

Razvoj i 3D ispis jezgre pješčanog kalupa za izradu naprave za pozicioniranje nosača motora vozila

Jerman, Elvin

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:403792>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Elvin Jerman

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Elvin Jerman
0035212242

Zagreb, 2023.

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

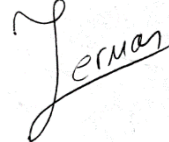
Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Godecu na svim savjetima, pomoći i potpori prilikom pisanja ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se tvrtki P.P.C. Buzet (CIMOS) na suradnji, te svim djelatnicima, koji su na bilo koji način pridonijeli izradi ovog rada, na pomoći te uloženom trudu i vremenu.

Posebno se zahvaljujem obitelji što su oduvijek velika potpora.

Također zahvaljujem svim prijateljima i kolegama koji su bili uz mene tijekom studiranja.

Elvin Jerman

A handwritten signature in black ink that reads "Jerman". The signature is written in a cursive style with a large initial 'J' and a long horizontal stroke at the end.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Elvin Jerman** JMBAG: 0035212242

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj i 3D ispis jezgre pješčanog kalupa za izradu naprave za pozicioniranje nosača motora vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development and 3D print of the sand mould core for production of fixture for vehicle motor carrier positioning**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja (3D ispis) ima sve širu primjenu u području automobilske industrije zbog mogućnosti izrade vrlo kompleksnih geometrijskih oblika proizvoda i modela u relativno kratkom vremenu. Primjenjuje se za razvoj novih dijelova te izradu manjih serija dijelova automobila. Također se primjenjuje za razvoj i izradu opreme koja se koristi za proizvodnju automobilskih dijelova te za pomoćnu opremu koja se primjenjuje pri montaži ili kontroli kvalitete gotovih proizvoda. Njena primjena može biti izravna ali i posredna, kada se s pomoću aditivne proizvodnje izrađuju primjerice modeli kompleksne geometrije za izradu kalupa.

U okviru diplomskog rada za zadani proizvod – nosač motora vozila, potrebno je:

- opisati funkciju i zahtjeve na napravu za pozicioniranje i stezanje nosača motora
- definirati CAD model naprave za pozicioniranje i stezanje nosača motora
- izabrati odgovarajući postupak 3D ispisa za izradu jezgre pješčanog kalupa za izradu naprave
- optimirati parametre 3D ispisa izabranog postupka u cilju postizanja što točnijih dimenzija ispisa
- izraditi 3D ispisom model jezgre za izradu pješčanog kalupa za izradu naprave
- primjenom 3D skeniranja provjeriti odstupanja 3D ispisane jezgre u odnosu na referenti CAD model
- vrednovati primjenjivost 3D ispisa na konkretnom primjeru razvoja i izrade kalupne jezgre.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE.....	VII
POPIS OZNAKA.....	VIII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY.....	XI
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA.....	2
2.1. Povijest razvoja aditivne proizvodnje.....	4
2.2. Faze izrade proizvoda aditivnom proizvodnjom.....	8
2.3. Tehnologije aditivne proizvodnje.....	10
2.3.1. Postupak očvršćivanja taloženjem (FDM).....	10
2.3.2. Laminiranje (LOM).....	14
2.3.3. Stereolitografija (SL/SLA).....	16
2.3.4. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP).....	18
2.3.5. PolyJet.....	20
2.3.6. Selektivno lasersko srašćivanje (SLS).....	22
2.3.7. 3D ispis (3DP).....	24
3. LIJEVANJE U PIJESAK.....	26
3.1. Modeli.....	27
3.2. Kalupna mješavina.....	31
3.3. Uljevni sustav.....	33
3.3.1. Dijelovi uljavnog sustava.....	33
3.3.1.1. Uljevna čaša.....	35
3.3.1.2. Spust.....	36
3.3.1.3. Razvodnik.....	37
3.3.1.4. Ušće.....	39
4. KOMBINACIJA ADITIVNE PROIZVODNJE I LIJEVANJA.....	40
5. RAZVOJ I 3D ISPIS JEZGRE PJEŠČANOG KALUPA ZA IZRADU NAPRAVE.....	42
5.1. Funkcija i zahtjevi naprave za pozicioniranje i stezanje.....	42
5.2. CAD model naprave za pozicioniranje i stezanje nosača motora.....	43
5.3. 3D ispis modela FDM/FFF aditivnim postupkom.....	44

5.4. 3D skeniranje ispisanog modela i provjera odstupanja u odnosu na referenti CAD model.....	52
5.5. Lijevanje naprave – lijevanje u pijesak.....	60
5.6. Mehanička obrada naprave i povezivanje u sklop	65
6. ZAKLJUČAK.....	69
LITERATURA.....	71
PRILOZI.....	73

POPIS SLIKA

Slika 1.	Primjer aditivne proizvodnje proizvoda [1]	1
Slika 2.	Optimalno područje primjene aditivne proizvodnje [4]	3
Slika 3.	Povijest razvoja aditivnih tehnologija [9]	7
Slika 4.	Proces izrade proizvoda sloj po sloj [11]	8
Slika 5.	Faze aditivne proizvodnje [10].....	9
Slika 6.	FDM postupak [4]	11
Slika 7.	Primjer proizvoda od ABS-a (lijevo) i PA-a (desno) [4]	13
Slika 8.	Primjer proizvoda od drva [4]	13
Slika 9.	LOM postupak [4].....	14
Slika 10.	Primjer proizvoda izrađenih LOM tehnologijom: a) tvorevina od papira, b) tvorevina od PVC-a [4]	15
Slika 11.	SL/SLA postupak [4]	16
Slika 12.	Primjer proizvoda izrađenih SL/SLA tehnologijom [4].....	17
Slika 13.	DLP postupak [4]	18
Slika 14.	Primjer proizvoda izrađenih DLP tehnologijom [14]	19
Slika 15.	PolyJet postupak [4]	20
Slika 16.	Primjer proizvoda izrađenih PolyJet tehnologijom [4]	21
Slika 17.	SLS postupak [4].....	22
Slika 18.	Primjer proizvoda izrađenih SLS tehnologijom [4]	23
Slika 19.	3DP postupak [4].....	24
Slika 20.	Primjer proizvoda izrađenih 3DP tehnologijom [4]	25
Slika 21.	Lijevanje u kalupe [17]	26
Slika 22.	Dijelovi uljevnog sustava [19]	34
Slika 23.	Vrste uljevnih čaša: koritaste (lijevo); ljevkasta (desno) [19].....	35
Slika 24.	Shematski prikaz toka taljevine u spustu: sužavanje spusta prema dolje (lijevo); ravni spust (desno) [19]	36
Slika 25.	Karakteristične dimenzije podnožja spusta (razdjelnika) [19]	37
Slika 26.	Mogući poprečni presjeci razvodnika [19].....	38
Slika 27.	Produženje razvodnika [20]	38
Slika 28.	Mogući poprečni presjeci ušća [19]	39

Slika 29.	Odljevak dobiven s pomoću 3D ispisanog kalupa i jezgre [21].....	41
Slika 30.	Jezgra dobivena aditivnom proizvodnjom (lijevo); gotovi odljevak (desno) [22]	41
Slika 31.	CAD model nosača motora	43
Slika 32.	CAD model naprave.....	44
Slika 33.	CAD model naprave i nosača motora	44
Slika 34.	Model naprave i sučelje u programu <i>Z-Suite</i>	45
Slika 35.	Parametri 3D ispisa	46
Slika 36.	3D ispis modela - simulacija	47
Slika 37.	3D pisarč <i>Zortrax M200</i> [23].....	48
Slika 38.	Pisarč <i>Zortrax M200</i> korišten za ispis modela	49
Slika 39.	Ispisani model – pisarč <i>Zortrax M200</i>	49
Slika 40.	Ispisani model izvađen iz pisarča	50
Slika 41.	Ispisani i očišćeni model	51
Slika 42.	3D skener <i>ATOS Core 300</i> [26]	52
Slika 43.	3D skener <i>ATOS Core 300</i> korišten za skeniranje modela	53
Slika 44.	Model pripremljen za 3D skeniranje	54
Slika 45.	Proces 3D skeniranja modela	54
Slika 46.	Skenirani model – <i>GOM Inspect</i> softver.....	55
Slika 47.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 1	56
Slika 48.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 2	56
Slika 49.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 3	57
Slika 50.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 4	57
Slika 51.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 5	58
Slika 52.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 6	58
Slika 53.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 7	59
Slika 54.	Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 8	59
Slika 55.	Premazani model jezgre	60
Slika 56.	Veziva za izradu pješčanog kalupa	61
Slika 57.	Izrada donjaka	61
Slika 58.	Priprema gornjaka	62
Slika 59.	Dodavanje pojila	62
Slika 60.	Gornjak (lijevo) i donjak (desno)	63

Slika 61.	Dodavanje ušća u donjak.....	63
Slika 62.	Lijevanje u kalup	64
Slika 63.	Naprava nakon vađenja iz kalupa.....	64
Slika 64.	Naprava nakon vađenja iz kalupa i uklanjanja uljavnog sustava	65
Slika 65.	Model naprave povezan u sklop – CAD	66
Slika 66.	Nosač motora postavljen na sklop za pozicioniranje i stezanje – CAD.....	66
Slika 67.	Mehanički obrađena naprava	67
Slika 68.	Povezivanje naprave u sklop	67
Slika 69.	Provjera nalijeganja nosača motora na napravu	68
Slika 70.	Nosač motora postavljen na sklop za pozicioniranje i stezanje	68

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci FDM tehnologije [4]	12
Tablica 2. Prednosti i nedostaci LOM tehnologije [4]	15
Tablica 3. Prednosti i nedostaci SL/SLA tehnologije [4].....	17
Tablica 4. Prednosti i nedostaci DLP tehnologije [4,14]	19
Tablica 5. Prednosti i nedostaci PolyJet tehnologije [4,15]	21
Tablica 6. Prednosti i nedostaci SLS tehnologije [4]	23
Tablica 7. Prednosti i nedostaci 3DP tehnologije [4].....	25
Tablica 8. Prednosti i nedostaci lijevanja u pijesak [18].....	27
Tablica 9. Iznos skošenja za adekvatno kalupljenje [18].....	28
Tablica 10. Volumno skupljanje pri skrućivanju različitih metala [16].....	29
Tablica 11. Skupljanje u krutom stanju za različite metale [16]	30
Tablica 12. <i>Zortrax M200</i> – specifikacije [24,25]	48
Tablica 13. <i>ATOS Core 300</i> – specifikacije [26,27]	52

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
C6003628	Držac za konzolu C4008000SE

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
3D		Trodimenzionalno
3DP		3D ispis (eng. <i>3D Printing</i>)
ABS		Akrilonitril butadien stiren
AM		Aditivna proizvodnja (eng. <i>Additive manufacturing</i>)
AMF		AMF datoteka (eng. <i>Additive Manufacturing File</i>)
A_{ps}	mm ²	Poprečni presjek razdjelnika
ASA		Akrilonitril stiren akrilat (eng. <i>Acrylonitrile Styrene Acrylate</i>)
A_{sd}	mm ²	Površina poprečnog presjeka dna spusta
CAD		Oblikovanje s pomoću računala (eng. <i>Computer-aided design</i>)
CAM		Proizvodnja potpomognuta računalom (eng. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
DLP		Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. <i>Digital Light Processing</i>)
DMD		Postupak izravnog taloženje metala (eng. <i>Direct Metal Deposition</i>)
FDM		Postupak očvršćivanja taloženjem (eng. <i>Fused deposition modeling</i>)
FFF		Nanošenje rastaljenog polimernog materijala (eng. <i>Fused Filament Fabrication</i>)
HIPS		Visokootporni polistiren (eng. <i>High Impact PolyStyrene</i>)
h_{ps}	mm	Visina razdjelnika
h_r	mm	Visina razvodnika
LAM		Laserska aditivna proizvodnja (eng. <i>Laser Additive Manufacturing</i>)
LOM		Laminiranje (eng. <i>Laminated object manufacturing</i>)

PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PEEK	Polietereterketon
PET	Poli(etilen-tereftalat)
PETG	Poli(etilen-tereftalat) glikol
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
PS	Polistiren
PVC	Poli(vinil-klorid)
RM	Brza proizvodnja (eng. <i>Rapid Manufacturing</i>)
RP	Brza proizvodnja prototipova (eng. <i>Rapid Prototyping</i>)
RPD	Koncept brzog razvoja proizvoda (eng. <i>Rapid Product Development</i>)
RT	Brza proizvodnja alata i kalupa (eng. <i>Rapid Tooling</i>)
SGC	Tonografija (eng. <i>Solid Ground Curing</i>)
SL/SLA	Stereolitografija (eng. <i>Stereolithography</i>)
SLM	Selektivno lasersko taljenje (eng. <i>Selective Laser Melting</i>)
SLS	Selektivno lasersko srašćivanje (eng. <i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	STL datoteka (eng. <i>Standard Tessellation Language</i>)

SAŽETAK

Integracijom aditivne proizvodnje i lijevanja u pješčani kalup, u ovom radu, prikazan je postupak razvoja i 3D ispisa jezgre pješčanog kalupa za izradu naprave za pozicioniranje nosača motora vozila. Proces započinje definiranjem funkcije i zahtjeva naprave za pozicioniranje. Definiranim zahtjevima i funkcijom, započinje razvoj CAD modela naprave. Završetkom razvoja CAD modela, izabrani su željeni parametri ispisa FDM tehnologijom te se ispisala jezgra pješčanog kalupa. 3D skenerom skenirao se ispisani model, kojeg se usporedilo s dimenzijama referentnog CAD modela. Ispisani model naprave, upotrijebljen je kao jezgra pješčanog kalupa, za izradu kalupne šupljine, u koju se naposljetku izlijeva aluminijska legura AlSi8Cu3.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, lijevanje u pješčani kalup, CAD, 3D ispis, 3D skeniranje

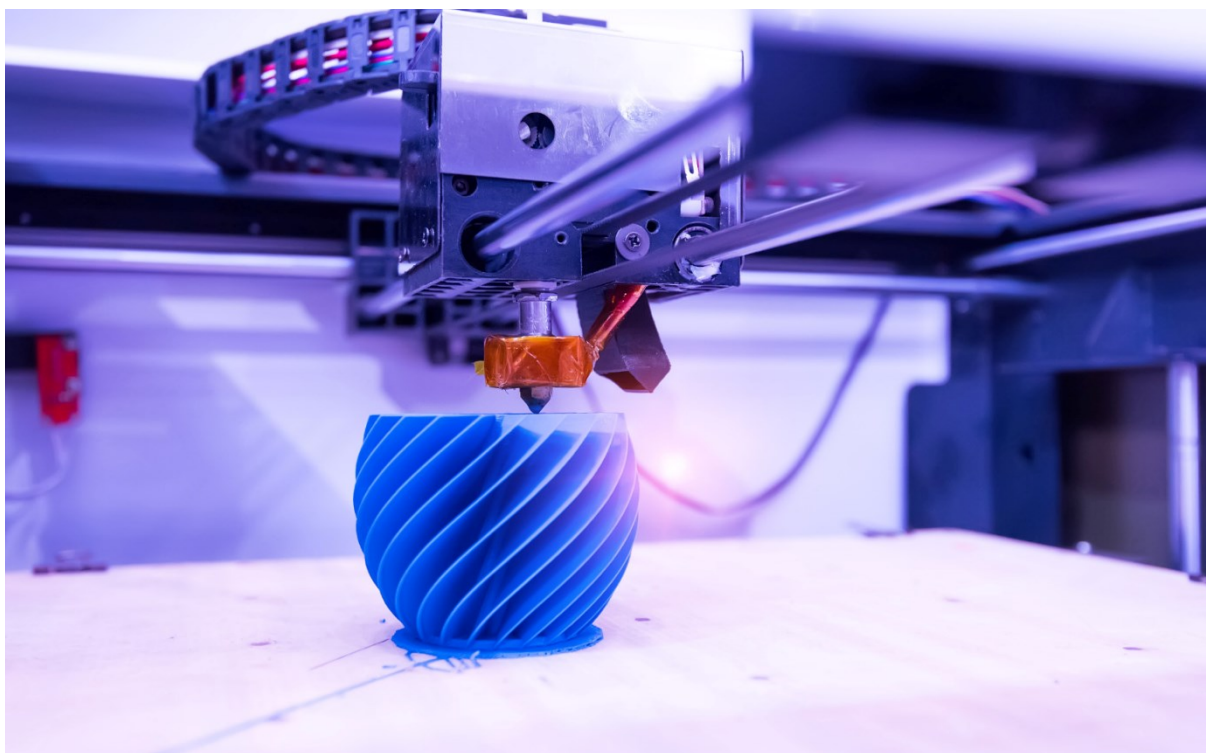
SUMMARY

Through integration of additive manufacturing and sand casting, this paper presents the process of development and 3D printing of a sand casting core for manufacture of the positioning device for vehicle engine mount. The process begins by defining the function and requirements of the positioning device. With defined requirements and function, development of the CAD model begins. After the CAD model completion, desired printing parameters are selected, by using fused deposition modeling (FDM) technology, the casting core is printed. The printed model is scanned with a 3D scanner, and then compared with dimensions of the CAD model. The printed model of the device is used as the casting core, to create a mold cavity, in which the aluminum alloy (AlSi8Cu3) is ultimately poured into.

Key words: additive manufacturing, sand casting, CAD, 3D printing, 3D scanning

1. UVOD

U današnje vrijeme, vijek trajanja proizvoda na tržištu sve je kraći, zahtjevi za varijantnošću sve su veće, proizvodi su kompleksnije geometrije. Razvijaju se novi proizvodi, prototipovi, te se takvi proizvodi u začetku proizvode u malim količinama, za što se najčešće ne isplati koristiti tradicionalnu proizvodnju, zbog troškova, ali i utroška znatno više vremena. Izravnom ili posrednom primjenom, kombinacijom više različitih tehnologija proizvodnje, aditivna proizvodnja omogućuje ispunjenje svih navedenih zahtjeva u relativno kratkom vremenu sa zadovoljavajućom kvalitetom izratka. Slika 1. prikazuje primjer izrade proizvoda korištenjem aditivne tehnologije.



Slika 1. Primjer aditivne proizvodnje proizvoda [1]

U nastavku rada bit će više riječi o aditivnim tehnologijama, lijevanjem u pješčane kalupe, posrednoj primjeni aditivne proizvodnje u kombinaciji s lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe, razvoju CAD modela jezgre pješčanog kalupa, odabiru odgovarajućih parametara 3D ispisa jezgre, kako bi se u konačnici dobio svrsishodan i kvalitetan proizvod.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing* - AM) bavi se izradom predmeta dodavanjem materijala u tankim slojevima. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnoga modela računalnim CAD programima za modeliranje, ili digitaliziranjem prostornoga oblika već postojećega objekta trodimenzionalnim skenerima. Zatim se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina ispisuju sloj po sloj do konačnog proizvoda. Tim se postupcima jednako uspješno mogu izraditi prototipovi, kalupi i alati velike preciznosti te funkcionalni dijelovi spremni za upotrebu [2].

Aditivna proizvodnja je prošla kroz različite faze tijekom svog razvoja u sklopu koncepta tzv. brzog razvoja proizvoda (eng. *Rapid Product Development* – RPD), sve s ciljem zadovoljavanja tržišnih trendova, odnosno skraćivanja vremena koje prođe od začetka ideje do izlaska proizvoda na tržište. RPD prije svega podrazumijeva konstruiranje i izradu s pomoću računalnih CAD/CAM programa, koje u konačnici karakteriziraju aditivnu proizvodnju [3].

Tri su osnovne izvedbe aditivne proizvodnje [4]:

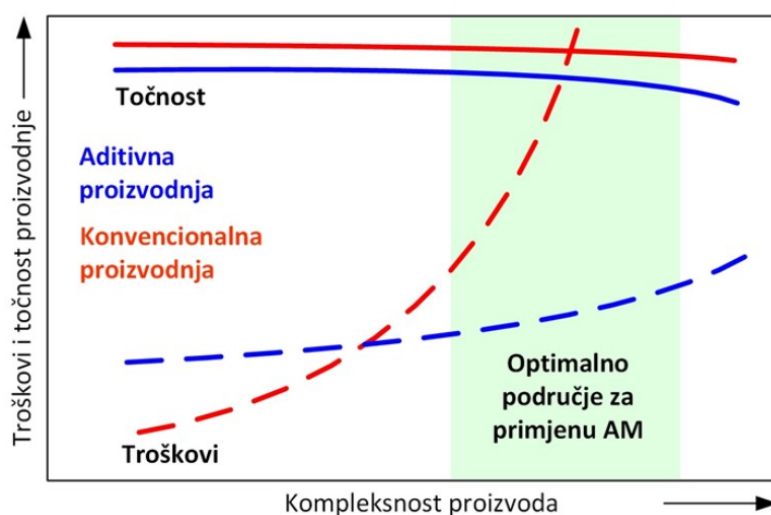
- RP (eng. *Rapid Prototyping*) – brza proizvodnja prototipova
- RT (eng. *Rapid Tooling*) – brza proizvodnja alata i kalupa
- RM (eng. *Rapid Manufacturing*) – brza (izravna) proizvodnja.

Sva tri područja koriste slojevit (aditivnu) tehniku slaganja materijala, ostvarujući na taj način kompleksne geometrijske oblike izravno iz računalnih podataka u vrlo kratkom vremenu. Važno je napomenuti da riječ „brzo“ nije u potpunosti definiran pojam, jer trajanje pojedinog postupka varira od nekoliko minuta pa sve do nekoliko dana. Pod RP skupinom proizvoda podrazumijevaju se prototipovi ili modeli koji simuliraju kasnije gotove proizvode, njihove oblike ili prosječne gabarite. Nadalje, postupcima brze izrade alata i kalupa (RT) izrađuju se alati i kalupi te njihovi kompliciraniji dijelovi koji će se koristiti u prototipnim serijama.

Često se kombinira postupak brze izrade s onom klasičnom, što u konačnici dovodi do više kvalitete proizvoda. Na posljetku, brza proizvodnja (RM) predstavlja postupke izrade gotovih proizvoda, kasnije korištenih i u velikoserijskoj proizvodnji. Međutim, nedostatak RM

postupaka se očituje u malom broju pogodnih materijala čiji je razvitak u zadnjem desetljeću u znatnom porastu. U začetcima, svaki od prethodno navedenih pojmova koristio se kao zaseban izraz, ali naglom ekspanzijom i napretkom posljednjih godina, aditivna proizvodnja jest pojam koji od 2009. godine objedinjuje sve tri grane brze proizvodnje [3,4,5].

Slika 2. prikazuje optimalno područje primjene aditivne proizvodnje u odnosu na konvencionalnu proizvodnju, uzimajući u obzir troškove i točnost proizvodnje, kao i kompleksnost proizvoda.



Slika 2. Optimalno područje primjene aditivne proizvodnje [4]

2.1. Povijest razvoja aditivne proizvodnje

Prvi pokušaj stvaranja čvrstih objekata s pomoću fotopolimera i laserske tehnologije dogodio se kasnih šezdesetih godina prošloga stoljeća u „Battelle Memorial“ institutu. Eksperiment je uključivao presijecanje dviju laserskih zraka različitih valnih duljina u sredini posude smole, pokušavajući polimerizirati materijal na mjestu križanja zraka. Fotopolimernu smolu, koja se koristila u procesu, izumila je 1950-tih tvrtka DuPont [6].

1967. godine Wyn K. Swainson aplicira se za patent pod nazivom „Metode iz 3D objekta s pomoću holografije“ primjenjujući postupak s dvostrukim laserom izvedenim 1950-tih godina [6].

U kolovozu 1982., Alan Herbert iz 3M Laboratorija za sektor grafičkih tehnologija objavio je rad pod nazivom „Solid Object Generation“. U ovom radu Herbert je opisao sustav koji usmjerava lasersku zračnu zonu argona na površinu fotopolimera s pomoću sustava zrcala povezanog s uređajem xy plotera. S tim sustavom Herbert je uspio stvoriti nekoliko manjih, osnovnih oblika [6].

Prva industrijska primjena aditivne tehnologije realizirana je 1987. godine, u sklopu tvrtke 3D Systems (SAD), gdje je predstavljen uređaj za postupak stereolitografije (eng. *Stereolithography, SL/SLA*). Postupak je omogućivao očvršćivanje kapljevitog fotopolimera osjetljivog na djelovanje ultraljubičastog zračenja u tankim slojevima s pomoću lasera [6].

Godine 1988., 3D Systems zajedno s partnerom Ciba–Geigy razvijaju i komercijaliziraju prvu generaciju akrilnih smola korištenih za proces stereolitografije. Kroz 1988. i 1989. godinu, u Japanu unutar tvrtke NTT Dana CMET, razvija se postupak stereolitografije gdje se po prvi puta koriste epoksidne smole [6].

Početak 90-ih uz SLA tehnologiju, komercijalizirane su tri nove tehnologije: postupak očvršćivanja taloženjem (eng. *Fused deposition modeling, FDM*), tonografija (eng. *Solid Ground Curing, SGC*) i laminiranje (eng. *Laminated object manufacturing, LOM*). FDM se temelji na ekstrudiranju i taloženju rastaljenog plastomernog materijala, SGC koristi kapljevite polimere osjetljive na UV zračenje, dok LOM postupak povezuje i razrezuje materijale s pomoću računalno upravljane laserske zrake. Također se javlja i novi postupak selektivnog laserskog srašćivanja (eng. *Selective Laser Sintering, SLS*), gdje se praškasti materijal spaja djelovanjem topline lasera [6].

U SAD-u se 1996. godine, unutar tvrtke Z Corporation, razvio pisac za konceptijsko modeliranje koji se temelji na postupku 3D ispisa (eng. *3D Printing, 3DP*) prototipova od škroba, gipsa u obliku praška te kapljevitih veziva. Iste godine tvrtka Schroff Development počinje s prodajom sustava za laminiranje papira [6].

Godine 1997. osniva se tvrtka AeroMet, te razvija sustav koji koristi laser visoke snage te srašćuje dodane čestice koje se koriste za izradu proizvoda od titanovih legura, tj. laserska aditivna proizvodnja (eng. *Laser Additive Manufacturing, LAM*). Do napuštanja tog projekta u prosincu 2005. godine AeroMet je proizvodio dijelove za zrakoplovnu industriju kao pružatelj usluga [7].

Godine 1999. Fockele&Schwartz (Njemačka) predstavlja svoj prvi sustav temeljen na selektivnom laserskom taljenju metalnog praha (eng. *Selective Laser Melting, SLM*) [6].

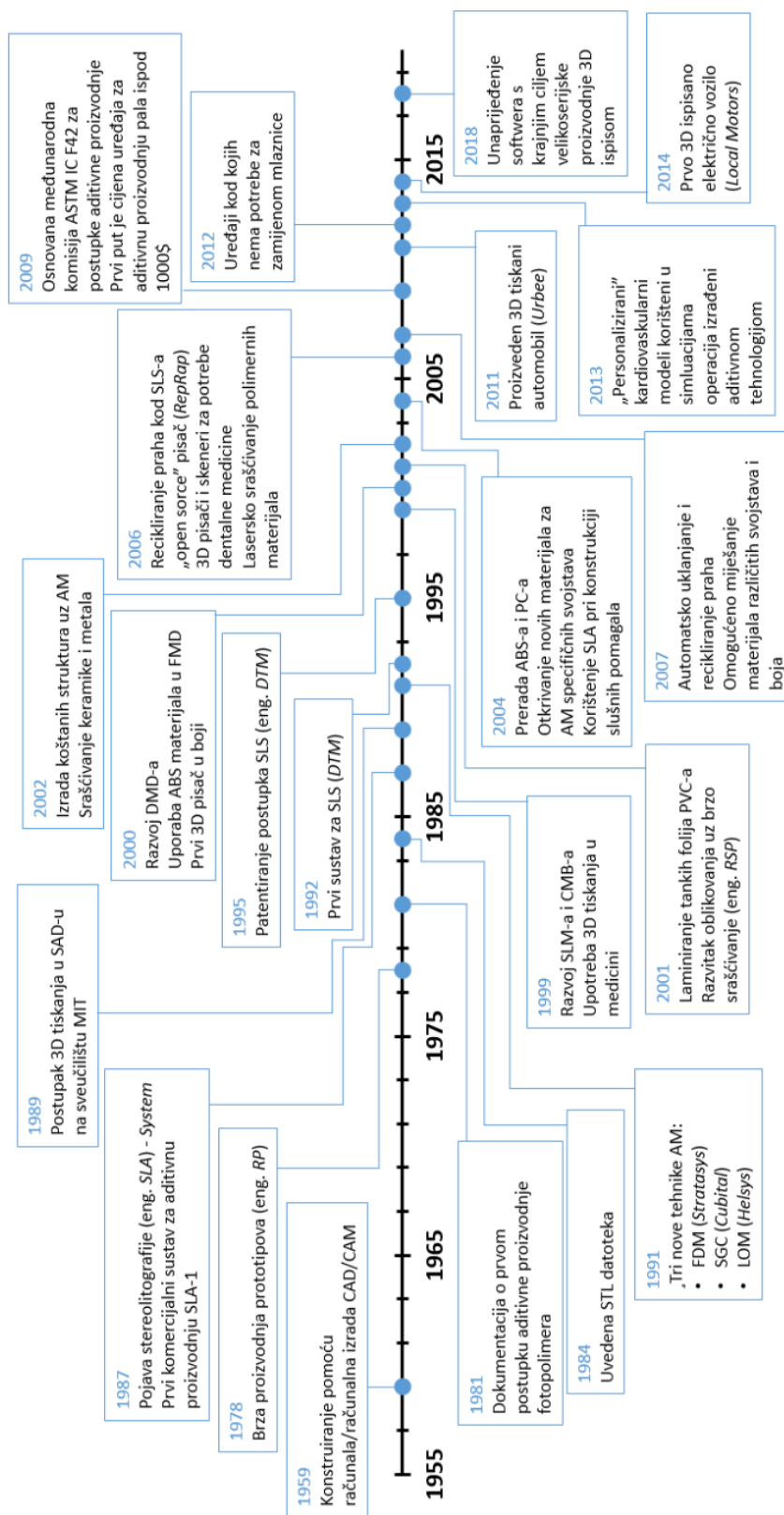
Godine 2000. predstavlja se postupak izravnog taloženja metala (eng. *Direct Metal Deposition, DMD*), proces laserskog oblaganja koji proizvodi i popravlja dijelove koji koriste metalni prah [6].

Krajem 2001. godine EnvisionTEC iz Njemačke predstavlja tehnologiju koja koristi akrilni fotopolimer i tehnologiju digitalne obrade svjetlom (eng. *Digital Light Processing, DLP*) [6].

Godine 2009. osnovana je međunarodna komisija ASTM Committee F42 za aditivnu tehnologiju. Osnovana je između tadašnjih 70 članica diljem svijeta i stvorena kako bi se postavili standardi za kontrolu, procese, materijale, konstrukciju (uključujući i oblike formata datoteka) te terminologiju. Te se godine, prema normi ASTM F42, službeno uvodi naziv aditivna proizvodnja (Additive Manufacturing) i njena definicija glasi: „Aditivna proizvodnja je proces spajanja materijala za izradu modela izravno iz 3D modela, obično tehnikom sloj po sloj, za razliku od suptraktivne proizvodnje i formativne proizvodne metodologije.“ [8]

U rujnu 2011. godine, ASTM F42 i ISO/TC 261 potpisuju sporazum o suradnji dviju organizacija i zajedničkom sudjelovanju u razvoju međunarodnih normi na globalnom tržištu u području aditivne proizvodnje. Time je postavljena standardizacija AM procesa u tri razine; generalni AM standardi (koncepti, zahtjevi i primjene), kategorija AM standarda (kategorija materijala i procesa) te specifični AM standardi (pojednosti o materijalima, procesima i primjeni) [8].

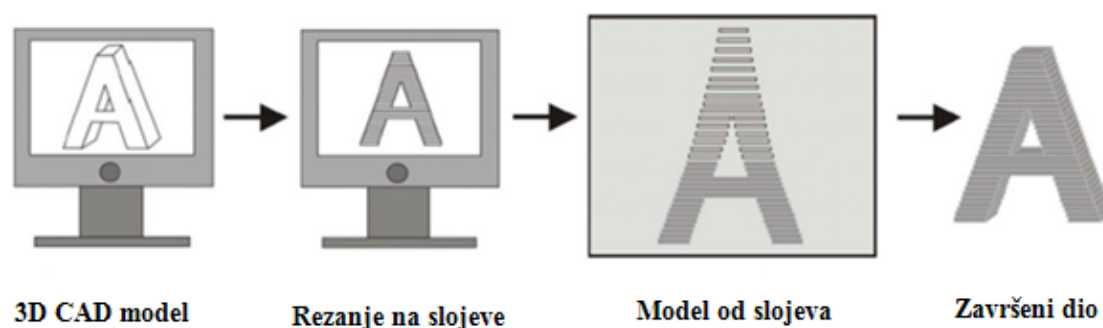
Slika 3. prikazuje razvoj aditivnih tehnologija tijekom godina.



Slika 3. Povijest razvoja aditivnih tehnologija [9]

2.2. Faze izrade proizvoda aditivnom proizvodnjom

Načelo izrade proizvoda u aditivnoj proizvodnji temelji se na generativnom (generičkom) načelu gradnje tvorevina sloj po sloj. 3D model konstruiran računalom izreže se na dvodimenzionalne slojeve jednakih debljina, koji se slažu jedan na drugi. Tako se postiže trodimenzionalni oblik, sa stepenastim izgledom površine, upravo zbog načela slaganja sloj po sloj [10]. Slika 4. prikazuje gradnju tvorevina slaganjem dvodimenzionalnih slojeva jednakih debljina.



Slika 4. Proces izrade proizvoda sloj po sloj [11]

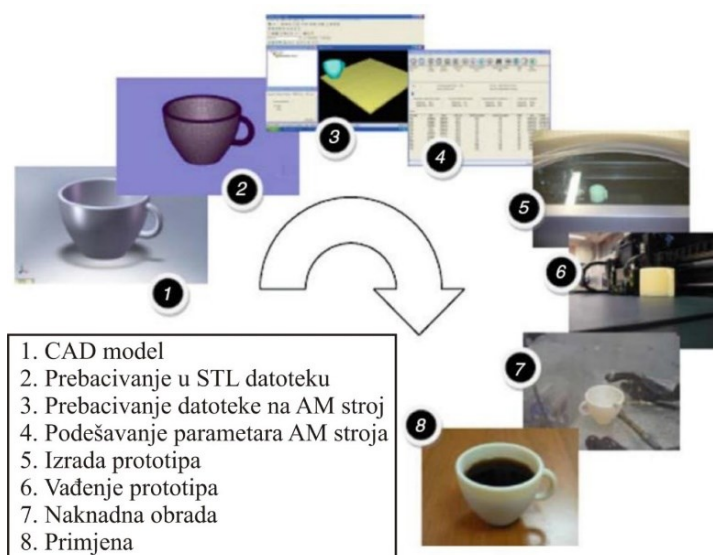
Faze aditivne proizvodnje [Slika 5], neovisno koji postupak se upotrebljava, mogu se podijeliti na sljedeće [4]:

- ❖ generiranje CAD model (konstruiranje, skeniranje..)
- ❖ konverzija CAD modela u STL datoteku i rezanje u slojeve
- ❖ transfer STL datoteke na uređaj za AM
- ❖ podešavanje parametara AM uređaja
- ❖ izrada/proizvodnja prototipa/proizvoda
- ❖ uklanjanje prototipa/proizvoda iz AM uređaja
- ❖ dodatna obrada (ukoliko je potrebna)
- ❖ primjena prototipa/proizvoda.

Postupak aditivne proizvodnje započinje izradom 3D geometrijskog modela u CAD programu. Takav model sprema se u različitim formatima, no već od 1987. tvrtka 3D Systems uvodi STL datoteku (eng. *Standard Tessellation Language*), koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokuta.

Godine 2009. uvedena je AMF datoteka (eng. *Additive Manufacturing File*), koja uz STL postaje standard za postupke aditivne proizvodnje i čini osnovu za rezanje u slojeve, na čemu se temelje svi postupci aditivne proizvodnje. AMF datoteka predstavlja jedan ili više objekata raspoređenih u vektore. Svaki je objekt opisan kao skupina nepreklopljenih volumena koji su opisani kao mreža trokuta koja povezuje skupinu točaka. Te se točke mogu podijeliti između volumena. AMF datoteka može opisati materijal i boje pojedinog volumena te boju svakog trokuta u mreži.

Nakon podešavanja parametara stroja (debljina sloja, snaga, brzina itd.) slijedi pravljenje prototipa/proizvoda te, nakon završetka zadnjeg sloja, vađenje gotovog prototipa/proizvoda iz uređaja. Pri nekim postupcima (npr. stereolitografija, 3DP) potrebno je naknadno umrežavanje kako bi se završio proces polimerizacije i poboljšala mehanička svojstva gotovog prototipa/proizvoda, jer unutarnji dijelovi slojeva možda nisu potpuno očvršnuti. Slijedi naknadna obrada (čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture, bojenje...) [10].



Slika 5. Faze aditivne proizvodnje [10]

2.3. Tehnologije aditivne proizvodnje

Tehnologije aditivne proizvodnje mogu se podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (žice, folije, papir), kapljevinu ili prah.

Materijal u čvrstom stanju primjenjuje se kod taložnog očvršćivanja i proizvodnje laminiranih objekata.

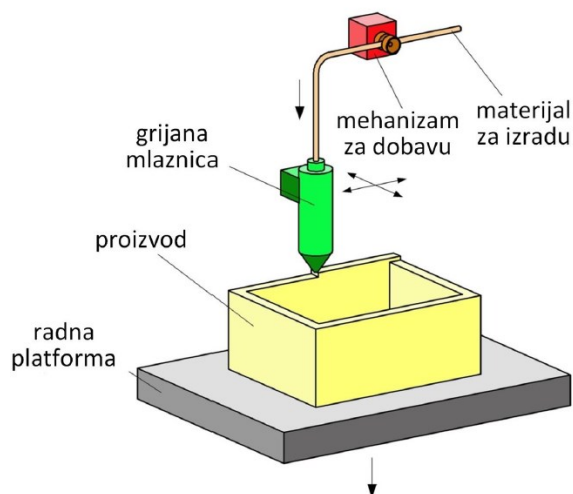
Kapljevinu se primjenjuje kod stereolitografije, očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom te kod PolyJet-a.

Postupci koji koriste prah su selektivno lasersko očvršćivanje i 3D ispis.

Najčešće se pri aditivnim postupcima upotrebljavaju polimerni materijali kao što su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani, epoksidne smole, ali i čelik, aluminij, titan i druge lake legure. Za izbor materijala najvažniji su čimbenici: željena mehanička svojstva i pogodnost za korištenje kao završne tvorevine, jednostavnost završne obrade, niža cijena materijala i olakšano rukovanje te skladištenje materijala [10].

2.3.1. Postupak očvršćivanja taloženjem (FDM)

Postupak očvršćivanja taloženjem bazira se na postupku izrade proizvoda sloj po sloj, koristeći najčešće rastaljeni polimerni materijal. Prilikom izrade kompleksnije geometrije potrebno je koristiti suportnu strukturu. Sama kvaliteta površine proizvoda uspoređuje se s SLS postupcima, ali proizvodi su porozniji. Mogućnost povišenja gustoće proizvoda omogućena je naknadnim postupkom prodiranja punila u sam proizvod [4]. Slika 6. prikazuje FDM postupak i elemente koji su potrebni za njegovo korištenje.



Slika 6. FDM postupak [4]

Polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz ekstruzijsku mlaznicu kroz koju se kontrolira protok materijala. Mlaznica se grije kako bi dosegla temperaturu tališta materijala, te ima mogućnost kretanja u horizontalnim i vertikalnim smjerovima. Putanja mlaznice je kontrolirana od strane programskog sustava za upravljanje. Pisač putanju određuje u odnosu na prethodno učitani 3D model koji se želi ispisati. Dio se izrađuje postepenim ekstrudiranjem termoplastičnog materijala sloj po sloj. Prilikom doticaja s podlogom ili prethodno izrađenim slojem, pri pomicanju mlaznice materijal se gotovo trenutačno skrućuje. Tablica 1. prikazuje prednosti i nedostatke FDM aditivne tehnologije.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci FDM tehnologije [4]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • Manja potrošnja energije • Veliki potencijal za smješavanje novih materijala • Relativno jednostavni pisači • Jednostavno održavanje i uporaba • Relativno mala investicija/niski troškovi održavanja 	<ul style="list-style-type: none"> • Ispis je moguć samo u X-Y ravnini • Potrebna je suportna struktura (ovisno o geometriji proizvoda) • Vidljiv stepeničasti efekt na bočnim stijenkama • Moguća delaminacija ispisanog proizvoda • Razlučivost proizvoda i kvaliteta površine su niži od procesa koji se temelje na preradi kapljevutih materijala

Materijali koji se mogu koristiti ovim postupkom su raznoliki, uključujući PA, ABS, PEEK, PET, PC, kao i keramika, metali, kompoziti, i ostalo.

Slika 7. i Slika 8. prikazuju primjere proizvoda od ABS-a, PA-a i drva, dobivenih korištenjem FDM postupka.



Slika 7. Primjer proizvoda od ABS-a (lijevo) i PA-a (desno) [4]

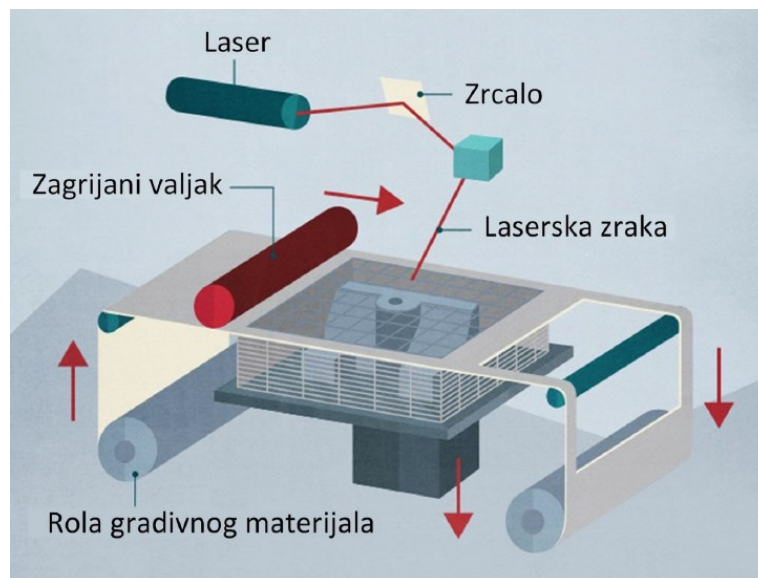


Slika 8. Primjer proizvoda od drva [4]

2.3.2. Laminiranje (LOM)

U procesu izrade proizvoda putem LOM tehnologije, zagrijani valjak prelazi preko radne površine (ili prethodnog sloja) kako bi se jedan sloj materijal mogao zalijepiti za drugi. Zatim se pomoću laserske zrake (rezanje korištenjem CO₂ lasera ili noža) izrezuje kontura presjeka dijela proizvoda kojeg se izrađuje, tj. izrezuje se dio materijala koji se ne koristi kao budući proizvod, a zatim zagrijani valjak ponovno prelazi kako bi nanio novi sloj materijala. Radna podloga se potom spušta za debljinu idućeg sloja, te se cijeli proces ponavlja dok proizvod nije gotov. Na kraju procesa, višak materijala se odstranjuje s platforme kako bi se olakšalo odvajanje gotovog proizvoda s radne podloge [12]. Slika 9. prikazuje LOM postupak i elemente koji su potrebni za njegovo korištenje.

Materijali: papir, PVC, kompozitne folije, metali,... [4]

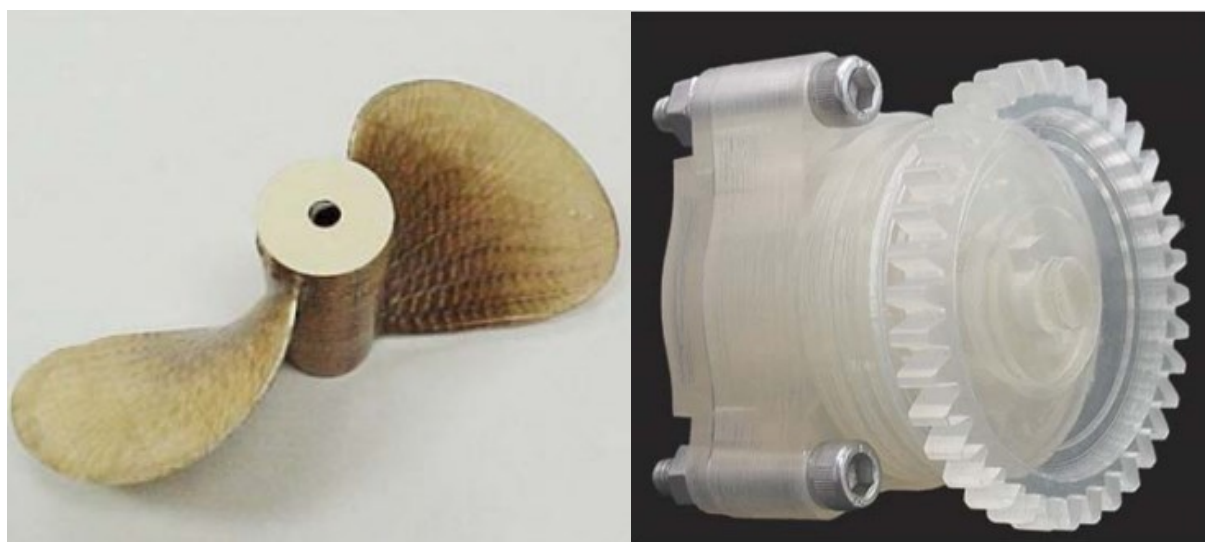


Slika 9. LOM postupak [4]

Tablica 2. prikazuje prednosti i nedostatke LOM tehnologije. Slika 10. prikazuje dva primjera proizvoda izrađenih korištenjem LOM aditivne tehnologije.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci LOM tehnologije [4]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • Ekonomičniji postupak za veće proizvode (velika brzina izrade) • Relativno jeftin građivni materijal (npr. papir) • Suportna struktura nije potrebna • Visoka točnost ispisanih dijelova • Primjena neotrovnih materijala 	<ul style="list-style-type: none"> • Naizmjenični slojevi <i>građivni materijal/sredstvo za povezivanje</i> (anizotropija mehaničkih svojstava, nehomogenost proizvoda) • Do 90% neiskorištenog materijala • Neiskorišteni materijal se više ne može koristiti • Uklanjanje viška materijala može biti vrlo otežano i uzrokovati oštećivanja ispisanog proizvoda • Suženo područje primjene – svojstva materijala (npr. papir)



a)

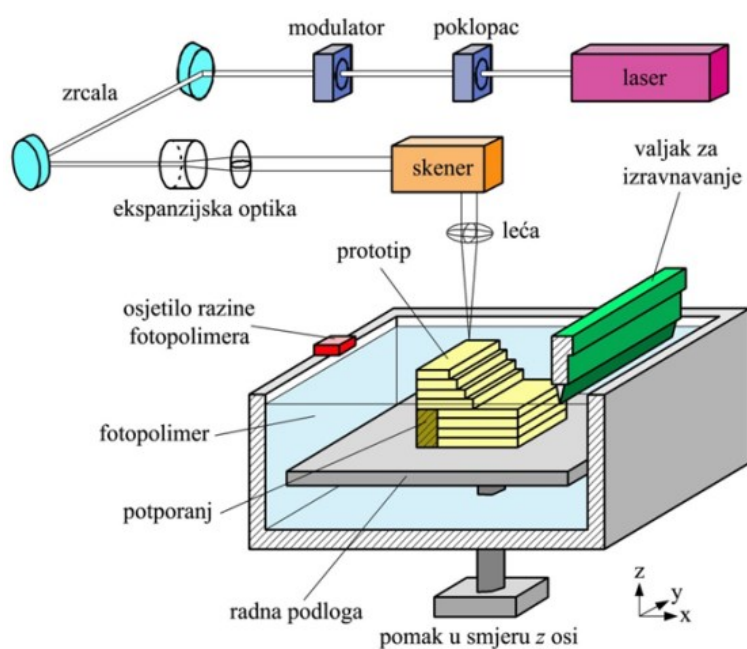
b)

**Slika 10. Primjer proizvoda izrađenih LOM tehnologijom:
a) tvorevina od papira, b) tvorevina od PVC-a [4]**

2.3.3. Stereolitografija (SL/SLA)

Jedna od najčešće upotrebljivanih tehnologija aditivne proizvodnje jest stereolitografija. Proces se temelji na fotolitografskim metodama s UV polimerizacijom. Stereolitografijom proizvodi nastaju polimeriziranjem niskoviskozne polimerne kapljevine sloj po sloj. Unutar komore ispunjene kapljevitim fotopolimerom nalazi se radna podloga koja ostvaruje pomak u smjeru Z osi. Radna podloga uronjena je u fotopolimer do one razine koja odgovara debljini sloja te se s pomoću uređaja za niveliranje poravnava, kako bi se na cijeloj površini podloge nalazila jednaka debljina materijala. Preko lasera i skenera, zraka obasjava kapljeviti materijal u konturama proizvoda, čime se ostvaruje prvi sloj proizvoda. Potom se radna podloga spušta po Z osi za debljinu idućeg sloja, koji se poravnava uređajem za niveliranje, a zatim obasjava zrakom koja ga očvršćuje. Ovaj se postupak ponavlja sve do dobivenog gotovog proizvoda [4]. Slika 11. prikazuje SL/SLA postupak i elemente koji su potrebni za njegovo korištenje.

Materijali: epoksidi, akrilati, vinili (smole-kapljevine),... [4]

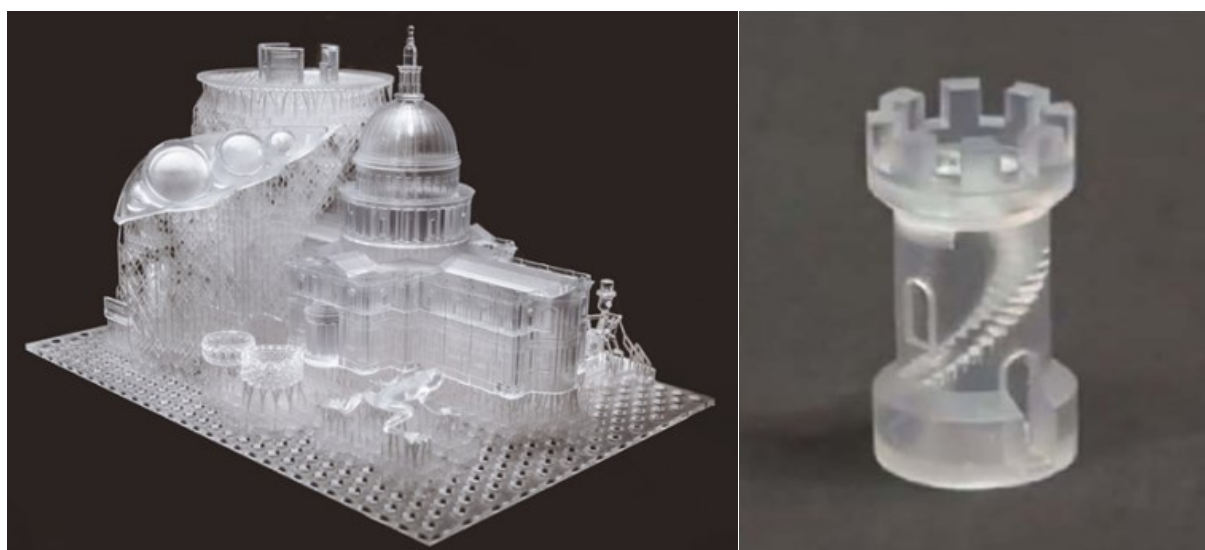


Slika 11. SL/SLA postupak [4]

Tablica 3. prikazuje prednosti i nedostatke SL/SLA tehnologije. Slika 12. prikazuje dva primjera proizvoda izrađenih korištenjem SL/SLA aditivne tehnologije.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci SL/SLA tehnologije [4]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • Visoka kvaliteta površine ispisanog proizvoda • Visoka razlučivost detalja na ispisanom proizvodu • Visoka točnost (tehnologije temeljene na preradi kapljevutih materijala za sada su najtočnije tehnologije 3D ispisa) • Široki raspon materijala • Mogućnosti višekomponentnog i višebojnog 3D ispisa 	<ul style="list-style-type: none"> • Ispis moguć samo u X-Y ravnini na radnoj platformi • Zahtijeva suportni materijal i njegovo uklanjanje nakon ispisa • Neki procesi zahtijevaju dodatno umreživanje (UV svjetlost) • Dodatno umreživanje može uzrokovati neželjene deformacije • Fotopolimeri u kapljevitom stanju općenito su otrovni • Proces u kojima se koristi laserska zraka su uglavnom spori • Visoki troškovi materijala i održavanja



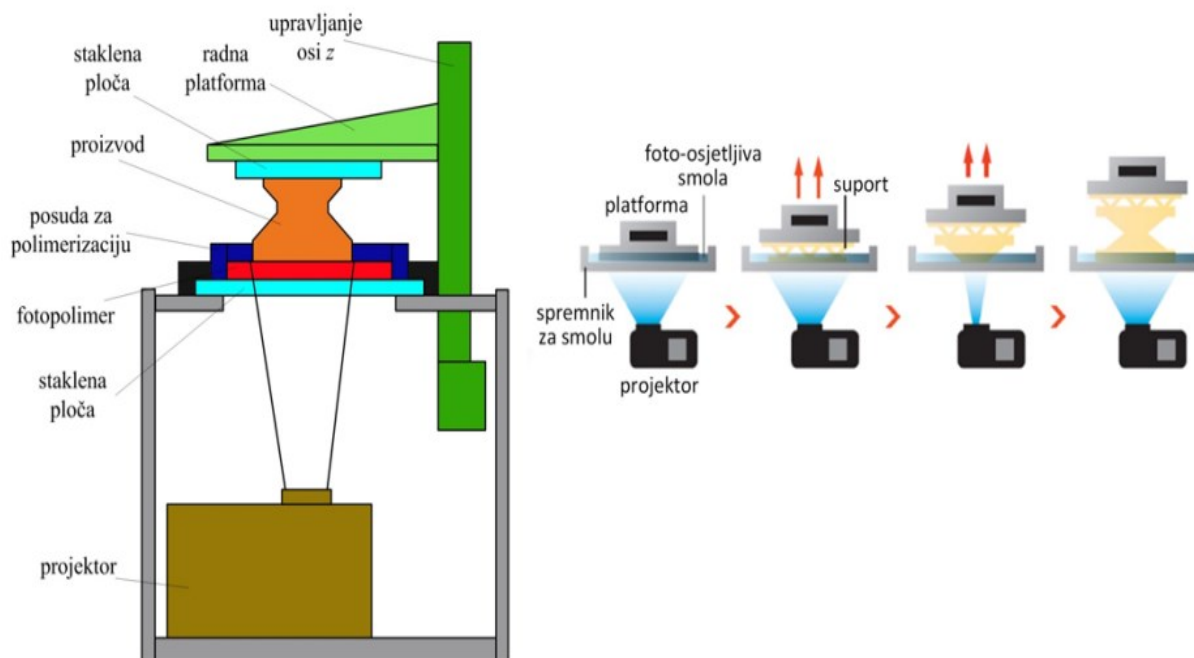
Slika 12. Primjer proizvoda izrađenih SL/SLA tehnologijom [4]

2.3.4. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP)

Proces očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom je sličan procesu stereolitografije jer je to proces 3D tiska koji koristi fotopolimere. Glavna razlika je izvor svjetlosti. DLP koristi konvencionalni izvor svjetlosti, koji se primjenjuje na cijelu površinu posude fotopolimerne smole u jednom prolazu, što ga čini bržim od stereolitografije. Također DLP proizvodi vrlo precizne dijelove, ali također uključuje potrebu za suportnom strukturom i naknadno stvrđnjavanje. Međutim, prednost DLP-a je manja količina otpada i manji troškovi rada.

Posuda tekućeg polimera izložena je svjetlosti s DLP projektora. DLP projektor prikazuje sliku 3D modela na tekući polimer. Izloženi tekući polimer se stvrdne, ploča za gradnju se pomiče, a tekući polimer ponovno je izložen svjetlosti. Postupak se ponavlja dok se ne završi 3D model, a posuda isprazni od tekućine, otkrivajući očvršćeni model [13]. Slika 13. prikazuje DLP postupak i elemente koji su potrebni za njegovo korištenje.

Materijali: akrilati (smole-kapljevine) [4]



Slika 13. DLP postupak [4]

Tablica 4. prikazuje prednosti i nedostatke DLP tehnologije. Slika 14. prikazuje dva primjera proizvoda izrađenih korištenjem DLP aditivne tehnologije.

Tablica 4. Prednosti i nedostaci DLP tehnologije [4,14]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none">• Velika brzina ispisa• Različita područja primjene• Visoka kvaliteta ispisa• Velika sloboda dizajna• Održivost	<ul style="list-style-type: none">• Ispis moguć samo u X-Y ravnini na radnoj platformi• Zahtijeva suportni materijal• Visoka cijena tehnologije• Ograničen broj primjenjivih materijala



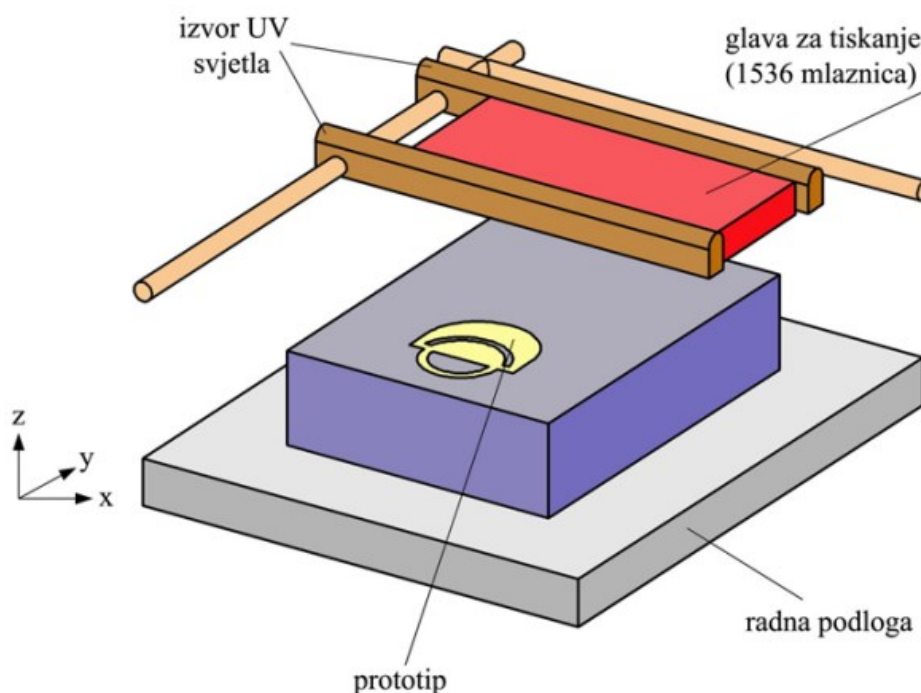
Slika 14. Primjer proizvoda izrađenih DLP tehnologijom [14]

2.3.5. PolyJet

PolyJet je tehnologija aditivne proizvodnje koja koristi kapljevite materijale. Nastala je 2000. godine sjedinjenjem dobrih strana stereolitografije i 3D ispisa. Primjenjuju se dva različita materijala: jedan za model, drugi za potporna strukturu. Nakon završetka izrade prototipa, potporna struktura se uklanja ručno ili pod djelovanjem mlaza vode pod visokim tlakom.

Mreža mlaznica kliže naprijed - nazad i nanosi sloj fotoosjetljivog polimernog materijala na radnu podlogu, debljine 16 μm , što je 1/5 debljine stereolitografskog sloja. Nakon dovršetka jednog sloja, radna podloga se spušta za debljinu drugog radnog sloja. Kao i kod stereolitografije očvršćivanje polimera se odvija uslijed djelovanja UV svjetlosti. Svaki sloj očvršćuje odmah nakon ispisa te na taj način nastaje potpuno umrežen prototip [15]. Slika 15. prikazuje PolyJet postupak i elemente koji su potrebni za njegovo korištenje.

Materijali: foto-osjetljive akrilne smole u kapljevitom stanju [4]



Slika 15. PolyJet postupak [4]

Tablica 5. prikazuje prednosti i nedostatke PolyJet tehnologije. Slika 16. prikazuje tri primjera proizvoda izrađenih korištenjem PolyJet aditivne tehnologije.

Tablica 5. Prednosti i nedostaci PolyJet tehnologije [4,15]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none">• Dobra kvaliteta površine proizvoda• Postojanost dimenzija• Modeli mogu biti od kombiniranih materijala• Višekomponentni/višebojni ispis	<ul style="list-style-type: none">• Potreba za suportnom konstrukcijom• Potrebna peć za otapanje potporne konstrukcije• Visoki troškovi materijala

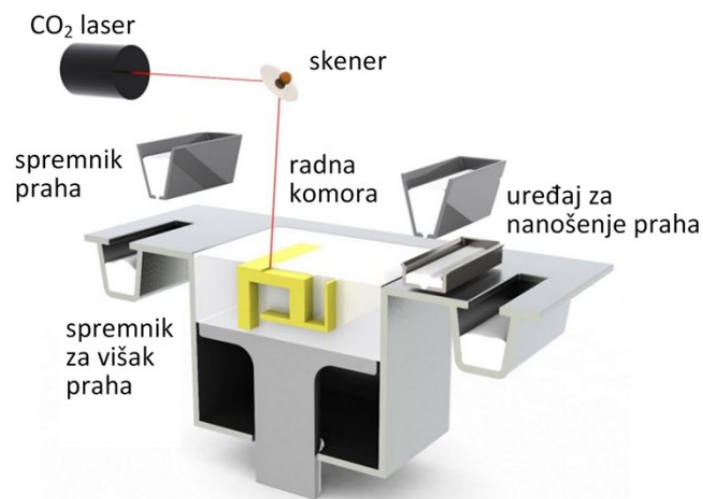


Slika 16. Primjer proizvoda izrađenih PolyJet tehnologijom [4]

2.3.6. *Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)*

SLS postupak temelji se na srašćivanju praškastih materijala pomoću CO₂ lasera. Uređaj za nanošenje praha postavlja sloj materijala na radnu podlogu koja se nalazi u temperiranoj komori ispunjenoj inertnim plinom. Taj se sloj praškastog materijala skenira laserom čineći konturu površine tog sloja i dolazi do međusobnog srašćivanja čestica materijala. Radna podloga se spušta u negativnom smjeru osi z čime se prevlači novi sloj praha preko prethodno otisnute površine i ponovno očvršćuje djelovanjem laserske zrake [8]. Slika 17. prikazuje SLS postupak i elemente koji su potrebni za njegovo korištenje.

Materijali: PA, PC, PS, PEEK, metali (čelik, aluminij, titan, zlato, kobalt-krom,...), keramika i mješavine materijala (gradivni materijal i vezivo),... [4]

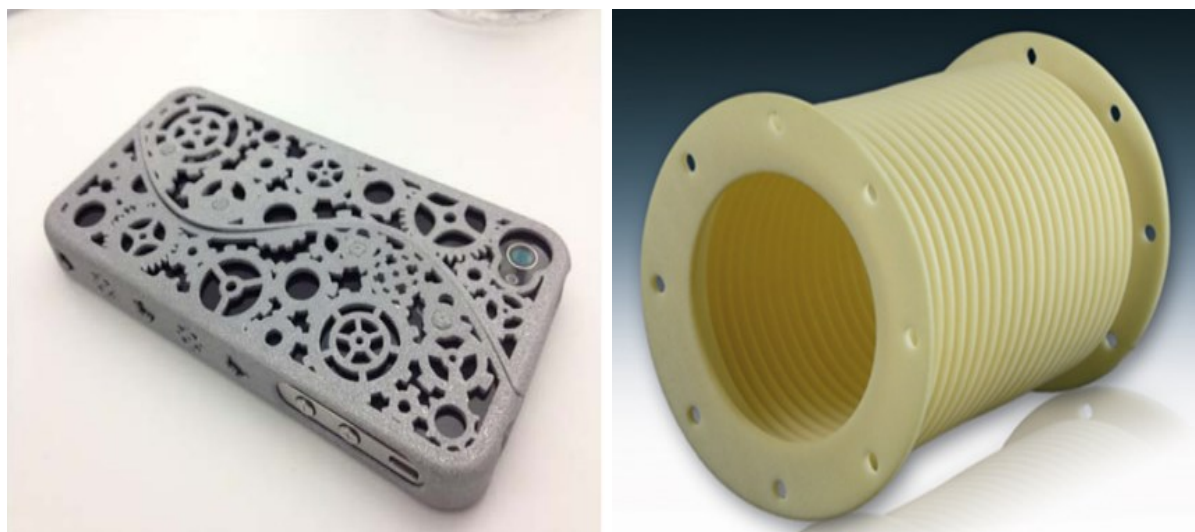


Slika 17. SLS postupak [4]

Tablica 6. prikazuje prednosti i nedostatke SLS tehnologije. Slika 18. prikazuje dva primjera proizvoda izrađenih korištenjem SLS aditivne tehnologije.

Tablica 6. Prednosti i nedostaci SLS tehnologije [4]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • Široki izbor praškastih materijala • Moguća proizvodnja finalnih dijelova/prototipova u originalnom materijalu • Suportne strukture uglavnom nisu potrebne • Moguć ispis u čitavom volumenu radne komore • Većina neiskorištenog materijala može se ponovo koristiti 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativno niska kvaliteta površine (hrapavost) • Prerada pri višim temperaturama - hlađenje/deformacija proizvoda • Dugo vrijeme hlađenja velikih proizvoda • Nije moguća izrada proizvoda u boji • Proizvodi su porozni

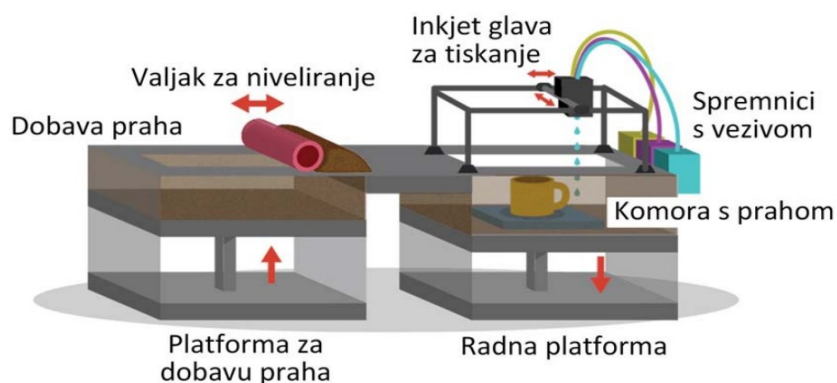


Slika 18. Primjer proizvoda izrađenih SLS tehnologijom [4]

2.3.7. 3D ispis (3DP)

U skupinu brzih postupaka aditivne slojevite proizvodnje spada postupak 3D ispisa. Radi se o pouzdanom, jeftinom i vrlo brzom stroju koji omogućuje izradu 3D proizvoda pomoću računalnih modela, te je pristupačan za uredske uvjete pošto nema razvijanja štetnih tvari tijekom procesa proizvodnje. 3D ispis je postupak koji koristi praškaste materijale, ali oni se, za razliku od SLS postupka, povezuju pomoću kapljevito veziva. Na radnu podlogu, koja se nalazi unutar komore, nanosi se sloj praškastog materijala te ink-jet glava raspršuje vezivo u površini donjeg presjeka, nakon čega se radna podloga spušta prema dolje i na nju se nanosi sljedeći sloj praškastog materijala [7,8]. Slika 19. prikazuje 3DP postupak i elemente koji su potrebni za njegovo korištenje.

Materijali: polimeri, celuloza, šećer, metali, gips, pijesak,... [4]



Slika 19. 3DP postupak [4]

Tablica 7. prikazuje prednosti i nedostatke 3DP tehnologije. Slika 20. prikazuje dva primjera proizvoda izrađenih korištenjem 3DP aditivne tehnologije.

Tablica 7. Prednosti i nedostaci 3DP tehnologije [4]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • Mogućnost višebojnog ispisa dijelova • Velika brzina ispisa • Nije potrebna suportna struktura • Mala potrošnja energije • Neupotrijebljeni materijal se može ponovo koristiti • Vrlo brza izmjena materijala i veziva • Relativno niske cijene pisača i materijala (u usporedbi sa SLS ili SLA procesima) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativno niska kvaliteta površine (hrapavost) • Za veće dijelove dimenzijske tolerancije su lošije u usporedbi sa SLS ili SLA procesima • Nakon ispisa dijelovi su vrlo krhki – potrebna naknadna obrada (npr. infiltracija ljepila)



Slika 20. Primjer proizvoda izrađenih 3DP tehnologijom [4]

3. LIJEVANJE U PIJESAK

Lijevanje je tehnologija oblikovanja predmeta kojom se rastaljeni metal oblikuje ulijevanjem u kalup u kojem skrućivanjem poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine. Lijevanje se rabi više od 5000 godina za proizvodnju odljevaka definiranoga geometrijskog oblika i svojstava. U tom razdoblju tehnologija se kontinuirano razvijala, tako da se danas mogu proizvesti visoko zahtjevne metalne komponente složene geometrije pomoću najmodernijih mehaniziranih i automatiziranih uređaja. Izrada kvalitetnih odljevaka traži veliku vještinu jer proces nastajanja odljevka nije vidljiv, odnosno metal popunjava zatvoreni kalup. Za razvoj ljevačkih postupaka potrebna su znanja iz područja kemije, znanosti o metalima, fizike, mineralogije, strojarstva, elektrotehnike i metalurgije [16]. Slika 21. prikazuje postupak lijevanja taljevine u kalupe.



Slika 21. Lijevanje u kalupe [17]

Lijevanje u pijesak (ili pješčani lijev) je jedan od najstarijih, najrašireniji i najfleksibilnijih postupaka lijevanja. Spada u kategoriju lijevanja u jednokratne kalupe, a njime je moguće proizvesti od najsitnijih odljevaka, do odljevaka mase preko 100 tona, od svih ljevačkih legura te služi za serijsku i pojedinačnu proizvodnju. Iz ekonomskog aspekta, lijevanje u pijesak je vrlo povoljno, jer se oko 95% materijala za izradu novog kalupa od prethodnog može ponovno upotrijebiti. Materijal za izradu jednokratnih kalupa zove se kalupna mješavina [18]. Tablica 8. prikazuje prednosti i nedostatke lijevanja u pijesak.

Tablica 8. Prednosti i nedostaci lijevanja u pijesak [18]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • Mogućnost proizvodnje odljevaka složene geometrije • Relativno jeftin postupak • Moguća proizvodnja vrlo velikih odljevaka • Pijesak je lako dostupan • Pijesak je moguće ponovno upotrijebiti 	<ul style="list-style-type: none"> • Kvaliteta površine – potrebna strojna obrada • Pijesak zahtjeva obradu i pripremu • Potrebne su specifične vještine radnika


3.1. Modeli

Model je reprezentacija gotovog odljevka. On je pozitiv od kojeg, nakon sabijanja kalupne mješavine, nastaje negativ - kalupna šupljina. Ako nije dimenzijski postojan, nije moguće izraditi dva približno ista odljevka. Modeli se proizvode u raznim veličinama s varijacijama kompleksnosti te od raznih materijala. Trebaju biti konstruirani tako da se mogu lako izvaditi iz kalupa bez mogućnosti da ga oštete. Ovisno o postupku lijevanja razlikuje se i geometrija modela od kojeg je moguće stvaranje kalupne šupljine. Kod lijevanja u pijesak mora se osigurati vađenje modela iz kalupa koji oblikuje kalupnu šupljinu. Neki od materijala koji se koriste za izradu modela mogu biti aluminij, drvo, čelik, plastika i mjed [18].

Konstrukcija modela je vještina koja zahtijeva puno znanja i iskustva. Prvo što je potrebno uzeti u obzir prilikom izrade modela su skošenja stijenki. Ako nema skošenja, model može lako zaglaviti u kalupu. Skošnje je nužno kako bi se odljevak mogao izvaditi iz kalupa bez mogućnosti oštećenja. Jedan model može imati skošenja u dva smjera, ovisno o razdjelnoj liniji kalupa. Tablica 9. prikazuje iznose skošenja koji preporučuju prilikom izrade kalupa.

Tablica 9. Iznos skošenja za adekvatno kalupljenje [18]

h , mm	a , mm	α
do 20	1	3°
20 - 50	1,5	1°30'
50 - 100	2	1°15'
100 - 200	2,5	0°45'
200 - 300	3	0°30'
300 - 500	4	0°30'
500 - 800	5	0°30'
800 - 1000	6	0°30'
1000 - 1200	7	0°30'



Idući element na koji je potrebno obratiti pažnju je skupljanje odljevka prilikom hlađenja. Kako bi se kompenziralo skupljanje taljevine tijekom hlađenja u kalupu, model mora biti dimenzija većih od zahtijevanih dimenzija odljevka za iznos skupljanja.

Tablica 10. i Tablica 11. prikazuju volumno skupljanje i skupljanje u krutom stanju za različite metale.

Skupljanje u tekućem stanju još se naziva primarno skupljanje (odvija se do temperature likvidusa) i ovisi o leguri koja se lijeva i o visini temperature taljevine. Tijekom skrućivanja dolazi do fazne pretvorbe tekuće u kruto, odnosno prijelaza iz stanja manje gustoće u stanje veće gustoće (masa taljevine je konstantna), što u konačnici rezultira smanjenjem volumena (stezanjem) [16].

Skupljanje tijekom skrućivanja u literaturi često se naziva sekundarno skupljanje. Kod čistih metala ovo smanjenje volumena pojavljuje se kod određene temperature, dok se kod legura odvija u temperaturnom intervalu ili intervalu skrućivanja (od likvidus do solidus temperature). Napajanje odljevka pojilom, kompenzira skupljanje prilikom skrućivanja (kod primarnog i sekundarnog skupljanja), a bitno je pravilno pozicioniranje i dimenzioniranje pojila kako bi se nadoknadile sve promjene volumena unutar kalupa [16].

Skupljanje u krutom stanju (odvija se između temperature solidus i sobne temperature) često se naziva tercijarno skupljanje ili modelarsko stezanje i mora se uzeti u obzir pri izradi modela, tako da se uračuna dimenzijski dodatak za skupljanje u krutom stanju, zbog kojeg je kalupna šupljina nešto uvećana u odnosu na konačne dimenzije odljevka. Iznos skupljanja u krutom stanju također ovisi o vrsti metala [16].

Volumno skupljanje obuhvaća primarno, sekundarno i tercijarno skupljanje.

Tablica 10. Volumno skupljanje pri skrućivanju različitih metala [16]

Metalni lijev	Volumno skupljanje pri skrućivanju %
Ugljični čelik	2,5 – 3
1%-tni ugljični čelik	4
Bijelo lijevano željezo	4 – 5,5
Bakar	4,9
CuZn30	4,5
AlZn4,5	6,3
Aluminij	6,6
AlSi12	3,8
Magnezij	4,2
Cink	6,5

Tablica 11. Skupljanje u krutom stanju za različite metale [16]

Metalni lijev	Iznos, %	Moguće odstupanje, %
Željezni lijev		
s lamelarnim grafitom	1,0	0,5 ... 1,3
s kuglastim grafitom, neodžareni	1,2	0,8 ... 2,0
s kuglastim grafitom, odžareni	0,5	0,0 ... 0,8
Čelični lijev	2,0	1,5 ... 2,5
manganski tvrdi čelik	2,3	2,3 ... 2,8
Aluminijeve ljevačke legure	1,2	0,8 ... 1,5
Magnezijeve ljevačke legure	1,2	1,0 ... 1,5
Bakreni lijev	1,9	1,5 ... 2,1
bakar-kositar-leg. (Bronca)	1,5	0,8 ... 2,0
bakar-kositar-cink-leg. (Crveni lijev)	1,3	0,8 ... 1,6
bakar-cink-leg. (Mjed)	1,2	0,8 ... 1,8
Specijalna mjed (Cu-Zn-Mn(Fe-Al))	2,0	1,8 ... 2,3
Višelegirana aluminijska bronca	2,1	1,9 ... 2,3
Cinkove ljevačke legure	1,3	1,1 ... 1,5
Bijela kovina (olovo-kositar)	0,5	0,4 ... 0,6

Osim gore navedenih zahtjeva, ako konačni proizvod to dozvoljava, dobro je voditi računa o što jednostavnijoj konstrukciji modela, kako bi se prilikom strojne obrade mogao adekvatno stegnuti te obraditi uz zadani dodatak za obradu.

3.2. Kalupna mješavina

Kalupna mješavina sastoji se od osnovnog materijala, veziva te dodataka pri čemu više od 90 % mješavine čini osnovni materijal. Osnovni materijali su zrnate supstance odgovarajuće vatrootpornosti. To su isprani, razvrstani prema zrnatosti, i osušeni pijesci. Danas se više ne upotrebljava pijesak izravno s nalazišta, nego takav pijesak prolazi nekoliko koraka pripreme. Kalupna mješavina mora zadovoljiti tehnološka svojstva poput čvrstoće, propusnosti, termootpornosti, kalupljivosti i sl. Zadatak kalupne mješavine je da nakon sabijanja tvori šupljinu u koju se ulijeva taljevina. Nakon ulijevanja i skrućivanja, materijal kalupa se razruši, a kalupna mješavina se regenerira. Nakon uklanjanja ovojnice koja nastaje nakon lijevanja dobivamo zrnice pijeska koje je spremno za ponovnu upotrebu [18].

Pijesci koji se koriste su:

- kvarcni - SiO_2
- cirkonski - ZrO_2SiO_2
- kromitni - FeOCr_2O_3
- olivinski - $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$
- šamotni - $\text{Al}_2\text{O}_3\text{2SiO}_2$.

Srednji promjer zrna pijeska koja se koriste u ljevarstvu kreću se između 0,15 mm i 0,6 mm. Zrna pijeska mogu biti okrugla, iverasta, uglata i zaobljena. Sitno zrno pijeska daje bolju kvalitetu površine odljevka, dok krupnije zrno daje bolju propusnost za plinove koji nastaju pri ulijevanju i vatrootpornost. Nepravilan oblik zrna povećava čvrstoću kalupa, ali smanjuje propusnost. Neki od zahtjeva koji se postavljaju na pijesak su: otpornost na visoku temperaturu, granulacija, cijena i mogućnost ponovne upotrebe. Važno je također napomenuti da temperatura različito utječe na promjene volumena ovisno o vrsti pijeska. Pijesak mora biti temperaturno postojan i ne smije kemijski reagirati s metalom/legurom kojom se lijeva [16].

Veziva osiguravaju potrebna mehanička svojstva kalupu. Načini na koje vezuju mogu biti ostvareni fizikalnim silama ili kemijskom reakcijom.

Veziva se dijele na [18]:

- anorganska - cement, glina, vodeno staklo
- organska - fenolne i furanske smole.

Vezivanje fizikalnim silama ostvaruje se mehaničkim sabijanjem kalupne mješavine; na ovaj način vezuju se gline. Kod vezivanja kemijskim reakcijama nije potrebno sabijanje, dovoljno je kalupnu mješavinu lagano pritisnuti ili vibrirati kalupnik prilikom popunjavanja [18].

Dodaci i premazi služe za poboljšanje svojstava kalupne mješavine poput sposobnosti sabijanja, tecljivosti i poboljšanja svojstava razrušivosti kalupa. Njihova svrha je poboljšati kvalitetu površine kalupne šupljine, dakle, osigurati glatku površinu odljevka. Premazi kod jednokratnih kalupa stvaraju barijeru između rastaljenog metala i vrlo porozne kalupne mješavine. Također, premazi poboljšavaju kvalitetu površine odljevka i olakšavaju razdvajanje odljevka od kalupa [18].

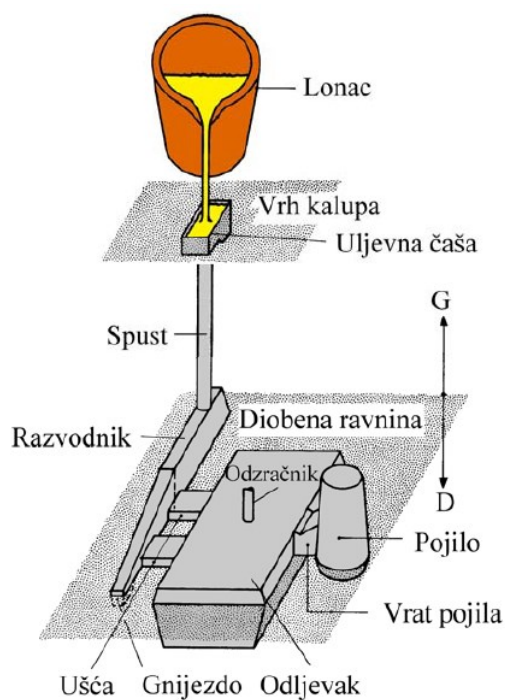
3.3. Uljevni sustav

Uljevni sustav je sustav kanala kroz koje rastaljeni metal teče do kalupne šupljine te je popunjava. Pravilno konstruiran uljevni sustav mora ispuniti niz kriterija kako bi spriječio pojavu grešaka na odljevku i omogućio proizvodnju kvalitetnih odljevaka. Svojim oblikom uljevni sustav mora omogućiti punjenje kalupne šupljine čistim metalom (bez troske i uključaka) dovoljnom brzinom kako bi došlo do potpunog popunjavanja kalupne šupljine prije početka skrućivanja taljevine i time sprječavajući pojavu nedolivenosti odljevka. No brzina taljevine u uljevnom sustavu ne smije biti prevelika tako da plinovi iz kalupa i zrak ne budu uvučeni u tok metala, a pijesak ne bude ispran (erozija kalupa), tj. da se izbjegnu greške u odljevku zbog turbulentnog strujanja taljevine. Cilj je napuniti kalup što je brže moguće i bez turbulencija, a to su kontradiktorni zahtjevi. Uljevni sustav mora biti ekonomičan i praktičan, što znači da ne smije biti preskup za kalupljenje, troškovi čišćenja i završne obrade trebaju biti što manji, a količina metala uporabljenog u sustavu treba biti najmanja moguća s kojom se još postiže željeni rezultat. Oblik, veličina i položaj uljavnog sustava su kritični parametri procesa ulijevanja taljevine u kalupnu šupljinu [16, 19].

3.3.1. Dijelovi uljavnog sustava

Slika 22. prikazuje osnovne komponente uljavnog sustava [19]:

- Uljevna čaša – uvećani dio vrha spusta u koji prvo ulazi rastaljeni metal
- Spust – vertikalni kanal kroz koji rastaljeni metal ulazi u razvodnik
- Razvodnik – horizontalni kanal kroz koji rastaljeni metal ulazi u ušće
- Ušće – kratki kanal koji povezuje razvodnik s kalupnom šupljinom.



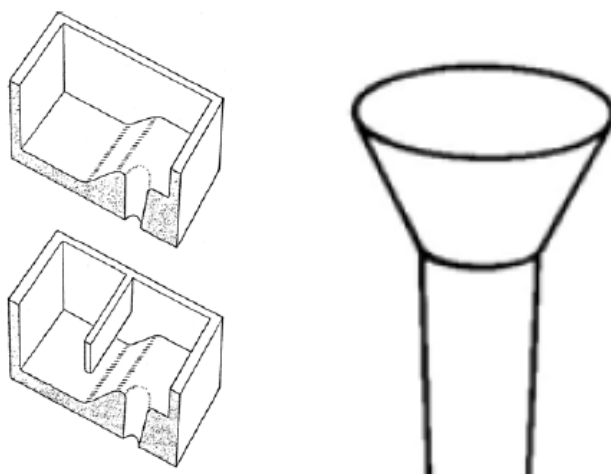
Slika 22. Dijelovi uljevnog sustava [19]

Uljevni sustav sadrži i elemente koji osiguravaju napajanje odljevka (pojila), tj. pritjecanje taljevine i nakon završetka punjenja kalupne šupljine (za vrijeme skrućivanja odljevka), kako bi se izbjegle greške uslijed stezanja metala. Radi poboljšanja čistoće taljevine prije ulaska u kalupnu šupljinu, odnosno uklanjanje nečistoća, u uljevni sustav mogu se inkorporirati filtri [19].

3.3.1.1. Uljevna čaša

Uljevna čaša je prvi dio uljavnog sustava preko kojeg se uvodi taljevina u ostale dijelove sustava. Ona predstavlja rezervoar taljevine tijekom lijevanja, održavajući uljevni sustav tijekom cijelog lijevanja punim, sprječava rasprskavanje taljevine pri izlijevanju iz lonca te sprječava usisavanje zraka i plinova, kao i ulaz troske u spust i ostale dijelove uljavnog sustava. Dubina uljevne čaše mora biti 3 do 4 puta veća od ulaznog promjera spusta kako se iznad spusta ne bi pojavio vrtlog koji uvlači zrak i trosku s površine taljevine [19,20].

Prema obliku uljevne čaše se dijele na ljevkaste i koritaste [Slika 23.]:

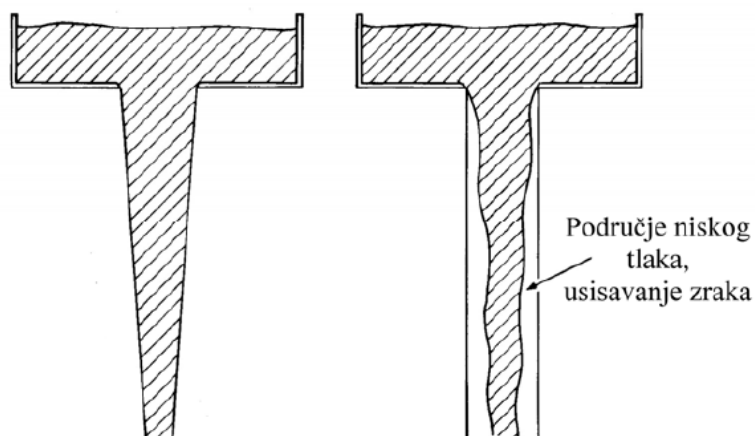


Slika 23. Vrste uljavnih čaša: koritaste (lijevo); ljevkasta (desno) [19]

Kod koritaste uljevne čaše brzina kretanja taljevine u čaši je mala (poprečni presjek čaše je puno veći od poprečnog presjeka spusta) pa uključci i troska imaju vremena isplivati na površinu. Tijekom lijevanja, koritasta čaša uvijek mora biti puna, a taljevina se ulijeva u dio uljevne čaše koji ima veću dubinu, odnosno na suprotnoj strani od otvora spusta. Ljevkasta čaša ne ispunjava funkcije koje ima koritasta čaša i služi jedino da operateru olakša izravno lijevanje taljevine. Kod legura koje su sklone stvaranju oksida na površini (legure magnezija i aluminija) koristi se koritasta čaša s pregradom [19,20].

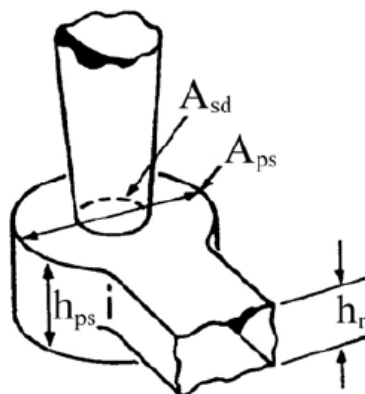
3.3.1.2. Spust

Spust je vertikalni kanal uobičajeno kružnog poprečnog presjeka putem kojeg se taljevina iz uljevne čaše transportira prema razvodniku i potom ušćima. Pravilno konstruiran spust sužava se prema dolje, slično obliku mlaza fluida pri slobodnom padu. Takvim oblikom spusta smanjuju se turbulencije i mogućnost usisavanja zraka. Ako se presjek spusta ne sužava prema dolje, taljevina usisava plinove zbog stvaranja područja niskog tlaka [Slika 24.]. Osim toga, tok taljevine je neujednačen i turbulentan, pogotovo kad mlaz taljevine dostigne podnožje spusta [19,20].



Slika 24. Shematski prikaz toka taljevine u spustu: sužavanje spusta prema dolje (lijevo); ravni spust (desno) [19]

U dnu spusta dolazi do nagle promjene smjera strujanja, a pošto kinetička energija mlaza nastoji održati da mlaz struji u istom smjeru i istom brzinom, nagla promjena smjera na dnu spusta rezultat će pojavom turbulencija u mlazu. Kako bi se apsorbirala kinetička energija rastaljenog metala i samim time smanjila turbulencija mlaza prije ulaska u razvodnik, podnožje spusta se konstruira kao spremnik kružnog poprečnog presjeka većih dimenzija od dna spusta s ciljem apsorpcije kinetičke energije mlaza i smanjenja njegove brzine putem trenja. Što je veća površina nekog spremnika, bit će više trenja između spremnika i fluida u njemu [19,20]. Slika 25. prikazuje karakteristične dimenzije podnožja spusta (razdjelnika).



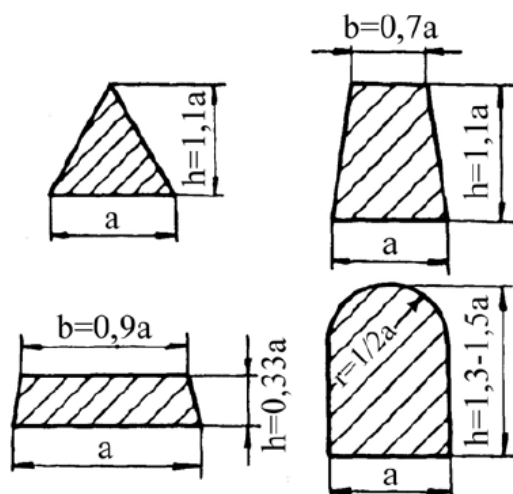
Slika 25. Karakteristične dimenzije podnožja spusta (razdjelnika) [19]

Površina poprečnog presjeka razdjelnika A_{ps} treba biti približno pet puta veća od površine poprečnog presjeka dna spusta A_{sd} . Visina razdjelnika h_{ps} treba biti približno dva puta veća od visine razvodnika h_r [19].

3.3.1.3. Razvodnik

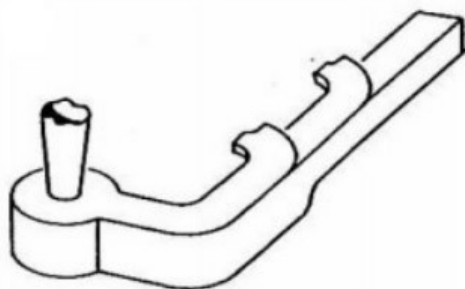
Razvodnik prihvaća i umiruje taljevinu iz spusta, omogućuje izdvajanje uključaka i metalnih oksida (isplivaju na površinu taljevine i zadržavaju se u gornjem dijelu razvodnika), svojom konstrukcijom onemogućava nagle promjene smjera strujanja taljevine te usmjerava taljevinu u ušća. Najčešće se upotrebljavaju razvodnici trapeznog poprečnog presjeka [19,20].

Slika 26. prikazuje različite moguće poprečne presjeke razvodnika.



Slika 26. Mogući poprečni presjeci razvodnika [19]

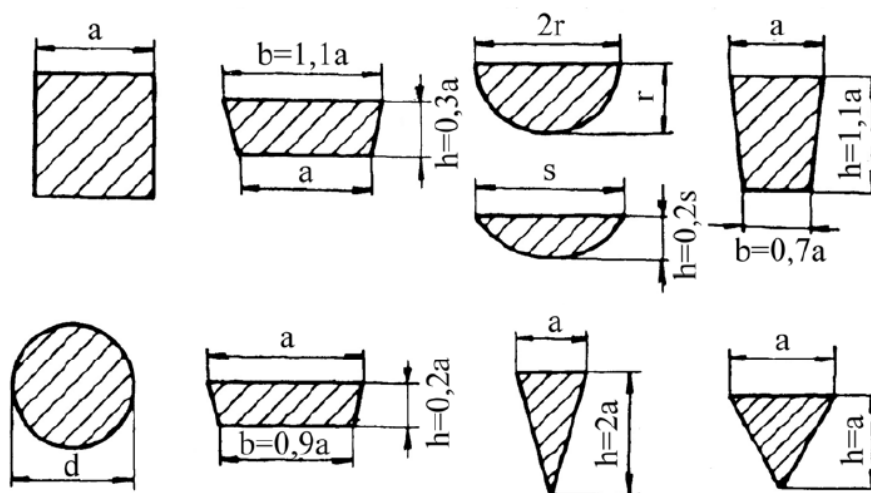
Rastaljeni metal koji prvi ulazi u uljevni sustav je u većini slučajeva onečišćen zbog turbulencija i usisanih plinova. Isto tako, prva taljevina uglavnom nosi slobodne čestice pijeska. Zbog toga se razvodnik izvodi s produženjem [Slika 27.] koje sprječava da prvi onečišćeni rastaljeni metal uđe u kalupnu šupljinu [20].



Slika 27. Produženje razvodnika [20]

3.3.1.4. Ušće

Ušće predstavlja završni element uljavnog sustava i povezuje razvodnik s kalupnom šupljinom i osigurava pravilno i ravnomjerno punjenje kalupne šupljine. Dimenzije i oblik ušća [Slika 28.] treba prilagoditi debljini stijenke odljevka. Uobičajeno se ušća izvode širine veće od visine zbog lakšeg odstranjivanja s odljevka. Najčešće se upotrebljavaju ušća pravokutnog poprečnog presjeka [19].



Slika 28. Mogući poprečni presjeci ušća [19]

4. KOMBINACIJA ADITIVNE PROIZVODNJE I LIJEVANJA

Izrada modela jezgre kalupne šupljine i/ili cijelog kalupa, može biti poprilično dugotrajni proces, dodajući tome da takav način izrade ima i određena ograničenja u pogledu kompleksnosti modela. Drugim riječima, jasno je da se tradicionalnim postupcima proizvodnje, komplicirane geometrije ne mogu izraditi ili ukoliko se mogu, proces je zahtjevan i skup. Time dolazimo do područja hibridne proizvodnje, odnosno proizvodnje koja kombinira aditivne tehnologije i tradicionalnu proizvodnju.

Uz aditivnu proizvodnju, kalupi i modeli jezgra mogu se ispisati izravno iz računalno generiranih modela. Takva proizvodnja kalupa i jezgri ima znatno smanjeno vrijeme izrade. Izbjegavanje nepotrebnih obrada ili dodavanja materijala, također može smanjiti troškove razvoja. Navedene prednosti posebno dolaze do izražaja ako se testira više različitih opcija dizajna. Kalupi i jezgre dobiveni aditivnom tehnologijom, također mogu biti isplativo rješenje za proizvodnju odljevaka u vrlo malim količinama, posebno u okruženju podređenom narudžbama, gdje se obrasci često modificiraju kako bi se prilagodili specifičnim radnim zahtjevima. Dizajn dijelova i dalje bi trebao slijediti ograničenja koja nameću proces lijevanja i sustavi aditivnih tehnologija. Neka od ovih ograničenja jesu debljina stijenki te promjene u poprečnim presjecima dijelova.

Integracija aditivne proizvodnje s tradicionalnim postupcima lijevanja, kao hibridan proces, može pružiti troškovno učinkovit način proizvodnje vrlo kompleksnih dijelova specifičnih za određene primjene.

Slika 29. i Slika 30. prikazuju primjere proizvoda dobivenih kombinacijom aditivne proizvodnje i procesa lijevanja.



Slika 29. Odljevak dobiven s pomoću 3D ispisanog kalupa i jezgre [21]



Slika 30. Jezgra dobivena aditivnom proizvodnjom (lijevo); gotovi odljevak (desno) [22]

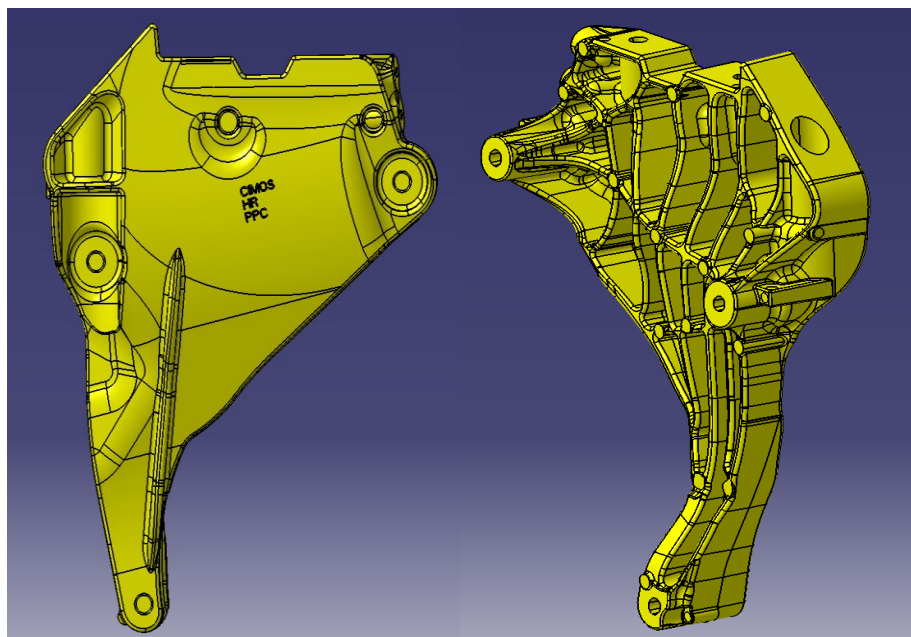
5. RAZVOJ I 3D ISPIS JEZGRE PJEŠČANOG KALUPA ZA IZRADU NAPRAVE

U praktičnom dijelu rada prikazat će se zadani proizvod, nosač motora, te će se opisati funkcija i zahtjevi naprave za pozicioniranje i stezanje zadanog proizvoda. Nadalje, definirat će se CAD model naprave (modelirano u programu *DS CATIA P3 V5-6R2020 (V5R30)*), prikazat će se odabrani parametri FDM/FFF aditivnog postupka u programu *Z-Suite* te će se prikazati rezultat 3D ispisa modela jezgre korištenjem 3D pisaača *Zortrax M200*. Ispisani model jezgre, koji će nam kasnije poslužiti za izradu pješčanog kalupa i u konačnici izradu naprave, 3D skeniranjem (*ATOS Core 300*) usporedit će se s referentnim CAD modelom. Nakon 3D skeniranja modela, izradit će se pješčani kalup i odliti naprava korištenjem aluminijske legure $AlSi8Cu3$. U konačnici, priložit će se tehnička dokumentacija, potrebna za mehaničku obradu naprave, kako bi se napravu povezalo u sklop za stezanje i pozicioniranje zadanog nosača motora.

5.1. Funkcija i zahtjevi naprave za pozicioniranje i stezanje

Kao što je navedeno u uvodu poglavlja, funkcija naprave je pozicioniranje i stezanje nosača motora, kako bi se moglo provoditi mjerenje dimenzija.

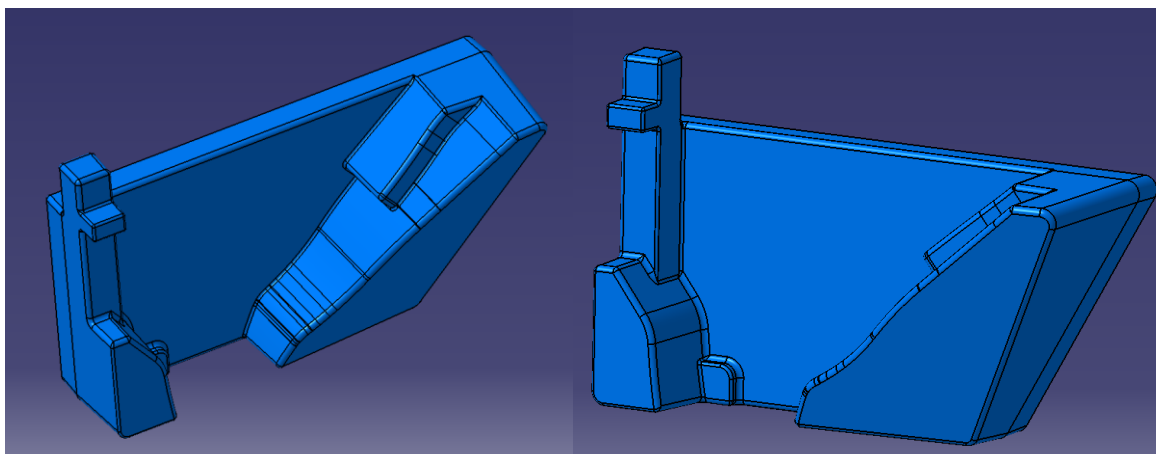
Na odjelu kontrole kvalitete, točnije mjernog laboratorija, zadanim nosačima motora potrebno je provjeriti odstupanje dimenzija, provjera dimenzija provodi se uglavnom 3D mjerenjem robotima. 3D mjerenje izvodi sam robot prema ranije napisanom programu te je iz tog razloga vrlo važno da naprava omogućuje gotovo identično pozicioniranje svakog nosača motora ove vrste [Slika 31]. Važan zahtjev je i modeliranje naprave na način da roboti mogu prići svim dijelovima nosača motora koje je potrebno izmjeriti, bez opasnosti da će mjernim instrumentima doći u koliziju sa samom napravom, ili da će dio nosača motora, koji je potrebno izmjeriti, biti zaklonjen napravom. Još jedan od zahtjeva je i mogućnost jednostavnog i brzog postavljanja nosača motora na napravu, iz razloga što se postavljanje proizvoda izvodi ručno, odnosno radnici postavljaju proizvode, koje je potrebno mjeriti, na napravu i pokreću program mjerenja.



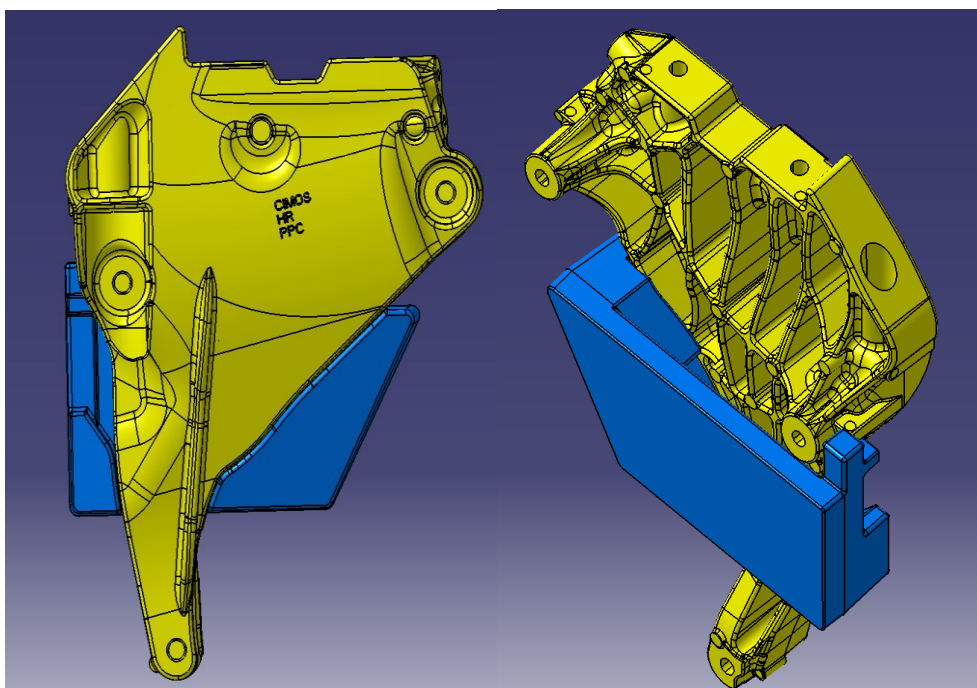
Slika 31. CAD model nosača motora

5.2. CAD model naprave za pozicioniranje i stezanje nosača motora

CAD model naprave modeliran je na način da se zadovolje svi zahtjevi navedeni u poglavlju 5.1. Modeliranje naprave izvodilo se praćenjem karakteristične geometrije nosača motora, kako bi se u konačnici dobilo što je moguće bolje nalijeganje nosača motora na napravu. Prilikom modeliranja važno je uzeti u obzir da će modelirana naprava, nakon 3D ispisa poslužiti kao model jezgre po kojoj će se izraditi pješčani kalup. Imajući u vidu da model jezgre neće biti topiv, potrebno je dodati kutove skošenja, kako bi se model jezgre mogao izbaciti iz kalupne šupljine. Kutovi skošenja po vanjskoj konturi naprave iznose 2° , dok s unutarnje iznose 1° . Model je uvećan za 0,55 %, kako bi se kasnije, prilikom lijevanja u pješčani kalup, nadoknadilo skupljanje aluminijske legure u krutom stanju. Slika 32. prikazuje CAD model naprave. Slika 33. prikazuje pozicioniranje CAD modela nosača motora na model naprave.



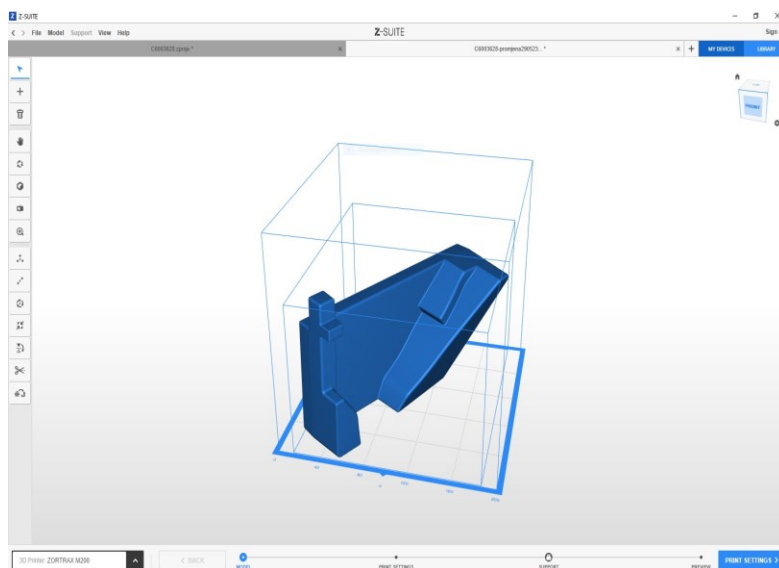
Slika 32. CAD model naprave



Slika 33. CAD model naprave i nosača motora

5.3. 3D ispis modela FDM/FFF aditivnim postupkom

Nakon razvoja CAD modela naprave, potrebno je model pretvoriti u stl format te ga učitati u programu *Z-Suite*. Slika 34. prikazuje model naprave i sučelje programa *Z-Suite*. Nakon učitavanja modela naprave u programu, potrebno je odabrati površinu modela na kojoj će model nalijegati na platformu pisaa te orijentaciju unutar kućišta pisaa.



Slika 34. Model naprave i sučelje u programu Z-Suite

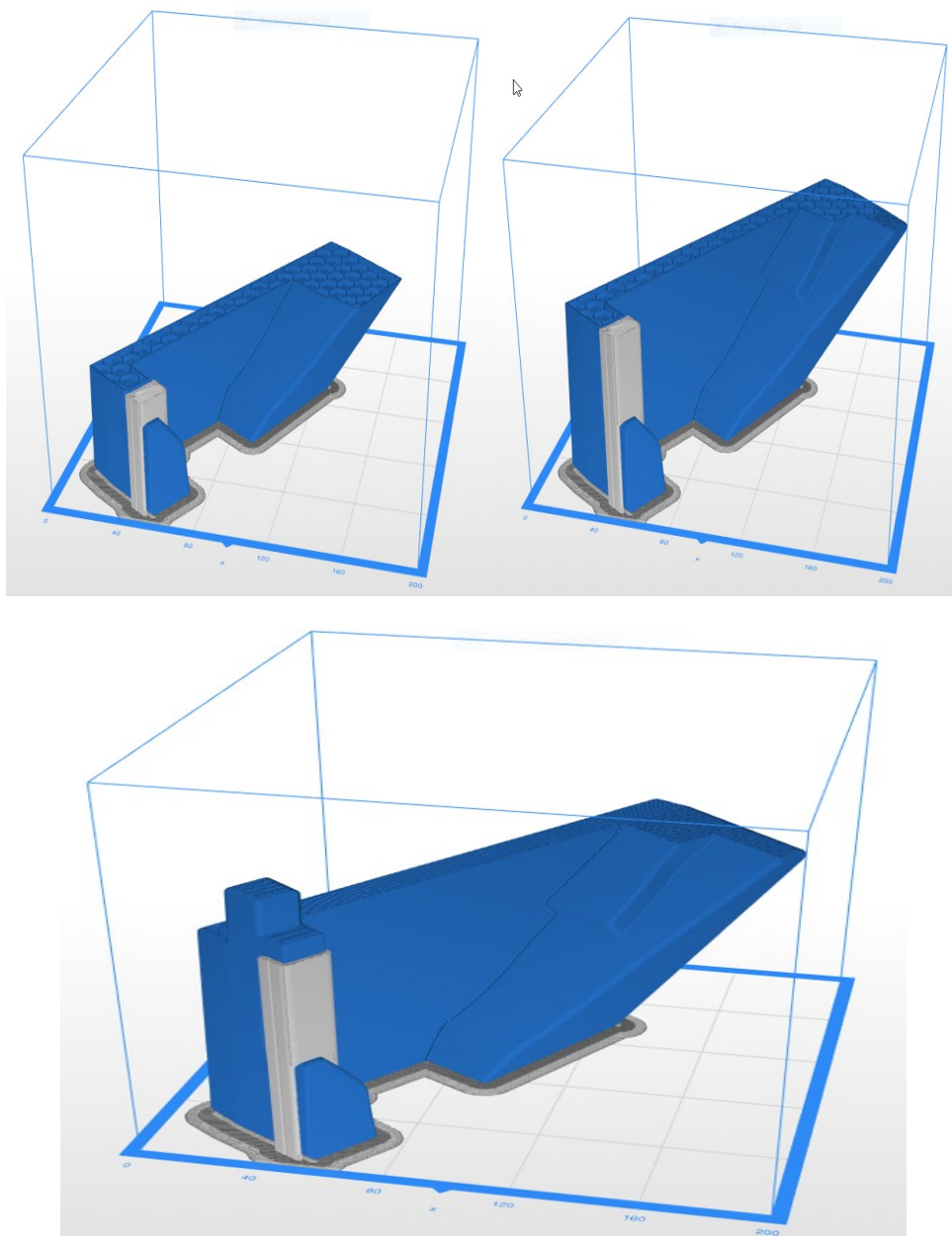
Nakon odabira naliježuće površine i orijentacije unutar kućišta pisača, slijedi izbor željenih parametara 3D ispisa modela.

Materijal ispisa je filament baziran na ABS-u, promjer mlaznice za ispis je 0,4 mm, odabrana debljina ispisanog sloja postavljena je na 0,09 mm. Temperatura ekstrudiranja materijala je 275 °C dok je izabrana temperatura platforme pisača 90 °C. Shodno tome da se ispisani model neće koristiti izravno kao naprava, već će poslužiti kao model jezgre za izradu pješčanog kalupa, postotak ispune materijalom postavljen je na 10 %. Izabrani postotak smanjuje vrijeme potrebno za ispis modela te smanjuje utrošak materijala. Slika 35. prikazuje odabrane parametre 3D ispisa.

Slika 36. prikazuje različite faze prilikom simulacije 3D ispisa.

NORMAL		ADVANCED	
MATERIAL GROUP		MATERIAL	
EXTERNAL MATERIALS		ABS-BASED FILAMENT	
SUPPORT		ANGLE 30	
<input checked="" type="checkbox"/> SMART BRIDGES <input type="checkbox"/> LITE <input checked="" type="checkbox"/> OFFSET			
GAP XY 0.53 mm		DENSITY 2.00 mm	
PROFILE LAST SETTINGS RESET SETTINGS SAVE			
NOZZLE DIAMETER 0.4		PRINT SPEED 0%	
LAYER THICKNESS 0.09		EXTRUDER FLOW RATIO 0%	
TEMPERATURE		RETRACTION	
EXTRUSION TEMP. 275 °C		SPEED 36 mm/s	
PLATFORM TEMP. 90 °C		DISTANCE 0.8 mm	
TYPE		PATTERN	
<input checked="" type="checkbox"/> NORMAL <input type="checkbox"/> MESH <input type="checkbox"/> SOLID <input type="checkbox"/> SHELL		<input type="checkbox"/> PATT. 0 <input checked="" type="checkbox"/> PATT. 2 <input type="checkbox"/> PATT. 3	
INFILL DENSITY 10% (MESH NORMAL SOLID)			
SURFACE LAYERS		OFFSET	
TOP 9 pcs		OUTER CONTOURS 0.00 mm	
BOTTOM 4 pcs		HOLES 0.00 mm	
DENSITY 100%			
SEAM <input checked="" type="checkbox"/> NORMAL <input type="checkbox"/> RANDOM			
FAN SPEED <input type="checkbox"/> AUTO 20%			
FIRST LAYER			
FLOW RATIO 100%		DENSITY 100%	
PRINT SPEED 100%			
FIRST LAYER GAP 0.30 mm			
RAFT <input checked="" type="checkbox"/> ENABLED			
LAYERS 6 pcs		DENSITY 100%	
PLATFORM-RAFT GAP 0.25 mm		PRINT SPEED 100%	
		FLOW RATIO 100%	

Slika 35. Parametri 3D ispisa



Slika 36. 3D ispis modela - simulacija

Izborom željenih parametara te spremanja G-koda, potrebnog za ispis, na memorijsku karticu, slijedi proces 3D ispisa modela naprave. 3D ispis proveden je na pisaču *Zortrax M200* [Slika 37]. Tablica 12. prikazuje specifikacije pisača *Zortrax M200*.

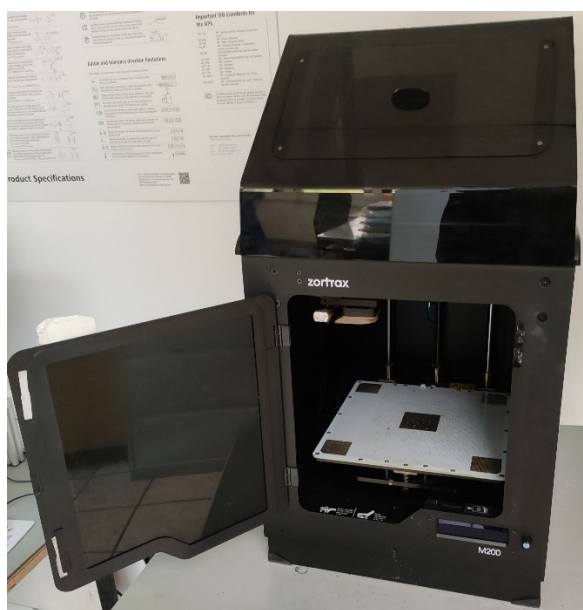


Slika 37. 3D pisač Zortrax M200 [23]

Tablica 12. Zortrax M200 – specifikacije [24,25]

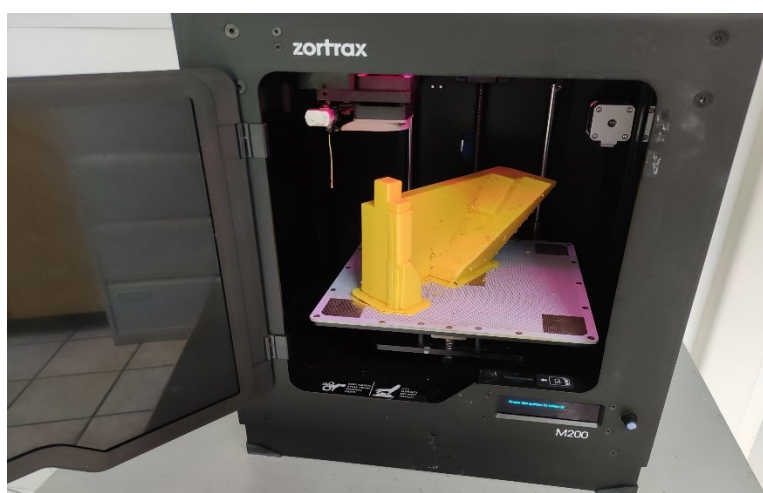
Dimenzije 3D pisača	350 x 360 x 505 mm (Š x D x V)
Masa	14,5 kg
Max. dimenzije ispisa	200 x 200 x 180 mm
Promjer filamenta	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Broj ekstrudera	1
Platforma	Perforirana, grijana
Povezivost	Memorijska kartica (SD)
Suportna struktura	Isti materijal kao model
Materijali	ABS, PETG, HIPS, ASA, ...
Tehnologija	FDM/FFF
Softver	Z-Suite

Slika 38. prikazuje 3D pisač Zortrax M200, koji je korišten za ispis modela naprave.



Slika 38. Pisač *Zortrax M200* korišten za ispis modela

3D ispis modela naprave trajao je 25 sati. Na jednom dijelu (područje donjeg lijevog kuta) ispisanog modela, vidljiva je pojava savijanja, što će vjerojatno biti vidljivo kasnije na rezultatima skeniranja. Slika 39. prikazuje ispisan model naprave na pisaču *Zortrax M200* i pojavu savijanja u donjem lijevom kutu modela. Slika 40. prikazuje model naprave nakon vađenja iz pisača.



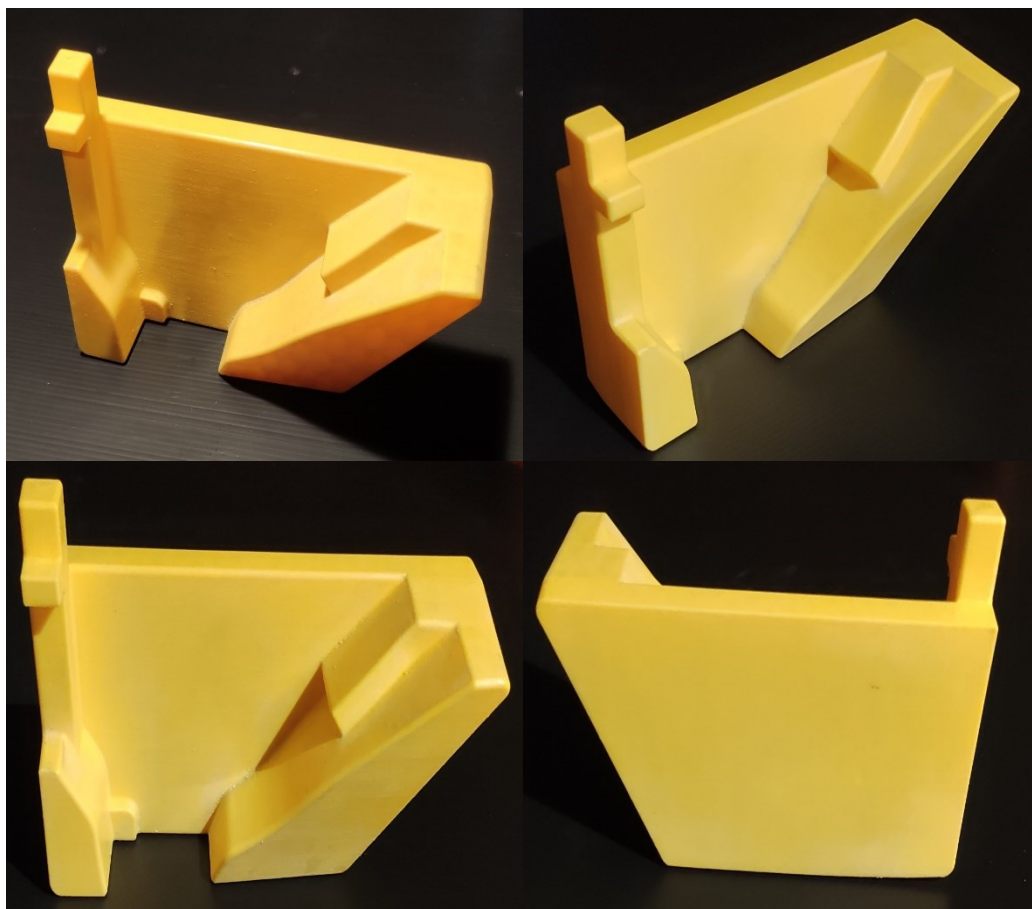
Slika 39. Ispisani model – pisač *Zortrax M200*



Slika 40. Ispisani model izvađen iz pisača

Nakon uklanjanja modela s platforme pisača, potrebno je ukloniti potporna strukturu i očistiti površine, kako bi se omogućilo reprezentativnije skeniranje 3D ispisanog modela naprave te ga kasnije usporedilo sa CAD modelom [Slika 32.]

Slika 41. prikazuje ispisani model naprave s očišćenim površinama te uklonjenom potpornom strukturom.



Slika 41. Ispisani i očišćeni model

5.4. 3D skeniranje ispisanog modela i provjera odstupanja u odnosu na referenti CAD model

Prethodno ispisan 3D model [Slika 41.] potrebno je dimenzijski usporediti s referentnim CAD modelom [Slika 32.]. Skeniranje će se odvijati korištenjem 3D skenera *ATOS Core 300* [Slika 42.]. Tablica 13. prikazuje specifikacije 3D skenera *ATOS Core 300*.

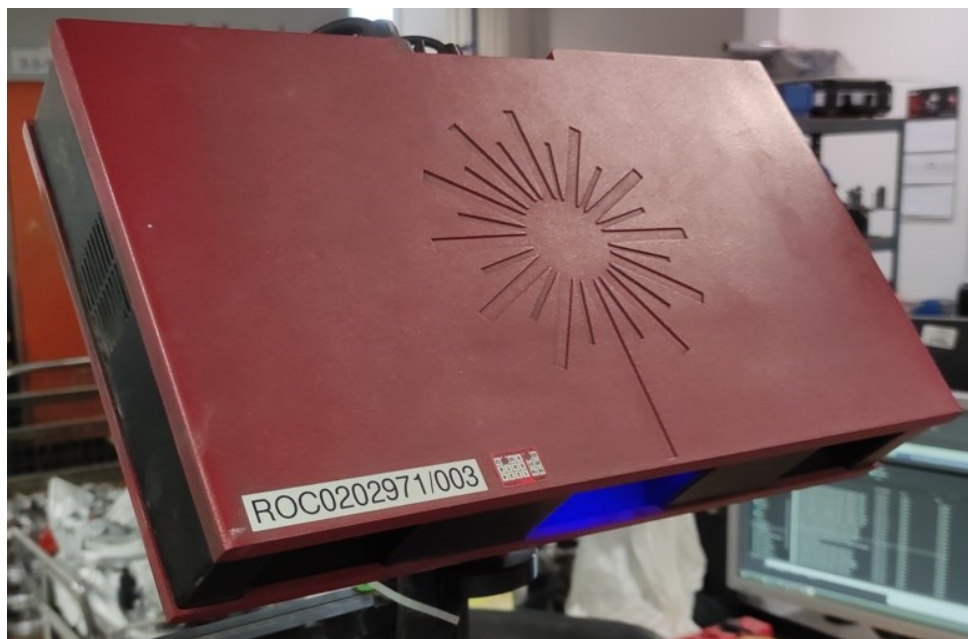


Slika 42. 3D skener *ATOS Core 300* [26]

Tablica 13. *ATOS Core 300* – specifikacije [26,27]

Dimenzije	361 x 205 x 64 mm
Mjerna površina	300 x 230 mm
Masa	2,9 kg
Radna udaljenost	440 mm
Udaljenost točaka	0,12 mm
Povezivost	USB
Radna temperatura	5 – 40 °C
Napajanje	90 – 230 V (izmjenična struja)
Softver	<i>GOM</i>

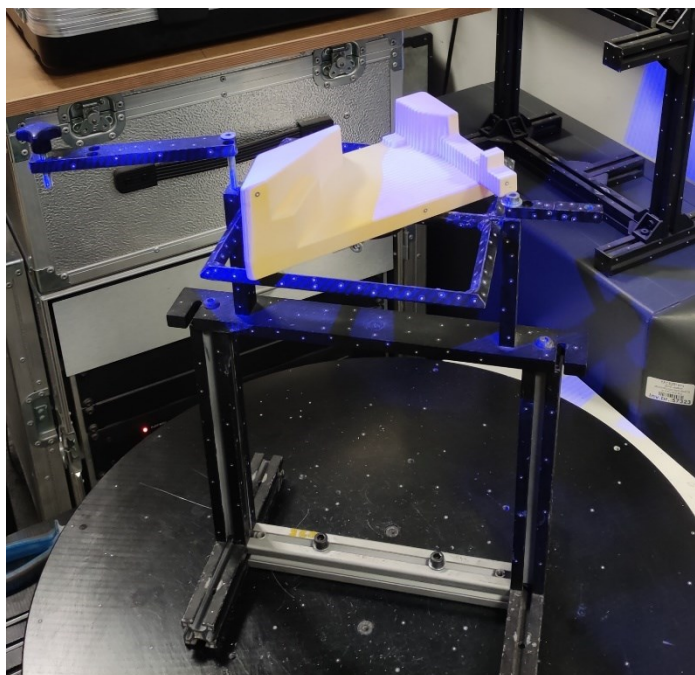
Slika 43. prikazuje 3D skener *ATOS Core 300*, korišten za skeniranje modela.



Slika 43. 3D skener *ATOS Core 300* korišten za skeniranje modela

Slika 44. prikazuje ispisani model pripremljen za skeniranje. Prilikom skeniranja važno je da se model rotira zajedno s konstrukcijom i rotacijskim stolom na kojem je pozicioniran, no trebalo bi izbjegavati samostalno zakretanje modela u odnosu na konstrukciju, uzrokovano inercijom rotacije, što dovodi do lošije kvalitete skeniranja.

Slika 45. prikazuje proces skeniranja ispisanoga modela.

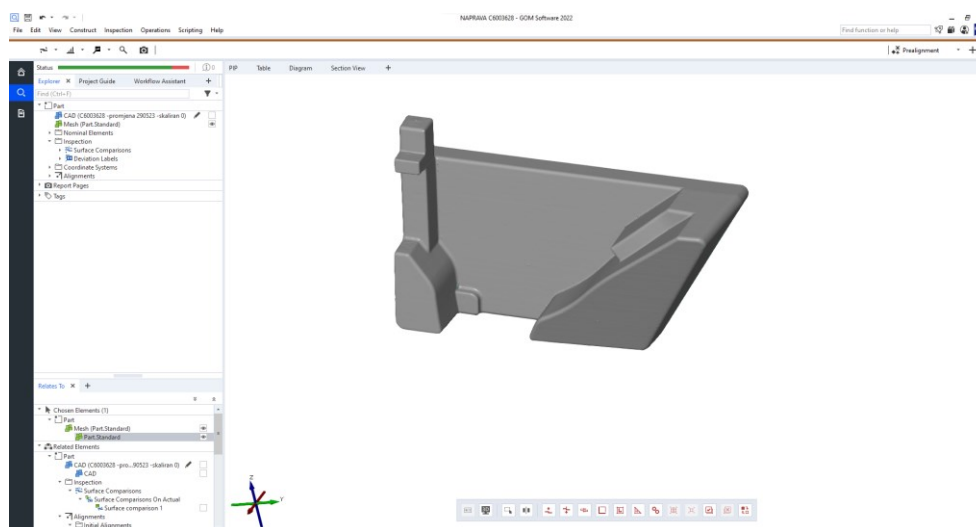


Slika 44. Model pripremljen za 3D skeniranje



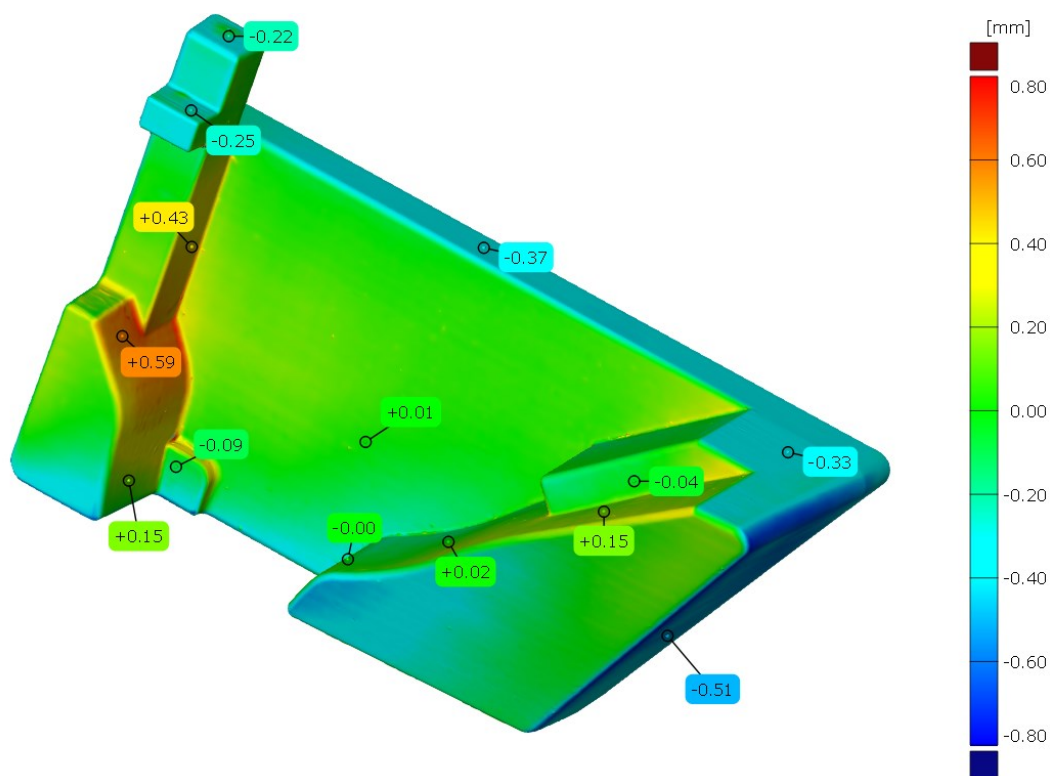
Slika 45. Proces 3D skeniranja modela

Završetkom skeniranja, skenirani model učitava se u *GOM Inspect* softveru [Slika 46.]. Nakon učitavanja skeniranog modela, učitava se referentni CAD model [Slika 32.] kojeg se preklapa sa skeniranim modelom.

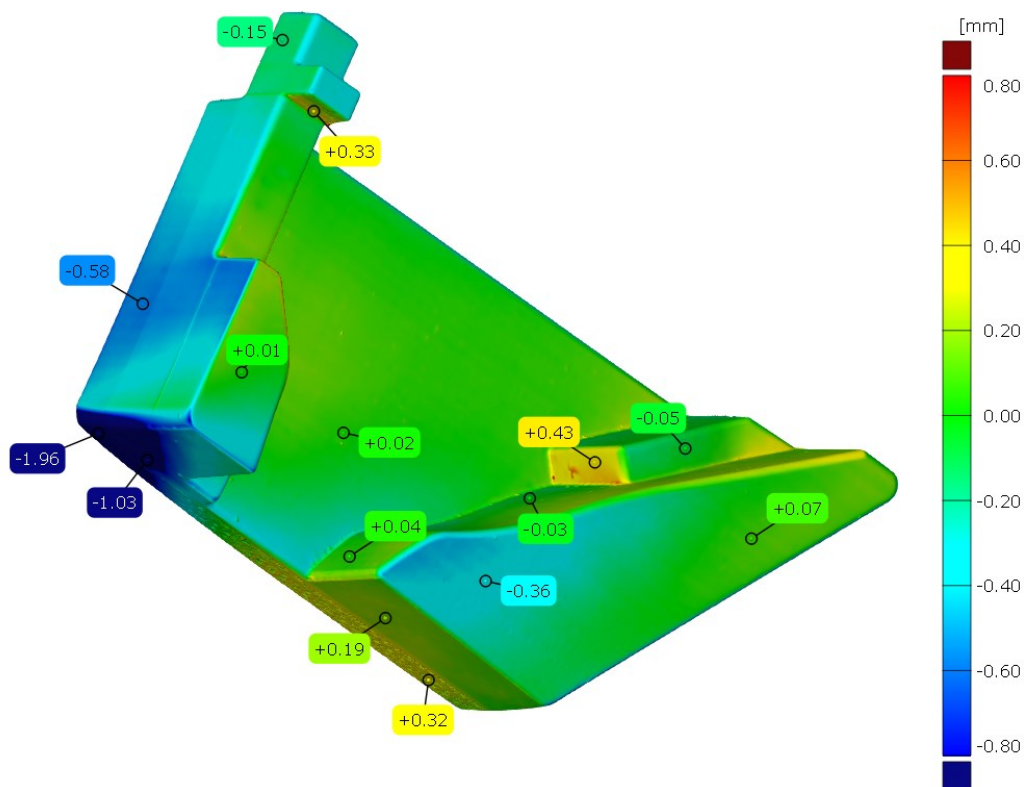


Slika 46. Skenirani model – GOM Inspect softver

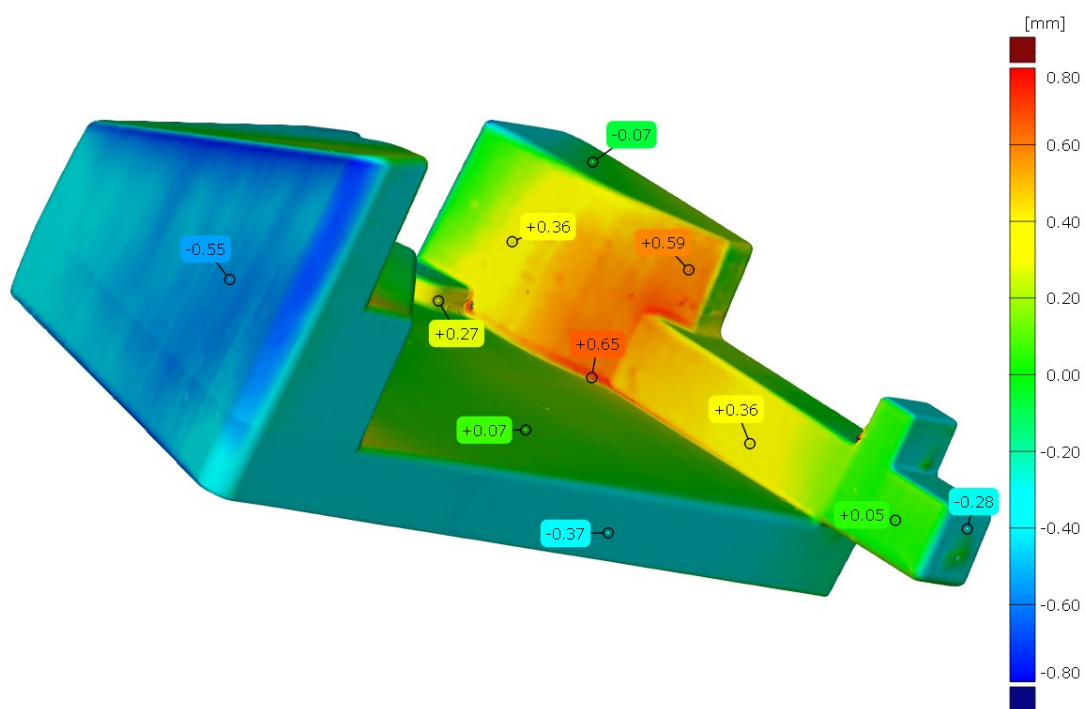
Usporedbom skeniranog modela s referentnim CAD modelom, rezultati pokazuju dimenzijska odstupanja. Najveće dimenzijsko odstupanje vidljivo je u području donjeg lijevog kuta modela i iznosi oko 2 mm. Razlog ovog odstupanja dimenzija djelomično je u tome što je došlo do pojave savijanja tijekom ispisa u ovom području, a drugi je razlog uklanjanje i čišćenje potporne strukture [Slika 40]. Jedan dio potporne strukture bio je prečvrsto pričvršćen na tom dijelu modela, stoga je uklonjen brušenjem, te je time, zajedno s pojavom savijanja, došlo do manjka materijal u odnosu na referentni CAD model. Ovaj dio modela nije od presudne važnosti za pozicioniranje nosača motora, pošto se radi o vanjskoj površini, stoga ne bi trebalo biti problema kod pozicioniranja. Što se tiče drugih dijelova modela, vidljivo je kako po vanjskim površinama uglavnom nedostaje materijala u odnosu na CAD model, što je vjerojatno rezultat čišćenja ispisanog modela. Višak materijala vidljiv je u području vrha lijevog naslona, području dna modela (desna strana) te na ponekim bridovima. Na području lijevog naslona i dna nalazila se potporna struktura te je vjerojatno dio strukture zaostao i rezultirao viškom materijala. Površine na koje naliježe nosač motora, odstupaju vrlo malo, što je najvažnije za funkcionalnost naprave. Rezultati dimenzijskih odstupanja prikazani su na slikama u nastavku [Slika 47-Slika 54].



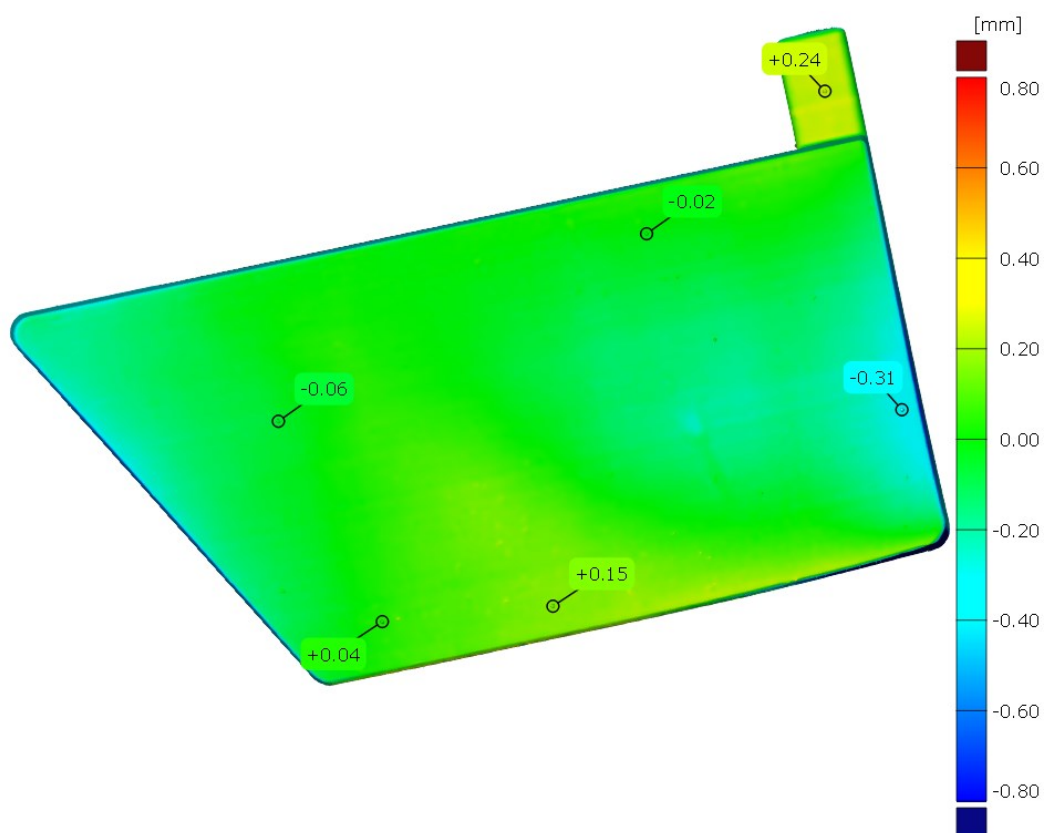
Slika 47. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 1



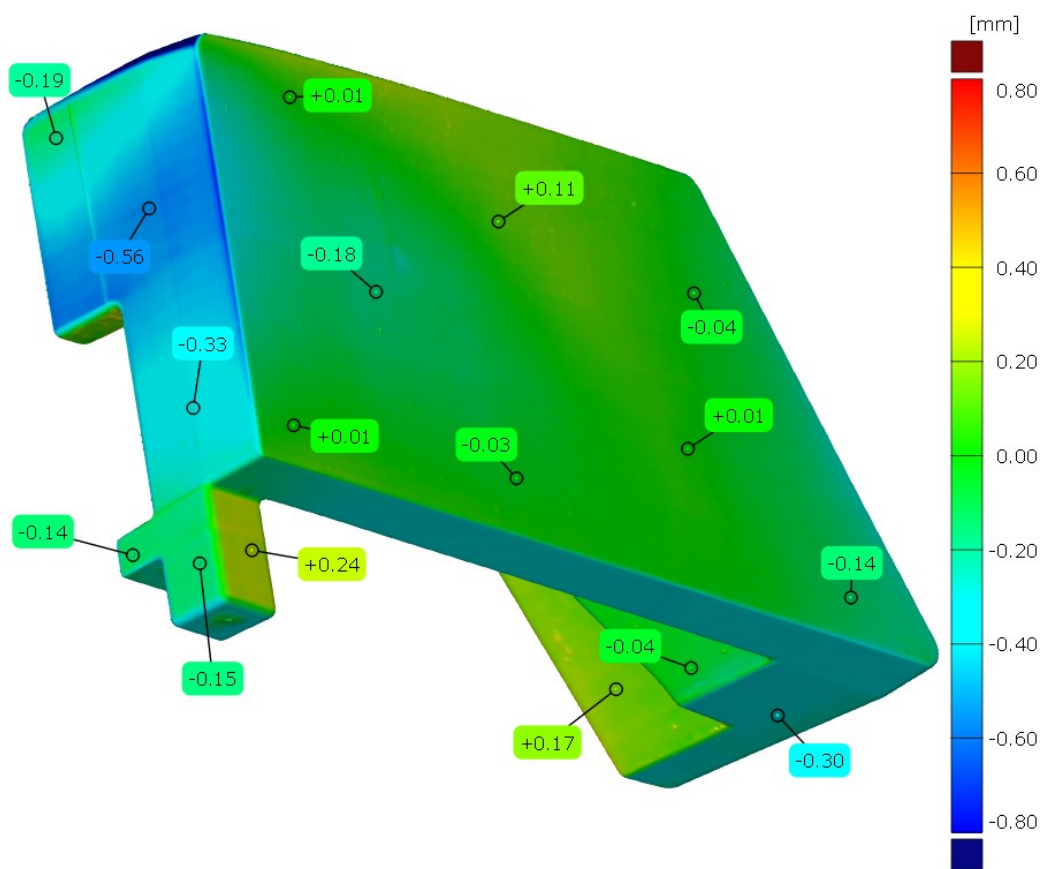
Slika 48. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 2



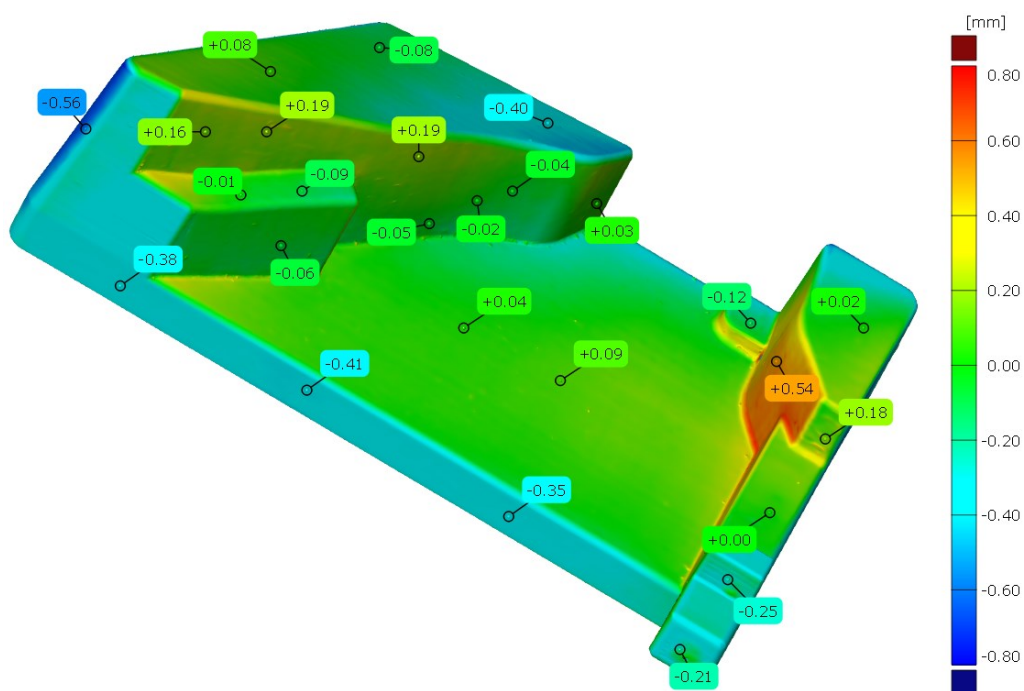
Slika 49. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 3



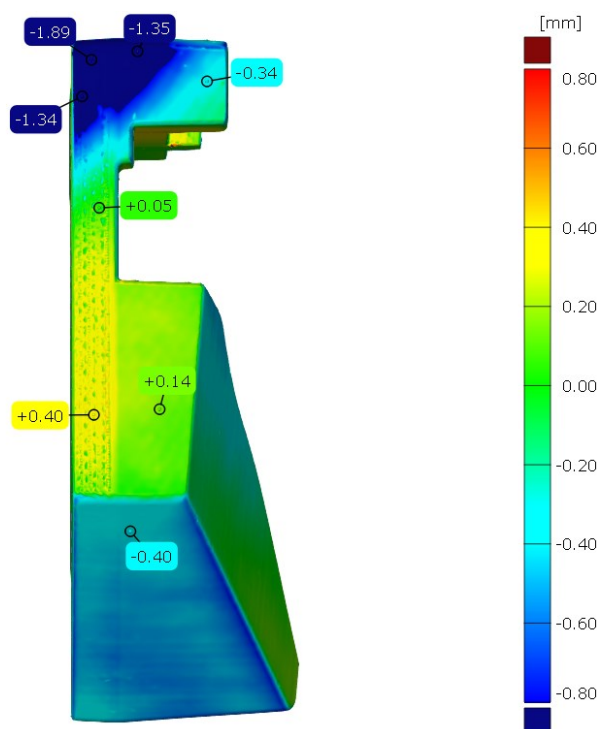
Slika 50. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 4



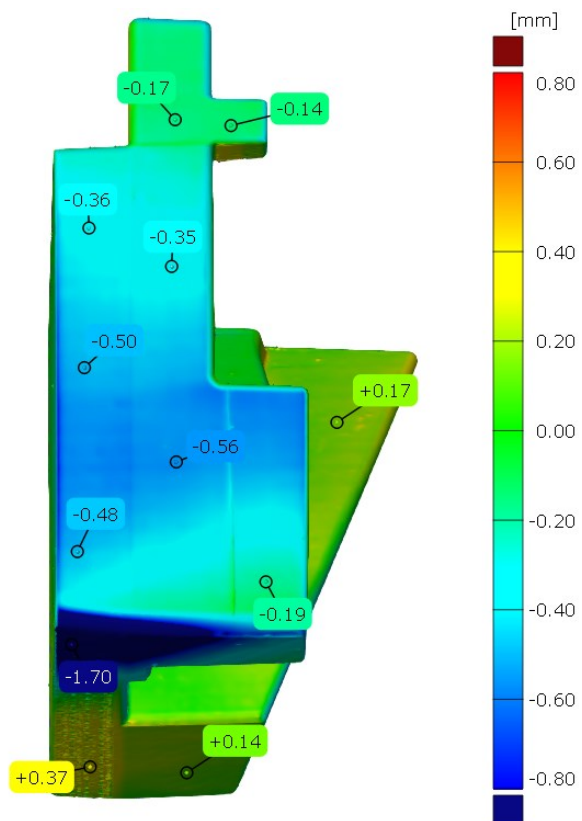
Slika 51. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 5



Slika 52. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 6



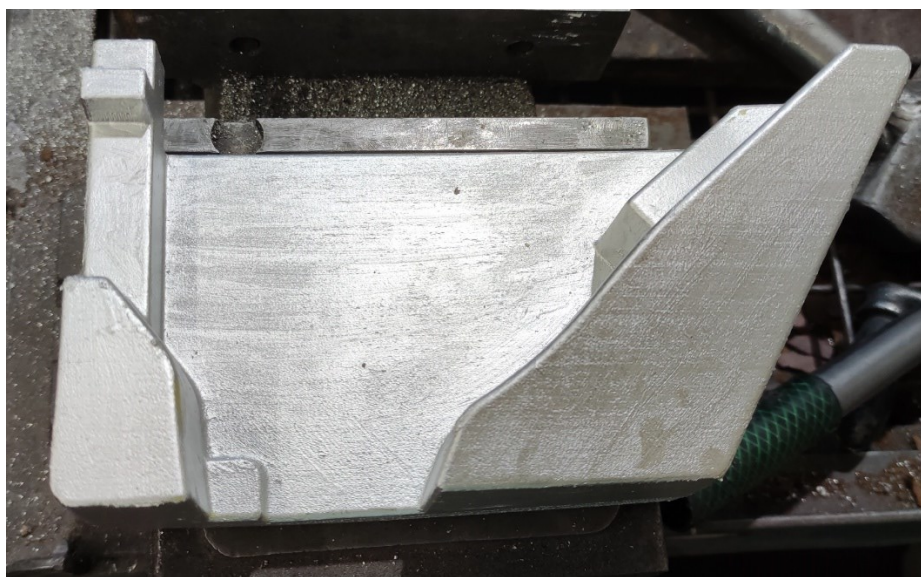
Slika 53. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 7



Slika 54. Dimenzijska odstupanja skeniranog modela u odnosu na CAD model – 8

5.5. Lijevanje naprave – lijevanje u pijesak

Ispisani model poslužit će kao model jezgre za izradu jednokratnog pješčanog kalupa. Nakon izrade kalupa, model jezgre izbacuje se iz kalupne šupljine te se ulijeva legura aluminija AlSi8Cu3. Prije izrade kalupa, model jezgre (ispisani model) premazuje se sredstvom koji sprječava naljepljivanje pijeska na njegovu površinu [Slika 55.].



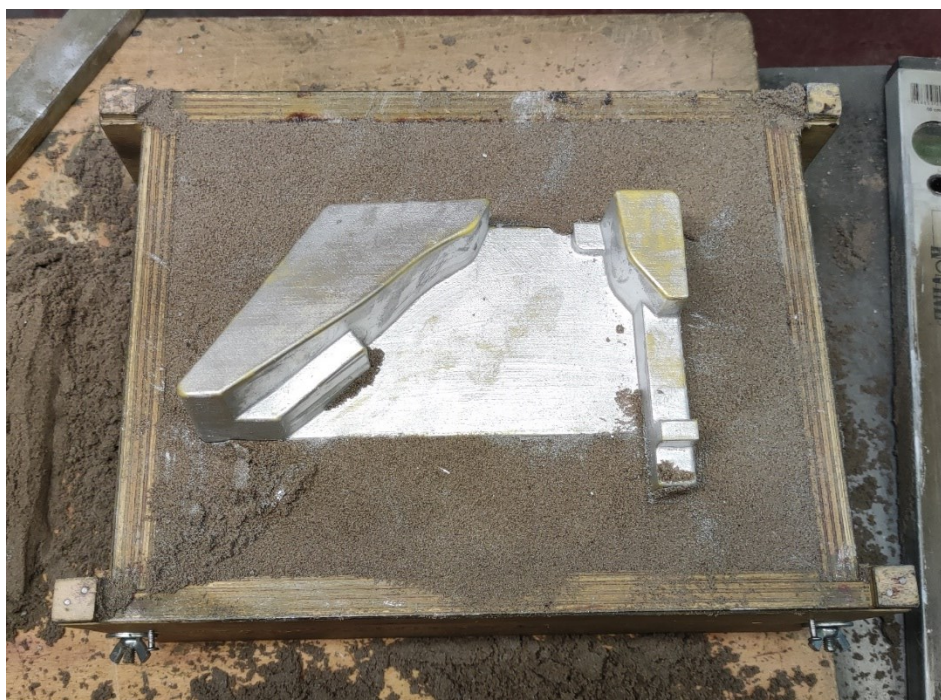
Slika 55. Premazani model jezgre

Nakon premazivanja modela jezgre kreće se s izradom pješčanog kalupa. U izradi kalupa koristi se kvarni pijesak u kombinaciji s vezivima i katalizatorom. Slika 56. prikazuje veziva korištena u izradi pješčanog kalupa.

Nakon pripreme pijeska, premazanim modelom kreće se u izradu kalupa. Slika 57. prikazuje izradu donjaka, upuštanjem modela u kalupnu mješavinu. Slika 58. prikazuje pripremu gornjaka. Slika 59. prikazuje kalup s umetnutim pojilima. Slika 60. prikazuje gornjak i donjak pješčanog kalupa. Slika 61. prikazuje ušće koje je postavljeno u donjak. Slika 62. prikazuje proces lijevanja aluminijeve legure AlSi8Cu3. Slika 63. prikazuje napravu nakon vađenja iz pješčanog kalupa. Slika 64. prikazuje odlivenu napravu s uklonjenim uljevnim sustavom.



Slika 56. Veziva za izradu pješčanog kalupa



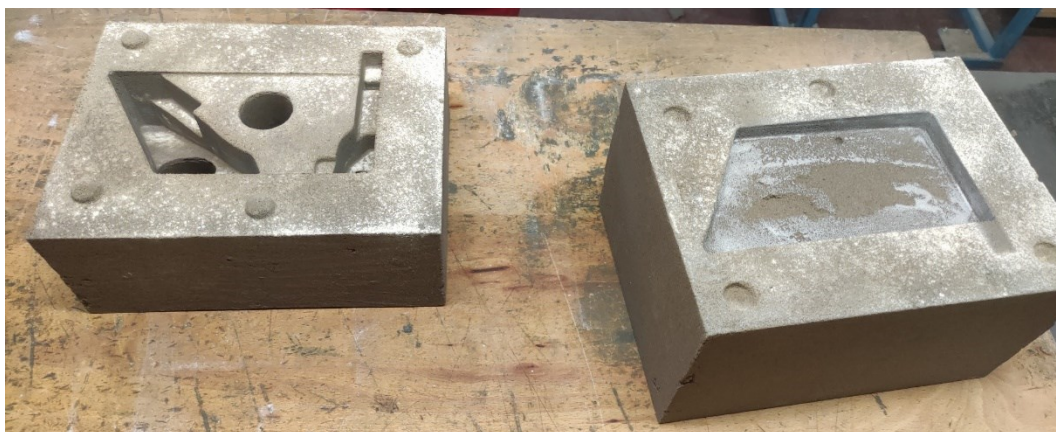
Slika 57. Izrada donjaka



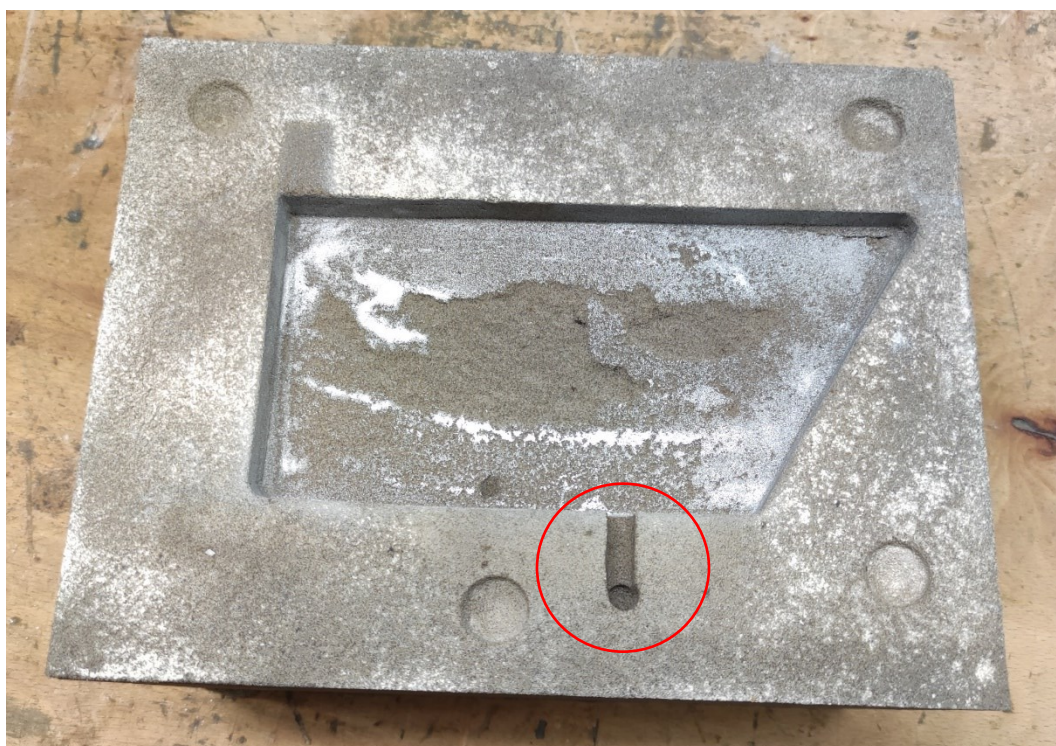
Slika 58. Priprema gornjaka



Slika 59. Dodavanje pojila



Slika 60. Gornjak (lijevo) i donjak (desno)



Slika 61. Dodavanje ušća u donjak



Slika 62. Lijevanje u kalup



Slika 63. Naprava nakon vadenja iz kalupa

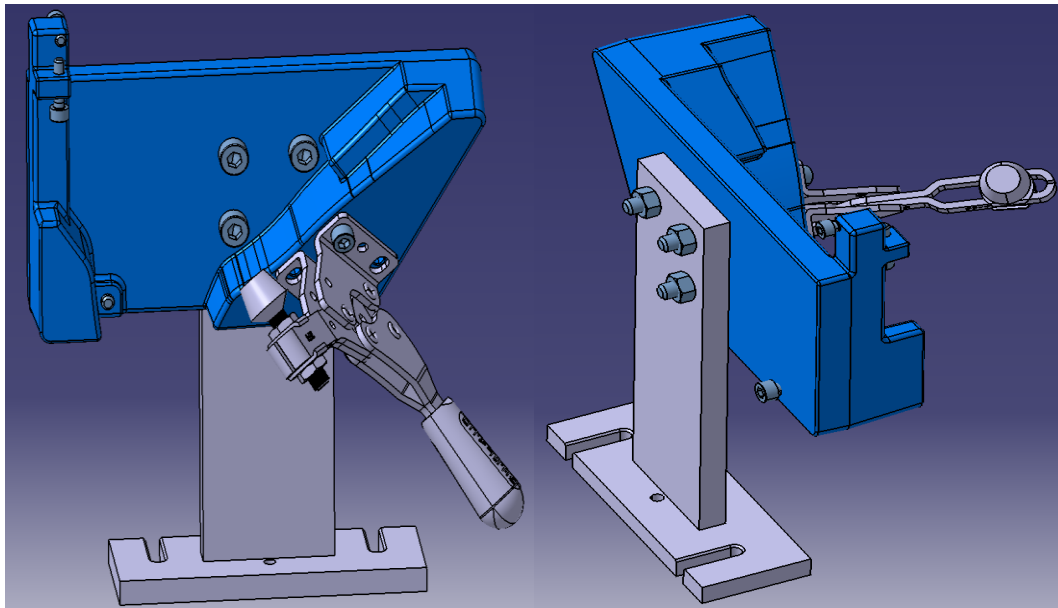


Slika 64. Naprava nakon vadenja iz kalupa i uklanjanja uljavnog sustava

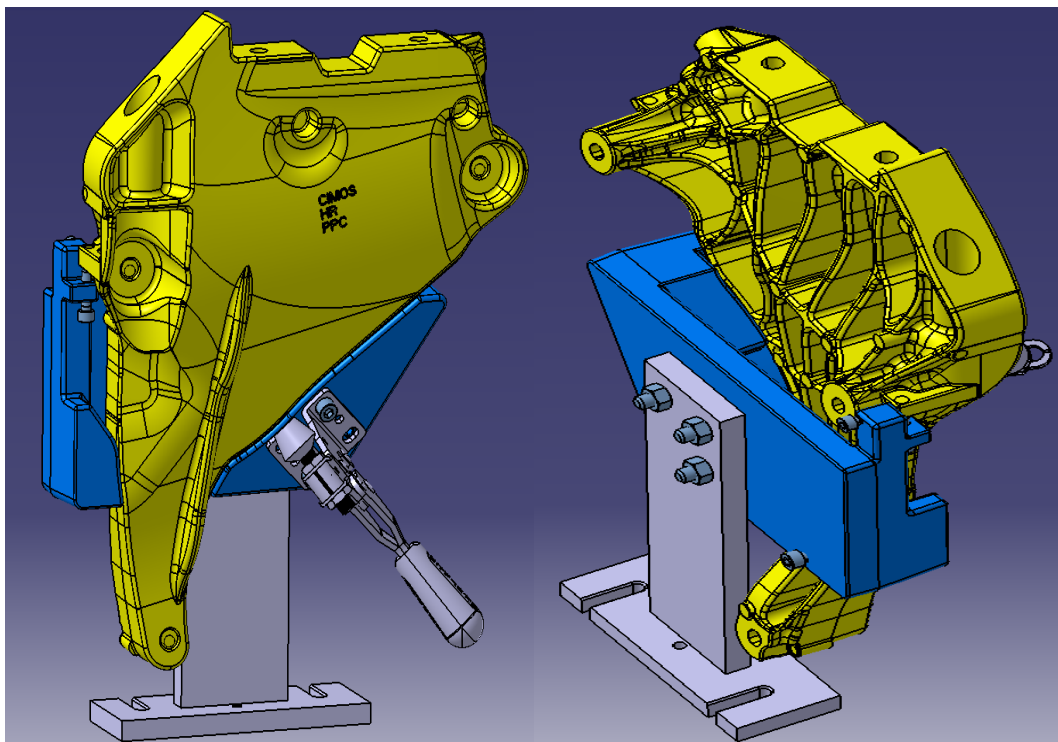
5.6. Mehanička obrada naprave i povezivanje u sklop

Odlivenu napravu potrebno je dodatno mehanički obraditi kako bi se uklonila grublja površina i ostaci uljavnog sustava, te kako bi se napravu moglo povezati u sklop. Tehnička dokumentacija, potrebna za mehaničku obradu naprave, dana je u prilogu.

Slika 65. prikazuje CAD model naprave povezane u sklop. Slika 66. prikazuje CAD model nosača motora postavljenog na sklop za pozicioniranje i stezanje. Slika 67. prikazuje mehanički obrađenu napravu, spremnu za povezivanje u sklop. Slika 68. prikazuje postupak povezivanja naprave u sklop. Slika 69. prikazuje provjeru nalijeganja nosača motora na napravu. Slika 70. prikazuje nosač motora postavljen na sklop za pozicioniranje i stezanje.



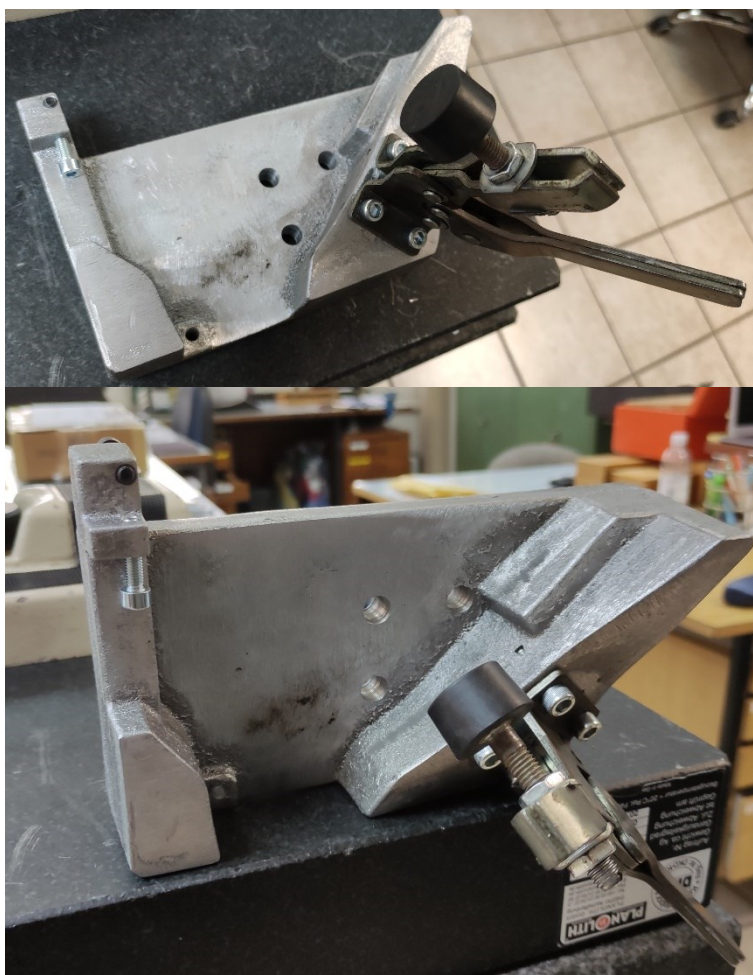
Slika 65. Model naprave povezan u sklop – CAD



Slika 66. Nosač motora postavljen na sklop za pozicioniranje i stezanje – CAD



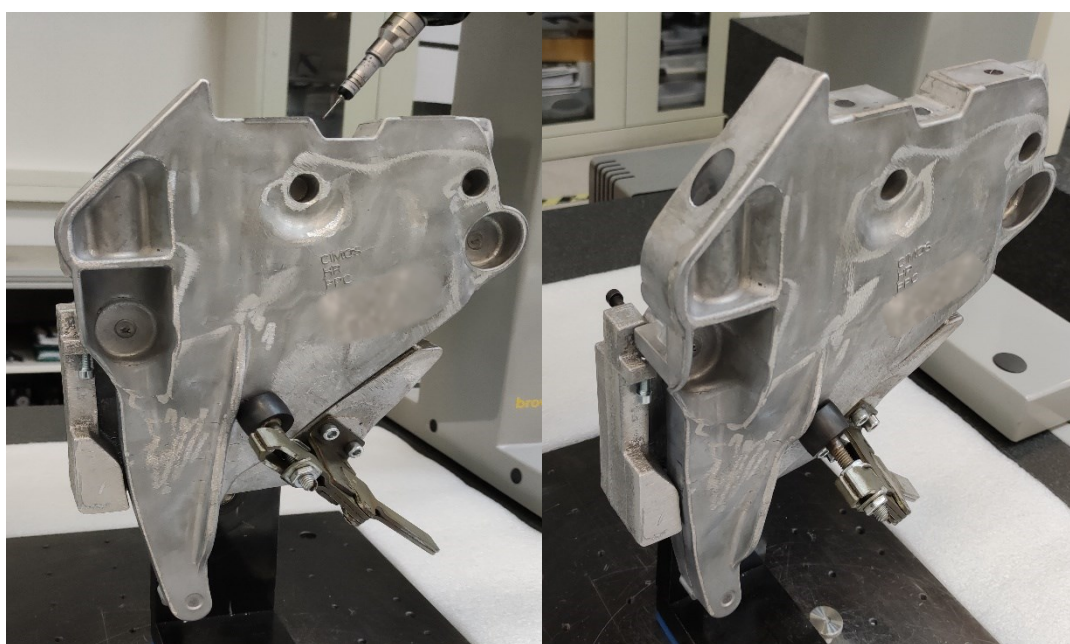
Slika 67. Mehanički obradena naprava



Slika 68. Povezivanje naprave u sklop



Slika 69. Provjera nalijeganja nosača motora na napravu



Slika 70. Nosač motora postavljen na sklop za pozicioniranje i stezanje

Nakon povezivanja naprave u sklop za pozicioniranje i stezanje, nosač motora postavlja se na sklop. Nosač naliježe na sve potrebne površine te je, nakon kalibracije mjernog robota, spreman za 3D mjerenje dimenzija.

6. ZAKLJUČAK

Svojom pojavom, aditivne tehnologije pokrenule su revoluciju te podignule razinu raznolikosti i inovativnosti. Vijek trajanja proizvoda na tržištu sve je kraći, zahtjevi za varijantnošću sve su veće, proizvodi su kompleksnije geometrije. Izravnom ili posrednom primjenom, kombinacijom više različitih tehnologija proizvodnje, aditivna proizvodnja omogućuje ispunjenje različitih zahtjeva u relativno kratkom vremenu sa zadovoljavajućom kvalitetom izratka. Integracijom aditivne proizvodnje s tradicionalnim postupcima lijevanja, dolazi se do troškovno i vremenski učinkovitog načina proizvodnje kompleksnih dijelova, specifičnih za određene primjene. Cilj ovoga rada bio je razviti i ispisati jezgru pješčanog kalupa za izradu naprave za pozicioniranje, integracijom aditivne proizvodnje i lijevanja u pješčani kalup. Cijeli proces započeo je definiranjem funkcije i zahtjeva naprave za pozicioniranje. Definiranim zahtjevima i funkcijom, započinje razvoj CAD modela naprave. Završetkom razvoja CAD modela, izabrali su se željeni parametri ispisa FDM tehnologijom i krenulo se s ispisom jezgre pješčanog kalupa. 3D skenerom skenirao se ispisani model te ga se usporedilo s referentnim CAD modelom. Ispisani model koristio se kao jezgra pješčanog kalupa, u koji se odlila aluminijska legura AlSi8Cu3.

U konačnici, hibridnim procesom, integracijom aditivne proizvodnje i lijevanja u pješčani kalup, izrađena je naprava za pozicioniranje i stezanje nosača motora. Ovakvim procesom proizvodnje, omogućila se izrada nepravilne geometrije naprave, na koju naliježe nosač motora. Korištenje aditivne proizvodnje, pokazalo se vrlo korisno u izradi kalupne jezgre. Jedan od načina kako bi se proces dodatno pojednostavio i ubrzao, jest 3D ispisom modela topive jezgre, kojoj ne bi trebalo modelirati skošenja za vađenje iz kalupa te je u konačnici ne bi trebalo ni uklanjati iz kalupne šupljine. Postizanje veće točnosti ispisanog modela, osim upotrebe kvalitetnijih pisaa, moguće je postići izborom druge aditivne tehnologije, primjerice SL/SLA. Dodatna opcija za izradu naprave, koju se može uzeti u razmatranje, je mogućnost korištenja aditivne proizvodnje s metalima, gdje bi samo korištenjem aditivne tehnologije izradili napravu za pozicioniranje nosača motora.

Znajući da se aditivnom tehnologijom mogu izraditi proizvodi, prototipovi, modeli od velikog broja materijala, različitih svojstava i namjene te vrlo kompleksne geometrije, čak i takve da se s ostalim proizvodnim postupcima ne mogu izraditi ili ukoliko se mogu, proces je vrlo zahtjevan i skup, ukazuje na golemu važnost aditivne proizvodnje u ljudskoj svakodnevnici, imala ona izravnu ili posrednu primjenu.

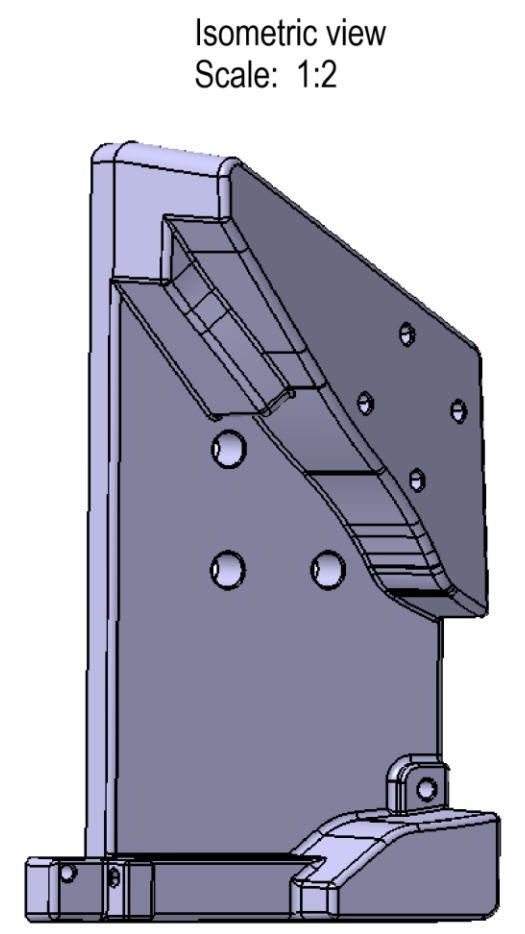
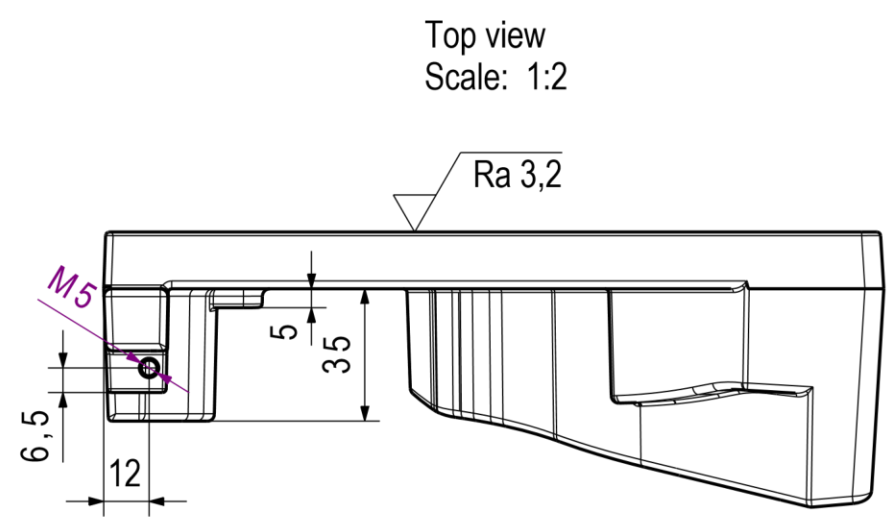
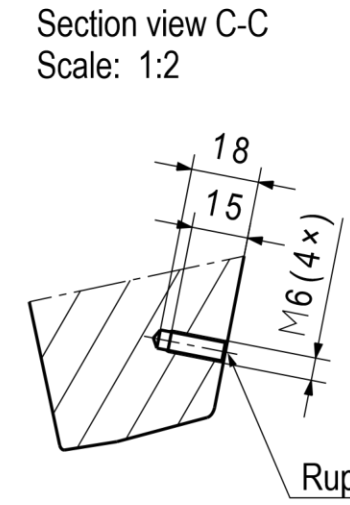
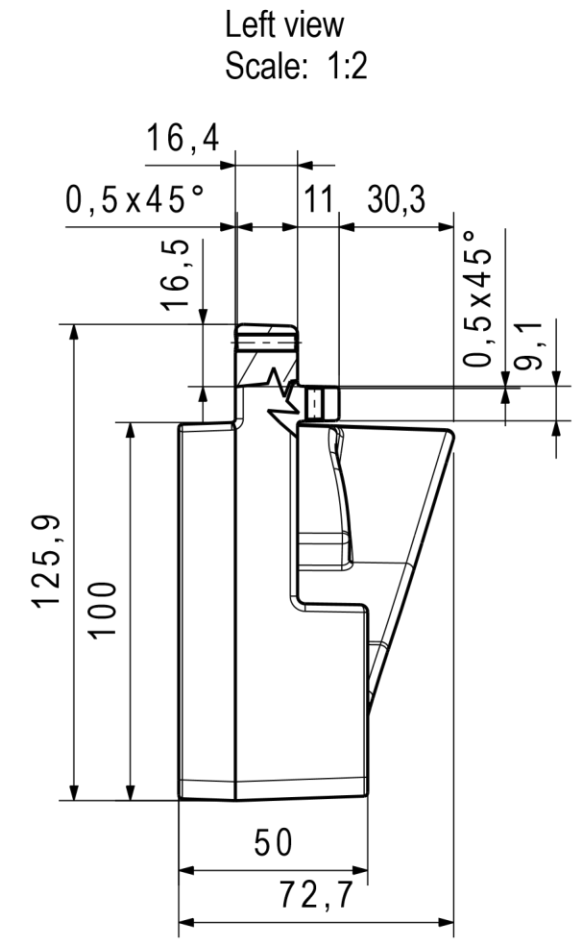
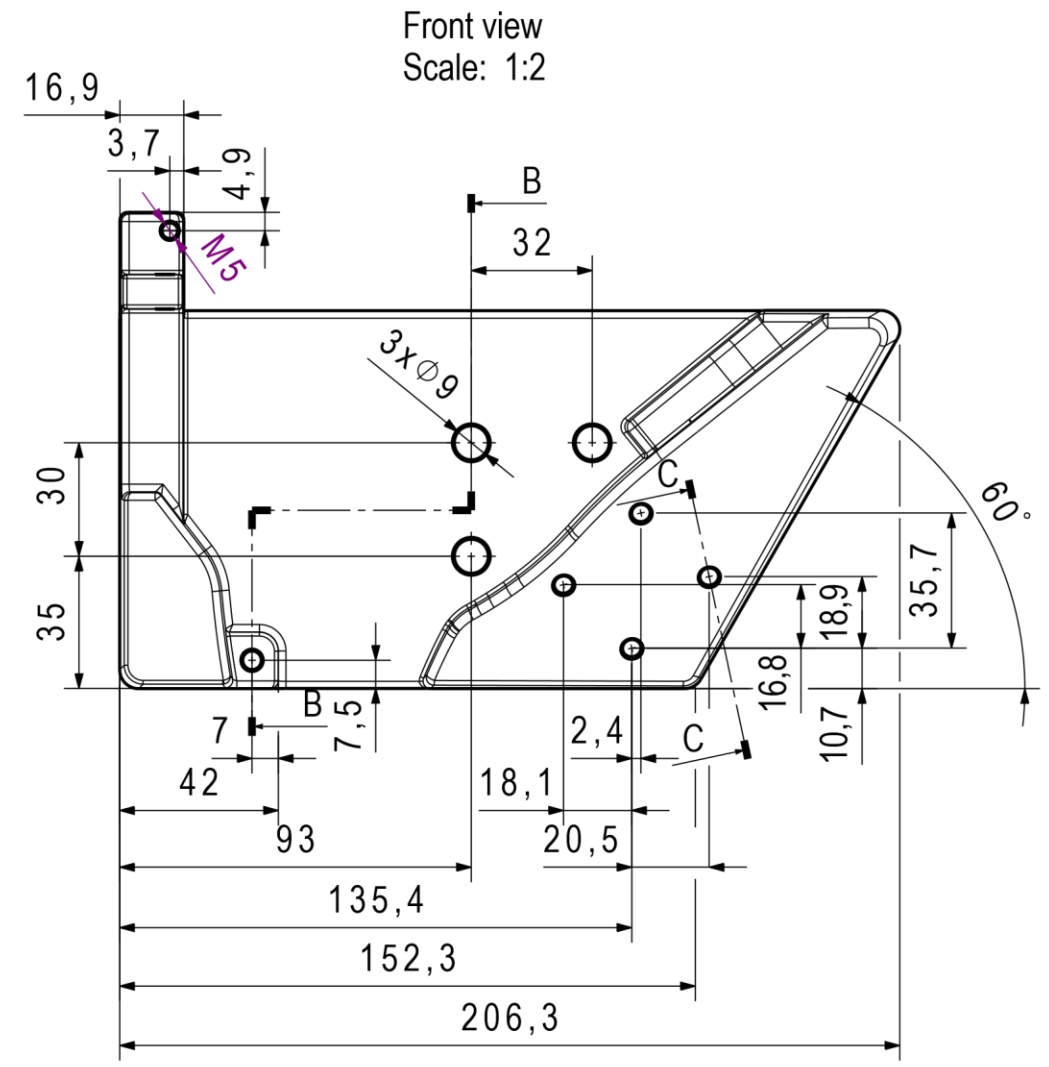
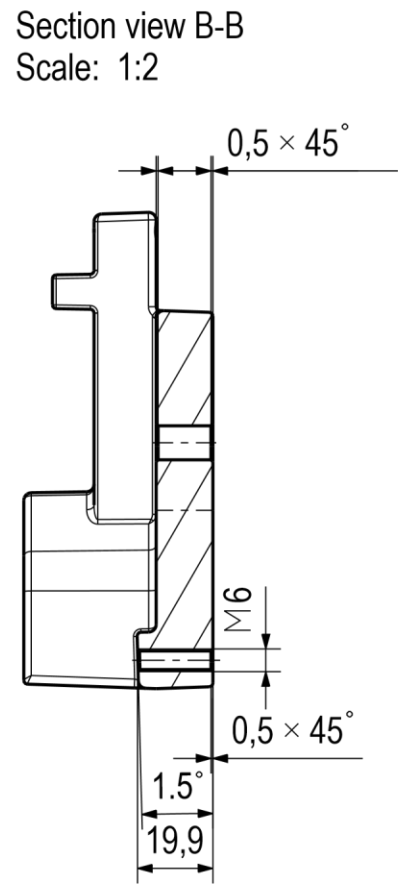
LITERATURA

- [1] [Aditivna proizvodnja - zašto je toliko važna? - IZIT](#) Pristupljeno: 22.5.2023.
- [2] [aditivna proizvodnja | Hrvatska enciklopedija](#) Pristupljeno: 23.5.2023.
- [3] Godec D, Gonzalez-Gutierrez J, Nordin A, Pei E, Ureña Alcázar J, editors. A Guide to Additive Manufacturing. Cham: Springer International Publishing; 2022.
- [4] Godec D.; Šercer M.: Aditivna proizvodnja s polimerima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2018.
- [5] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. Cham: Springer International Publishing; 2021.
- [6] Wohlers T.; Garnett T.; History of additive manufacturing; Wohlers report 2016,
Dostupno na: <https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2022/08/history2016.pdf>
- [7] Netretić D.: Aditivna proizvodnja [Završni rad]; Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, Stručni studij Strojarstva; 2018. Dostupno na: [Aditivna proizvodnja | Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR \(nsk.hr\)](#)
- [8] Janječić V.: Razvoj ušne proteze prilagođene pacijentu s pomoću aditivne proizvodnje [Diplomski rad]; Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2022. Dostupno na: [Razvoj ušne proteze prilagođene pacijentu s pomoću aditivne proizvodnje | Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR \(nsk.hr\)](#)
- [9] Wohlers T.T. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress. Wohlers Report. 2016.
- [10] Ana Pilipović: Aditivna proizvodnja, Polimeri 33(2012)3-4
- [11] [ESA - Additive Manufacturing process](#)
- [12] Horvat M.; Pregled aditivnih postupaka proizvodnje [Završni rad]; Varaždin: Sveučilište Sjever, Odjel za strojarstvo; 2016. Dostupno na: [Pregled aditivnih postupaka proizvodnje | Digitalni repozitorij Sveučilišta Sjever \(unin.hr\)](#)
- [13] [All About Digital Light Processing 3D Printing \(thomasnet.com\)](#) Pristupljeno: 27.5.2023.
- [14] [What is Digital Light Processing? | 3D Print Expo \(3d-expo.ru\)](#) Pristupljeno: 27.5.2023.

- [15] Pilipović A.: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa [Disertacija]; Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012. Dostupno na: [Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa | Repozitorij Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu \(unizg.hr\)](#)
- [16] Bauer B., Mihalic Pokopec I.; Osnove tehnologije lijevanja (Udžbenik), Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2017.
- [17] [Lijevanje – Wikipedija \(wikipedia.org\)](#) Pristupljeno: 29.5.2023.
- [18] Puhek M.: Simulacija lijevanja odljevaka od aluminijevih legura u pješčani kalup [Diplomski rad]; Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019. Dostupno na: [Simulacija lijevanja odljevaka od aluminijevih legura u pješčani kalup | Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR \(nsk.hr\)](#)
- [19] Unkić, F., Glavaš, Z.: Osnove lijevanja metala (Zbirka zadataka), Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak 2009.
- [20] Morić M.: Simulacija lijevanja nosača ležaja od aluminijeve legure u pješčani kalup [Završni rad]; Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020. Dostupno na: [Simulacija lijevanja nosača ležaja od aluminijeve legure u pješčani kalup | Repozitorij Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu \(unizg.hr\)](#)
- [21] [Opportunities for 3D Printing in Foundry and Casting Applications \(amchronicle.com\)](#) Pristupljeno: 31.5.2023.
- [22] [Sand Casting on a Large Scale with the S-Max 3D Printer from ExOne | Engineering.com](#) Pristupljeno: 31.5.2023.
- [23] [Bosch Implements Zortrax M200 3D Printers in Mondeville, France Plant with Great Success - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing](#) Pristupljeno: 9.6.2023.
- [24] [Zortrax M200 - Award-Winning Desktop 3D Printer](#) Pristupljeno: 9.6.2023.
- [25] [Zortrax M200 Product Brochure 30.10 7-1.pdf](#) Pristupljeno: 9.6.2023.
- [26] [ATOS Core - Compact 3D Scanner for small to medium sized objects \(scan-xpress.com.au\)](#) Pristupljeno: 11.6.2023.
- [27] [ATOS-Core.pdf \(3dteam.pl\)](#) Pristupljeno: 11.6.2023.

PRILOZI

- I. Tehnička dokumentacija – Tehnička dokumentacija potrebna za mehaničku obradu odlivene naprave, s ciljem njenog povezivanja u sklop.



Promjene		
Broj	Datum	Potpis

Mjerilo: 1:2	Materijal: AISI8Cu3	Površinska obrada:	Datum	Potpis
	Toplinska obrada:	Korozivna zaštita:	Crtao 3.6.2023.	Elvin Jerman
Naziv: CIMOS BUZET	Naziv: Držač za konzolu C4008000SE	Razvojni broj:	Verif	Šifra: C6003628
			Format: A3	Masa (kg):

Važno: Ovaj nacrt je intelektualna svojina P.P.C.-a. Nacrt se može upotrebljavati u svrhu za koju je bio izdan. Na zahtjev se mora vratiti.