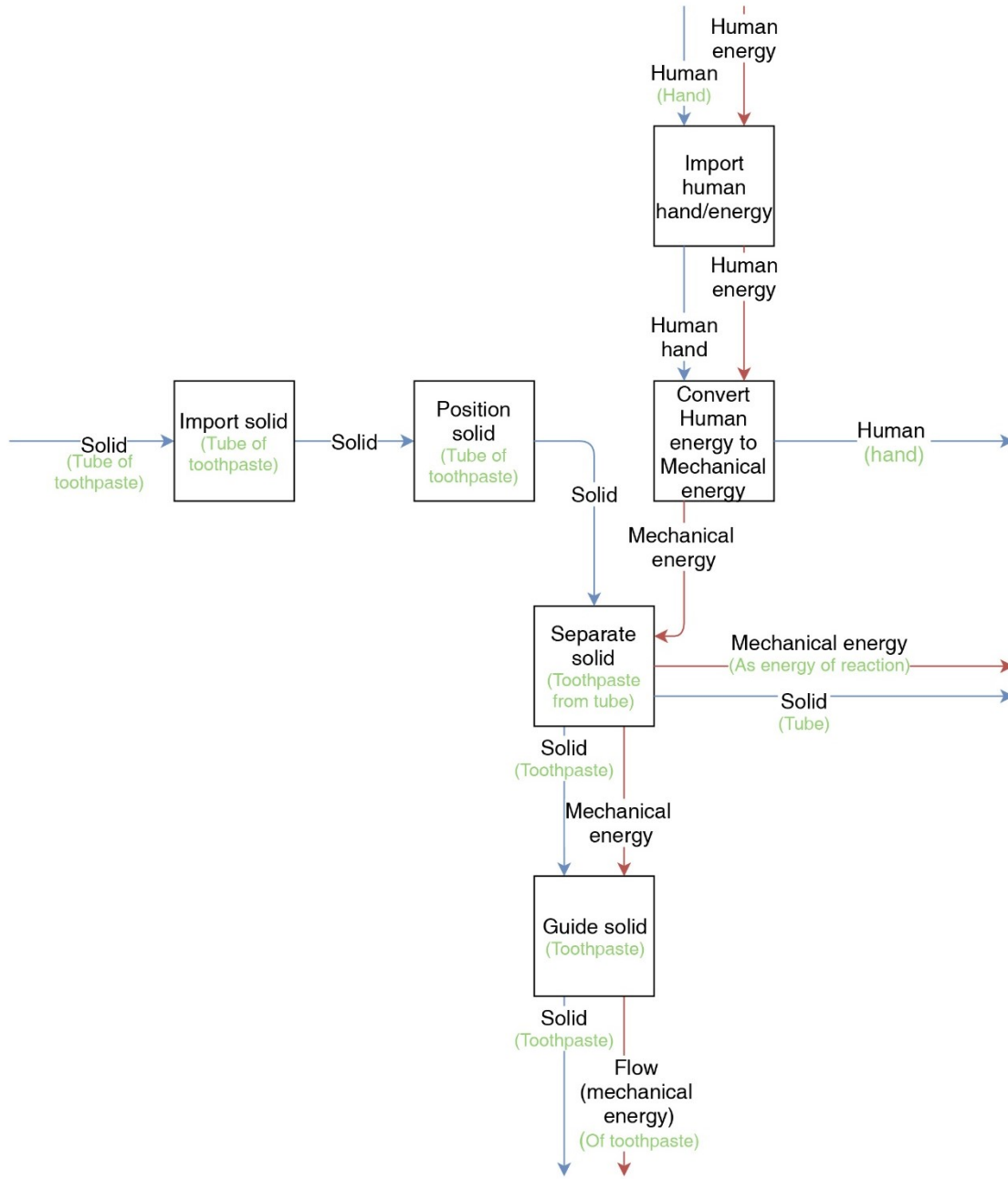
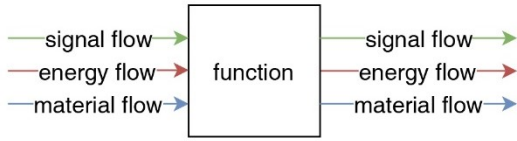
Legend:



3.ISTISKIVAČ ZUBNE PASTE

TOOTH PASTE ROLLER

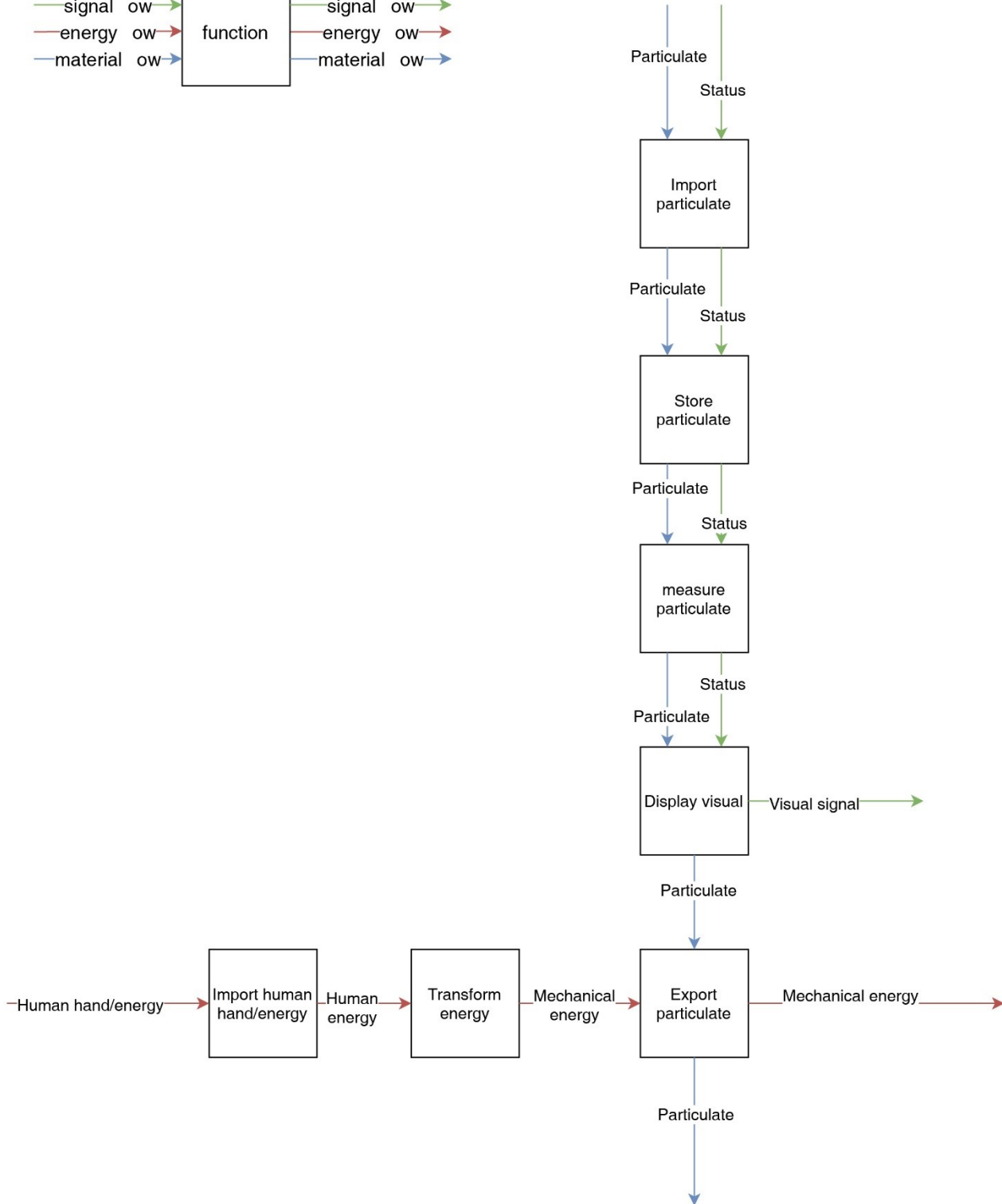
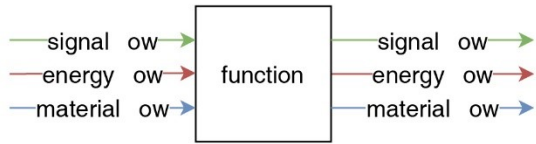
Legend:



5. ČAŠA ZA MJERENJE

MESURING CUP

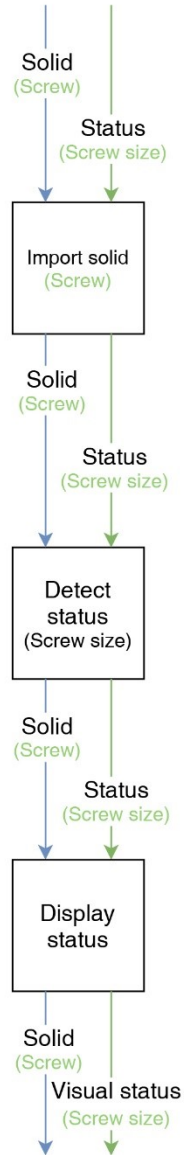
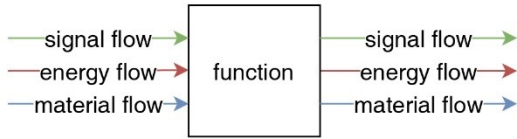
Legend:



6. MJERAČ VIJKA

SCREW GAUGE

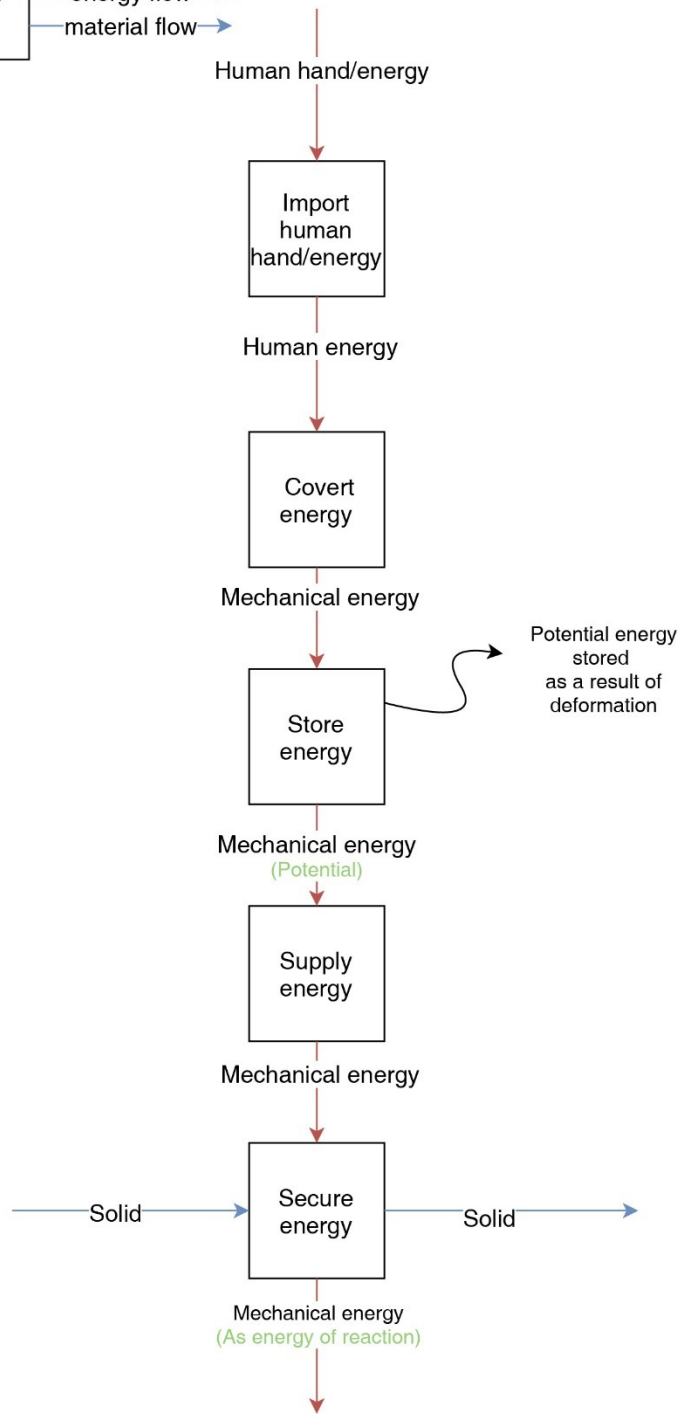
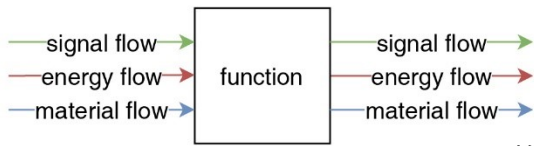
Legend:



7. STEZALJKA

CLAP MECHANISM

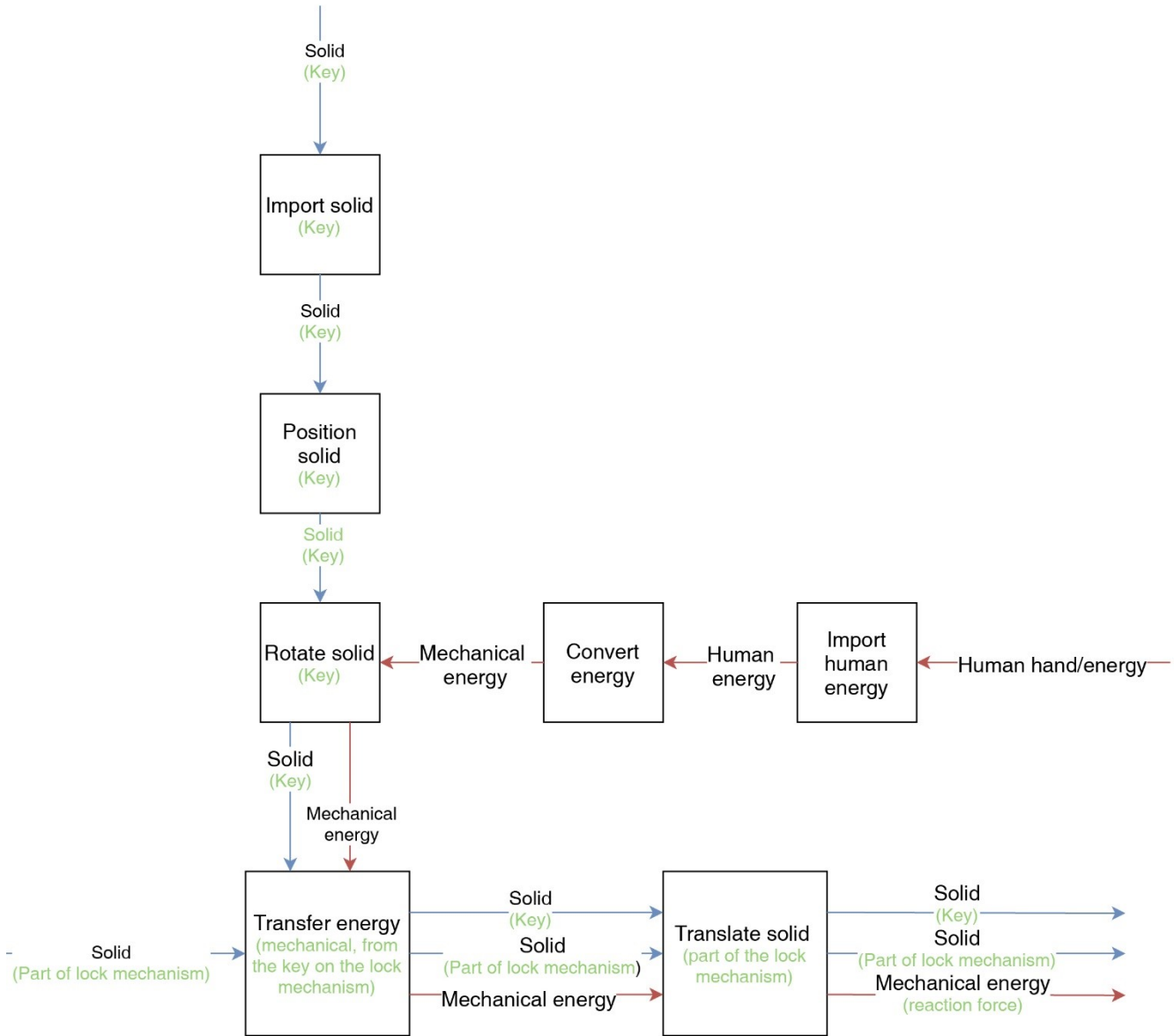
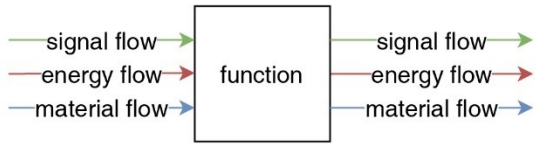
Legend:



8. LOKOTNI MEHANIZAM

LOCK MECHANISM

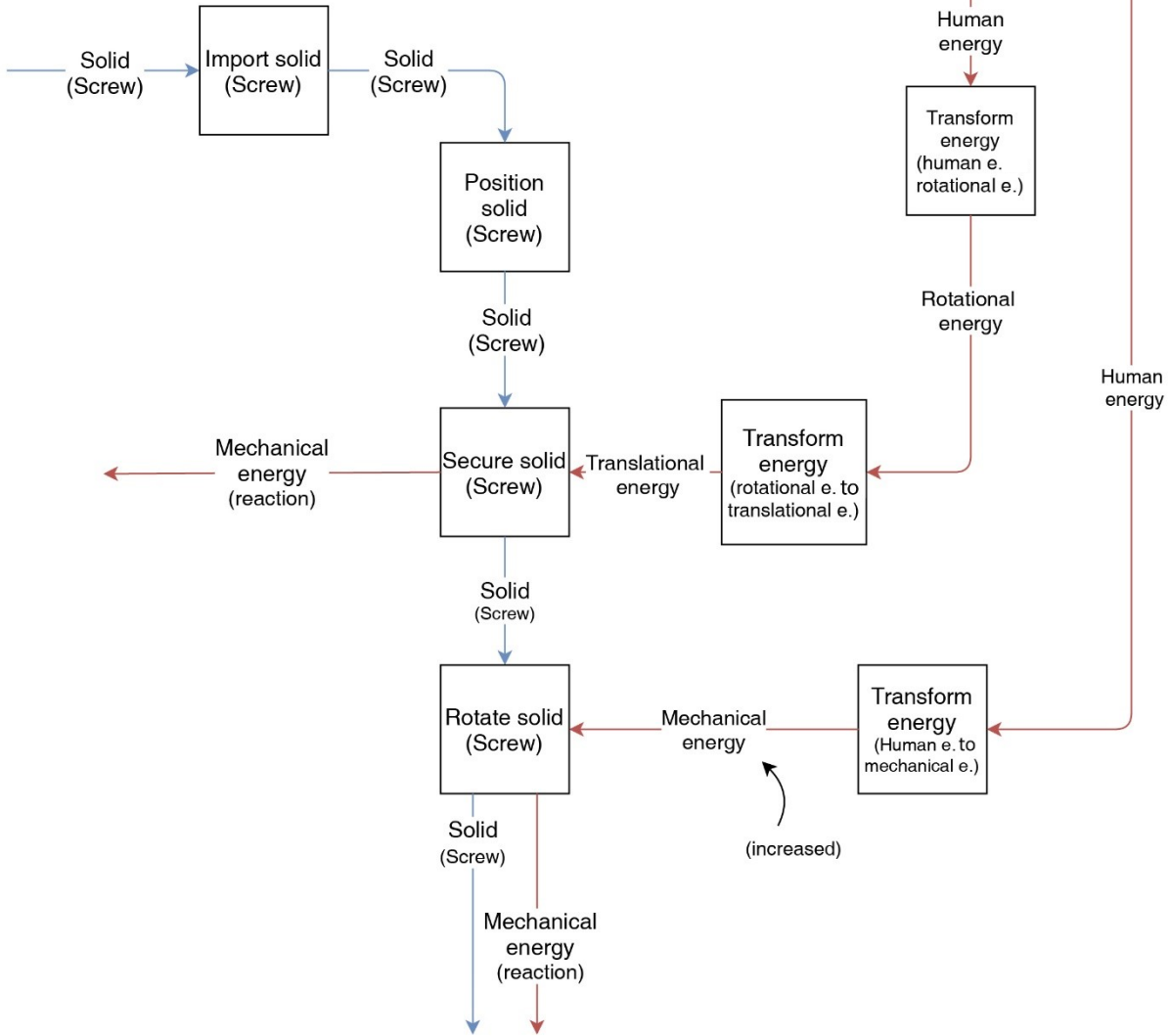
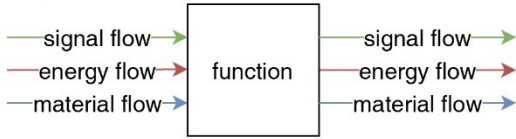
Legend:



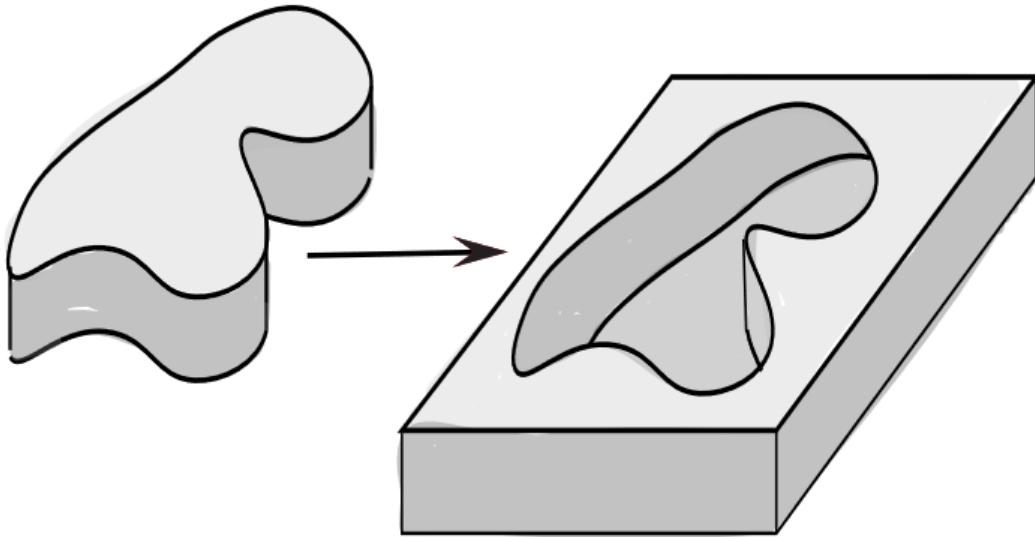
9.MOMENTNI KLJUČ

WRENCH

Legend:



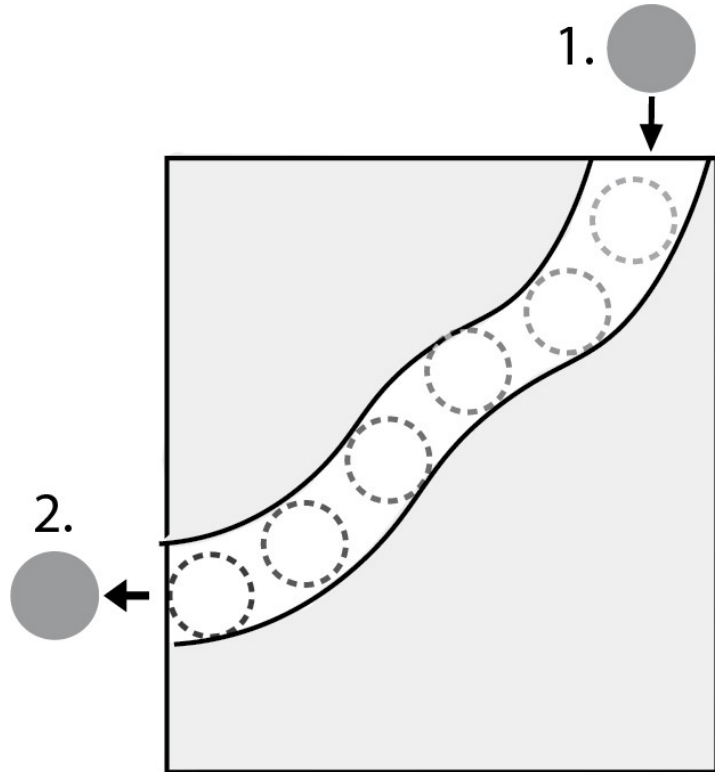
⇒ Prilagodba oblika proizvoda statičkom objektu



Kod primjene aditivne proizvodnje omogućena je izrada kompleksnih oblika geometrije proizvoda s manje ograničenja nego kod konvencionalnih proizvodnih tehnologija. Stoga se oblik proizvoda može prilagoditi obliku statičkog objekta s kojim je u kontaktu bez obzira na njegovu kompleksnost.

Funkcije: Position solid, Secure solid, Position mixture, Secure mixture, Store particulate

⇒ Prilagodba oblika proizvoda dinamičkom objektu



Kod primjene aditivne proizvodnje omogućena je izrada kompleksnih oblika geometrije proizvoda s manje ograničenja nego kod konvencionalnih proizvodnih tehnologija. Stoga se oblik proizvoda može prilagoditi obliku dinamičkog objekta te omogućiti vođenje objekta na vanjskim, ali i unutarnjim površinama proizvoda.

Funkcije: Guide solid, Export solid, Separat mixture, Export mixture

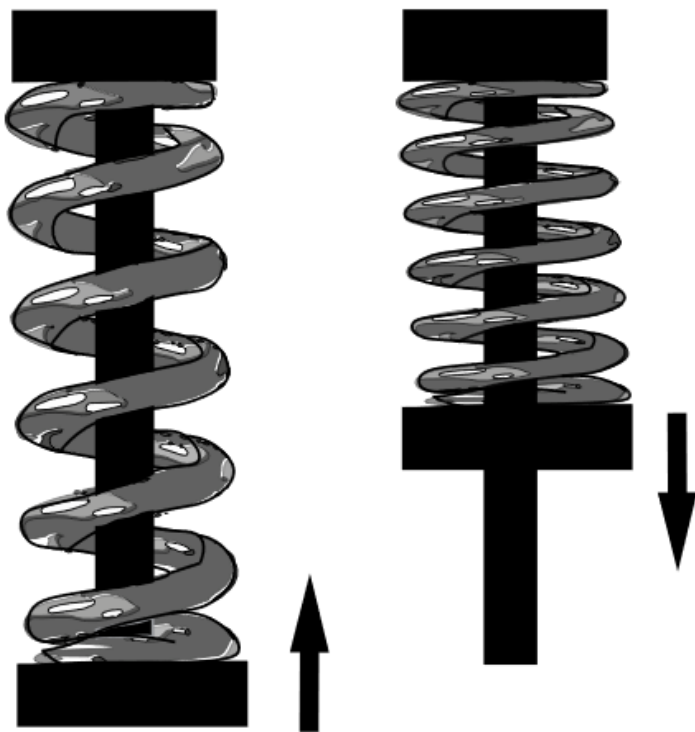
⇒ Prilagodba ergonomije proizvoda čovjeku



Primjenom aditivne proizvodnje moguće je postići precizno oblikovanje proizvoda koje odgovara ljudskoj ergonomiji. Također, u kratkom vremenskom roku moguće je provesti preinake, odnosno prilagodbu proizvoda svakom individualnom korisniku bez povećanja troškova proizvodnje, a uz povećanje efikasnosti funkcije proizvoda.

Funkcije: Import human hand/energy, Transform energy

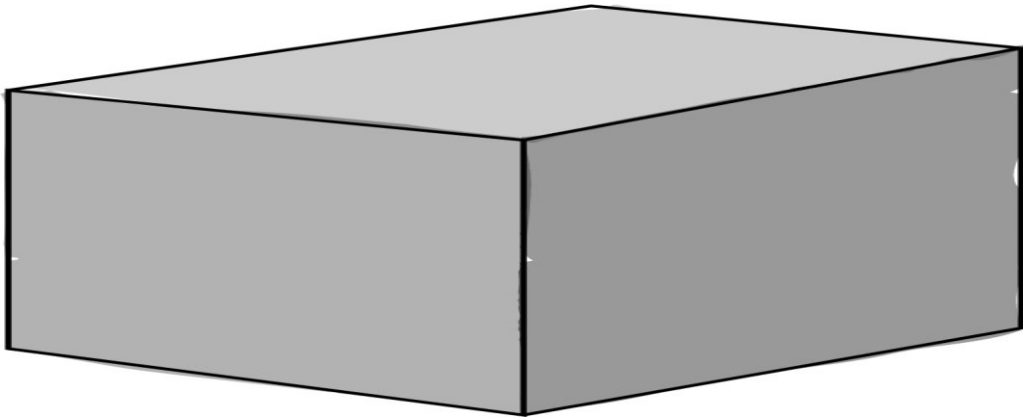
⇒ Integracija komponente u svrhu postizanja potrebne funkcije proizvoda



Kod aditivne proizvodnje moguće je u primarni proizvod tijekom ili nakon završetka procesa 3D izrade proizvoda integrirati jednu ili više zasebnih komponenta koje su izrađene zasebno ili su izrađene nekom drugom proizvodnom tehnologijom. Time se može postići ostvarenje potrebne funkcije proizvoda.

Funkcije: Store energy, Supply energy, Transform energy, Convert energy

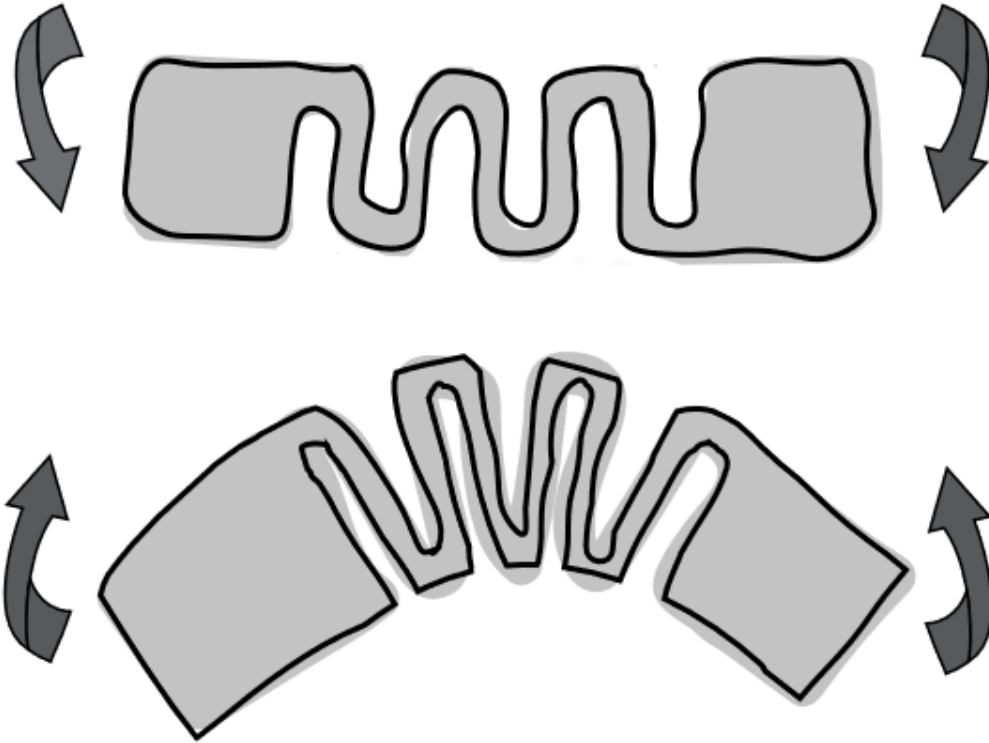
⇒ Korištenje distribucije materijala za postizanje krutosti



Primjenom aditivne proizvodnje moguće je prilagoditi distribuciju materijala tako da se postigne krutost, čvrstoća i stabilnost proizvoda gdje je to potrebno. Navedeno se može postići i primjenom odgovarajuće unutarnje strukture proizvoda.

Funkcije: Separate solid, Transmit energy

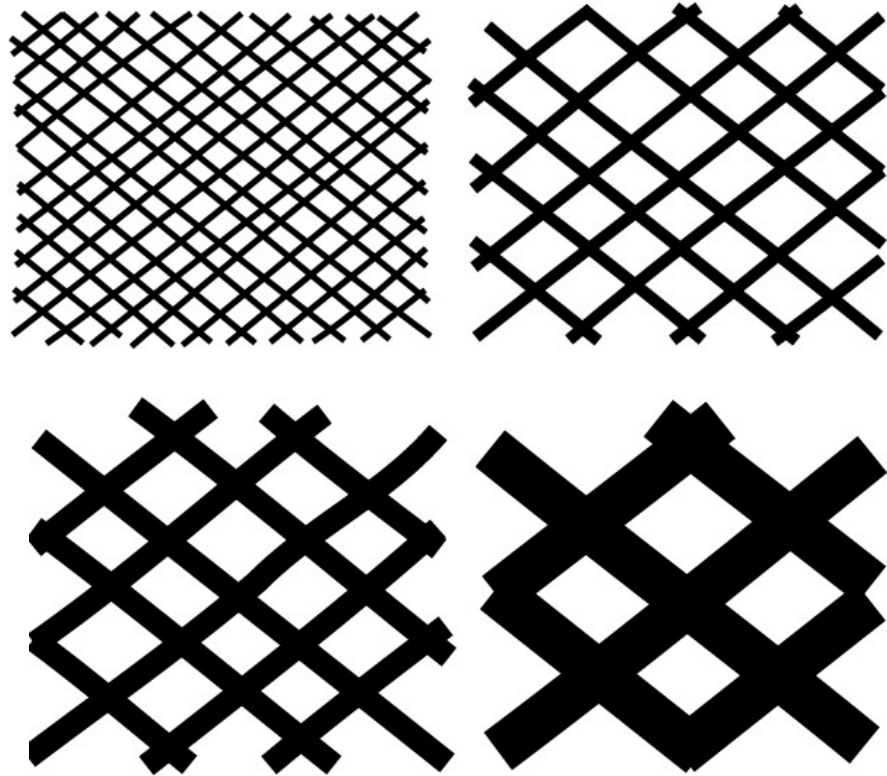
⇒ Korištenje distribucije materijala za postizanje fleksibilnosti



Primjenom aditivne proizvodnje moguće je prilagoditi distribuciju materijala tako da se postigne fleksibilnost proizvoda gdje je to potrebno korištenjem debljih i tanjih dijelova/stijenki.

Funkcije: Convert energy, Store energy, Supply energy

⇒ Korištenje strukture ispune proizvoda

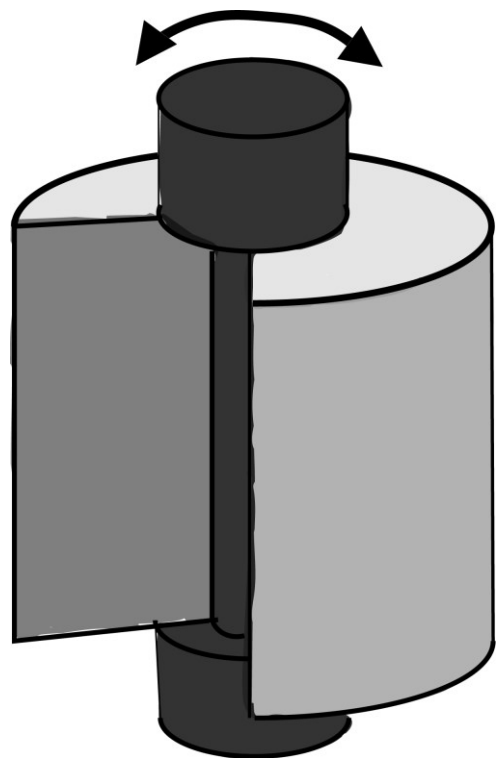


U postavkama za izradu proizvoda može se odrediti stupanj ispunjenosti unutrašnjosti proizvoda. Na taj način može se uštedjeti materijal i ubrzat proces izrade, a sve to bez negativnog utjecaja na funkcionalnost i izdržljivost proizvoda. Odabirom strukture ispune utječe se i na krutost/fleksibilnost proizvoda.

Funkcije: Convert energy, Secure solid, Rotate solid



⇒ Integracija rotacijskog gibanja komponente proizvoda



Za ostvarivanje pojedinih funkcija potrebno je omogućiti rotacijsko gibanje sastavnih elemenata proizvoda unutar samog proizvoda, što je aditivnom proizvodnjom moguće postići zbog mogućnosti izrade funkcionalnih sklopova gdje se sve komponente rade istovremeno bez potreba za naknadnim sklapanjem.

Funkcije: Separate solid, Convert energy, Rotate solid, Position solid, Secure solid



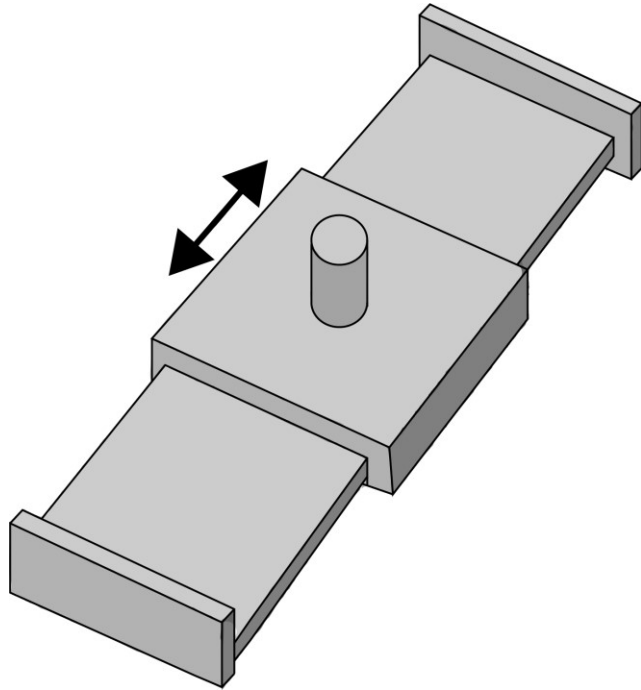
⇒ Omogućavanje gibanja pomoću više međusobno povezanih komponenti proizvoda



Aditivnom proizvodnjom moguće je u jednom ciklusu izraditi čitav proizvod koji se sastoji od međusobno pomičnih dijelova te se tako smanjuje vrijeme ukupne proizvodnje i ne postoji potreba za naknadnim sastavljanjem proizvoda.

Funkcije: Translate solid, Separate solid, Convert energy, Position solid,

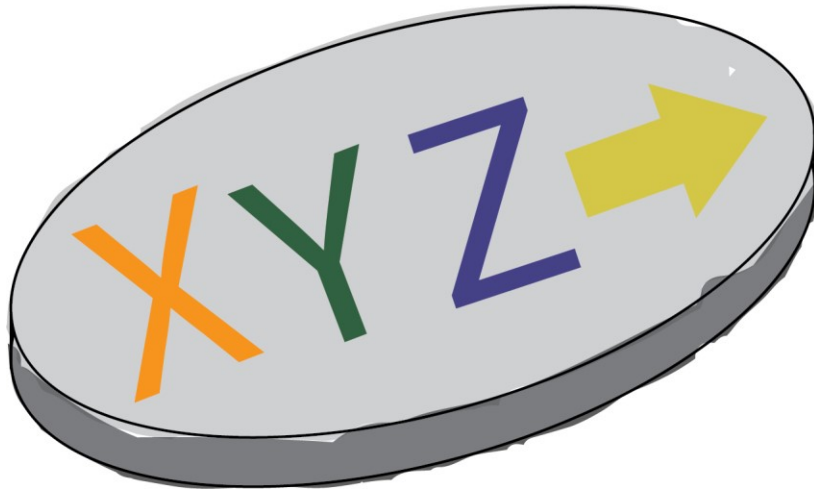
⇒ Integracija linearnog gibanja komponente proizvoda



Za ostvarivanje pojedinih funkcija potrebno je omogućiti linearno gibanje sastavnih elemenata proizvoda unutar samog proizvoda, što je aditivnom proizvodnjom moguće postići zbog mogućnosti izrade funkcionalnih sklopova gdje se sve komponente rade istovremeno bez potrebe za naknadnim sklapanjem.

Funkcije: Convert energy, Secure solid, Translate solid

⇒ Prijenos informacije bojom



Funkcije: Display visual, Detect status

Aditivna tehnologija omogućava primjenu materijala različitih boja u jednom sloju te se tako može postići tekstualni ili simbolički prijenos informacija.

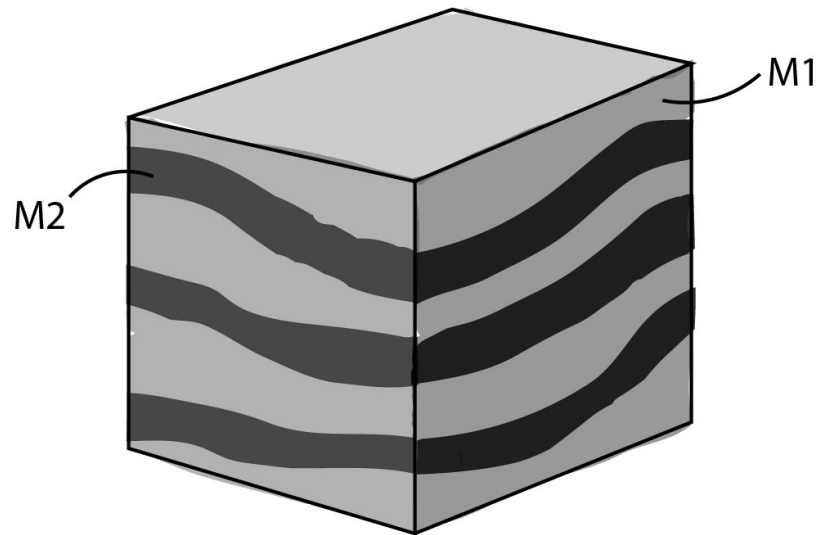
⇒ Prijenos informacije oblikom



Aditivna tehnologija omogućava primjenu kompleksnih geometrijskih oblika te se tako može postići tekstualni ili simbolički prijenos informacije pozitivom ili negativom površine proizvoda.

Funkcije: Display visual, Measure particulate, Detect status

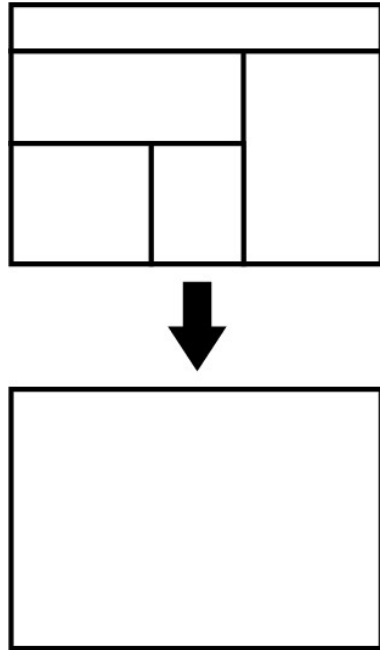
⇒ Korištenje različitih materijala



Kod aditivne proizvodnje moguće je koristiti u procesu proizvodnje, ovisno o uređaju za aditivnu proizvodnju, istovremeno dva ili više različitih materijala te tako postići različita svojstva pojedinih dijelova/slojeva proizvoda. Također, drugi materijal može poslužiti i kao potporna struktura.

Funkcije: Import human hand, Import human energy, Convert energy

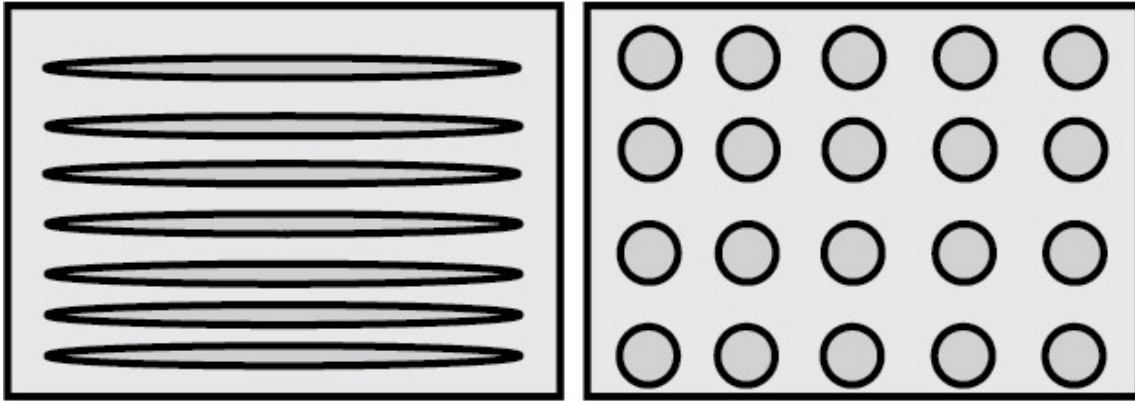
⇒ Integracija više dijelova u jednu komponentu



Umjesto da se za svaku funkciju izrađuje zasebna komponenta aditivnom proizvodnjom moguće je u većoj mjeri nego kod tradicionalnih metoda proizvodnje provesti tzv. solidifikaciju. Umjesto da se komponente izrađuju zasebno i kasnije spajaju, one se integriraju, ovisno o kompleksnosti, u jednu ili više većih komponenta. Tako se povećava robusnost proizvoda, smanjuje potreba za naknadnim spajanjem.

Funkcije: Convert energy, Store energy, Supply energy, Separate solid, Convert energy

⇒ Oblikovanje površine proizvoda



Aditivna tehnologija omogućava izradu kompleksnih geometrijskih oblika pa je moguće proizvoljno oblikovati površinu proizvoda (iz estetskih ili funkcionalnih razloga) uz manja ograničenja nego kod tradicionalnih tehnologija proizvodnje i bez povećanja troškova proizvodnje zbog kompleksnosti.

Funkcije: Secure solid, Import human hand, Import human energy, Convert energy