

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Nejc SELIČ

**UPORABA DODAJALNIH POSTOPKOV ZA  
IZDELAVO PROTOTIPNEGA MODELA IN  
VZVRATNEGA INŽENIRINGA SAMEGA  
IZDELKA**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, september 2022

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**UPORABA DODAJALNIH POSTOPKOV ZA  
IZDELAVO PROTOTIPNEGA MODELA IN  
VZVRATNEGA INŽENIRINGA SAMEGA  
IZDELKA**

Diplomsko delo

|                    |                            |
|--------------------|----------------------------|
| Študent(ka):       | Nejc SELIČ                 |
| Študijski program: | Tehnologija polimerov      |
| Mentor:            | izr. prof. dr. Blaž NARDIN |

Slovenj Gradec, september 2022

## IZJAVA

Podpisani/a Nejc Selič izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se vsem, ki so sodelovali pri izdelavi in realizaciji diplomske naloge.

Najprej se zahvaljujem staršem za podporo, razumevanje in pomoč skozi celotno izobraževalno obdobje.

Zahvaljujem se tudi svoji dolgoletni partnerki za vso podporo in pomoč.

Hvala mentorju dr. Blažu Nardinu za svetovanje in vodenje skozi celotni proces izdelave diplomske naloge.

Zahvaljujem se vodji oddelka v podjetju BSH Nazarje Tomažu Stenšaku, za nasvete pri diplomski nalogi in priložnost za delo v njegovem oddelku.

Zahvaljujem se podjetju BSH Nazarje, za podporo skozi celotno obdobje izobraževanja na Fakulteti za tehnologijo polimerov. Poleg tega pa sem hvaležen za omogočanje študentskega dela v podjetju, s katerim sem pridobil veliko novega znanja, ter izkušenj.

Hvala vsem zaposlenim na Fakulteti za tehnologijo polimerov, vsem prijateljem, sošolcem, sodelavcem, vsem mentorjem in podjetju, ki so omogočili vse, ter me podpirali in usmerjali na moji študijski poti.

Hvaležen sem za vse ljudi, ki so me spremljali v življenju, ter mi pomagali premagovati ovire skozi celotno življenje.

## **POVZETEK**

### **Uporaba dodajalnih postopkov za izdelavo prototipnega modela in vzratnega inženiringa samega izdelka**

V diplomski nalogi smo uspešno izdelali plastične komponente priprave za sestavo ohišja naprave Bosch B12, mini blender. Glavni poudarek raziskave je bil, da ugotovimo, ali lahko uporabimo dodajalno metodo za izdelavo sestavnih delov za pripravo, ki se uporablja na sami serijski sestavni liniji. Eksperimentalni del diplomske naloge smo pričeli z izdelavo 3D-tiskanih delov priprave na FDM-tiskalniku. Ko smo izdelali plastični komponenti, smo naredili 3D-digitalizacijo samih komponent s transmisivno tehnologijo CT, ki nam je izdelala triangulirane modele, ki smo lahko uporabili za dimenzijsko primerjavo z originalnima CAD-modeloma. Ker je priprava že narejena, smo CAD-modele pridobili že od podjetja in smo jih zato lahko uporabili za primerjavo v programu GOM Inspect. Z našim raziskovalnim delom smo ugotovili, da dodajalne tehnologije lahko nadomestijo tehnologije z odvzemanjem materiala. Dodajalne metode so primerljive tehnologijam z odvzemanjem materiala za aplikacijo, kot je izdelava orodij za montažo izdelkov, saj pri obeh metodah prihaja do odstopanja, in sicer zaradi nenatančnosti proizvodnih metod. Dodajalna metoda je pri sami izdelavi proizvedla manj odpadne plastike, kot so jo tehnologije z odvzemanjem materiala. Poleg tega smo tudi potrdili, da je dodajalna tehnologija cenejša za izdelavo orodij, ki se uporabljajo za sestavljanje aparatov. Pri izračunu časovne primerjave smo ugotovili, da je tehnologija z odvzemanjem materiala hitrejša od dodajalne metode.

#### **Ključne besede:**

3D-tisk, dodajalne metode, vzratni inženiring, hitra izdelava orodij, FDM, 3D-digitalizacija.

## **SUMMARY**

### **Use of additive manufacturing for fabrication of a prototype model and reverse engineering of the product itself**

In the diploma thesis, we successfully produced the plastic components of the tool for assembling the housing of the Bosch B12 mini blender. The main focus of the research was to find out if we could use an additive method to make the components for the tool that is used on the serial assembly line itself. We started the experimental part of the thesis with the production of 3D printed parts of the tool on the FDM printer. When we made the plastic components, we did a 3D digitalization of the components themselves with transmissive CT technology, which produced triangulated models that we could use for dimensional comparison with the original CAD models. Since the tool has already been done, we obtained the CAD models from the company and were able to use them for comparison in the GOM Inspect program. Through our research work, we have found that additive technologies can replace subtractive technologies. Additive methods are comparable to subtractive technologies for an application such as manufacturing of tools for product assembly, as both methods have deviations due to the inaccuracy of manufacturing methods. The additive method produced less plastic waste during the manufacturing process than the subtractive technologies. In addition, we also confirmed that additive technology is a cheaper technology for the production of tools used to assemble appliances. When calculating the time comparison, we found that the subtractive technology is faster than the additive method.

#### **Keywords:**

3D print, additive manufacturing methods, reverse engineering, rapid tooling, FDM, 3D-digitalization.

**KAZALO**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 UVOD</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 TEORETIČNI DEL</b>   | <b>2</b>  |
| 2.1 Dodajalne tehnologije   | 2         |
| 2.1.1 Uporaba dodajalnih tehnologij   | 3         |
| 2.1.2 Generična skupina fotopolimerizacije  | 6         |
| 2.1.3 Generična skupina spajanje praškastega materiala  | 8         |
| 2.1.4 Generična skupina laminiranja osnovnega materiala   | 10        |
| 2.1.5 Generična skupina ekstrudiranja materiala   | 10        |
| 2.2 Ekstrudiranje termoplastov  | 12        |
| 2.2.1 Sestava tiskalnika za ekstrudiranje materiala   | 13        |
| 2.2.2 FDM in FFF metoda   | 13        |
| 2.3 Uvajanje v tradicionalno proizvodnjo  | 14        |
| 2.4 Nastanek odpadnega materiala  | 15        |
| 2.5 Vzratni inženiring  | 15        |
| 2.5.1 Uporaba vzratnega inženiringa   | 17        |
| 2.5.2 Generični proces izdelave modela  | 18        |
| 2.6 3D-digitalizacija   | 19        |
| 2.6.1 Kontaktne metode  | 20        |
| 2.6.2 Brezkontaktne metode  | 21        |
| <b>3 EKSPERIMENTALNI DEL</b>  | <b>23</b> |
| 3.1 Izdelava plastičnih komponent priprave za zatiskanje ohišja B12   | 23        |
| 3.2 3D-digitalizacija komponent   | 26        |
| 3.3 Časovna primerjava  | 29        |
| 3.3.1 Časovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12                      | 30        |
| 3.3.2 Časovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12                       | 31        |
| 3.4 Stroškovna primerjava   | 31        |
| 3.4.1 Stroškovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12                   | 33        |
| 3.4.2 Stroškovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12                    | 34        |
| 3.5 Primerjava nastanka odpadnega materiala   | 34        |
| 3.5.1 Primerjava nastanka odpadnega materiala med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12 | 37        |
| 3.5.2 Primerjava nastanka odpadnega materiala med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12  | 37        |
| 3.6 Dimenzijski podatki   | 37        |
| 3.7 Primerjava modelov  | 40        |
| 3.7.1 Primerjava komponente ležišče ohišja B12  | 42        |
| 3.7.2 Primerjava komponente obroč zatisni B12   | 43        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4 REZULTATI IN DISKUSIJA</b>  | <b>44</b> |
| 4.1 Časovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala                                  | 44        |
| 4.2 Stroškovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala                               | 44        |
| 4.3 Primerjava nastanka odpadnega materiala med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala             | 45        |
| 4.4 Dimenzijska primerjava   | 45        |
| <b>5 SKLEP</b>   | <b>47</b> |
| SEZNAM LITERATURE IN VIROV   | 49        |
| SEZNAM SLIK  | 50        |
| SEZNAM TABEL   | 51        |
| SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV   | 52        |
| SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC   | 53        |
| PRILOGE  | 54        |
| Priloga 1: Prikaz komponente med tiskanjem   | 54        |
| Priloga 2: Proces raztapljanja podpornega materiala  | 55        |
| Priloga 3: Dimenzije (mm) komponente ležišče ohišja B12  | 56        |
| Priloga 4: Dimenzije (mm) komponente obroč zatisni B12   | 57        |
| Priloga 5: Ponudba dobavitelja za izdelavo komponente ležišče ohišja B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala | 57        |
| Priloga 6: Ponudba dobavitelja za izdelavo komponente obroč zatisni B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala  | 58        |



## 1 UVOD

21. stoletje je doba novega pogleda na tehnološki razvoj. V tem obdobju se srečujemo z različnimi težavami – od hitrega spreminjanja izdelkov do odpadkov, ki nastanejo pri konvencionalnih metodah. Dodajalne metode so privedle do tega, da si lahko vsak posameznik ne le predstavlja izdelek, temveč ga tudi lahko izdelava. Tako lahko ljudje sami izdelajo objektivne, funkcionalne izdelke, prototipe itd. Dodajalne tehnologije so se razvile že v 60. letih prejšnjega stoletja, a so se takrat še razvijale in tudi bile namenjene samo za industrijsko uporabo. S predstavitvijo nizkocenovnih namiznih tiskalnikov se je povečalo število uporabnikov, kar je privedlo do razvoja ne le strojne in programske opreme, temveč tudi do samih metod [1].

Velik interes je predvsem pri uporabi tiskalnikov za izdelavo orodij in pripomočkov, ki so bili do sedaj izdelani s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Dodajalne metode lahko uporabimo predvsem za izdelavo zahtevnih komponent orodja in tudi za zmanjšanje odpadnega materiala, ki nastane pri tehnologijah z odvzemanjem materiala. Poleg tega pa lahko zmanjšamo tudi same stroške in čas izdelave orodij. Dodajalne metode so univerzalno sredstvo od samega razvoja do uporabe v sami serijski proizvodnji. Nudijo tako fleksibilne možnosti kot nobena druga vrsta tehnologij.

Pred samim začetkom izdelave diplomskega dela smo predpostavili naslednje hipoteze:

1. Z dodajalnimi tehnologijami lahko za izbrane aplikacije dosegamo zahtevano tolerančno območje.
2. Z dodajalnimi tehnologijami lahko za izbrane aplikacije izdelamo cenejše izdelke, kot jih lahko s tehnologijami z odvzemanjem materiala.
3. Z dodajalnimi tehnologijami lahko za izbrane aplikacije proizvedemo manj odpadnega materiala kot s tehnologijami z odvzemanjem materiala.
4. Z dodajalnimi tehnologijami lahko hitreje izdelamo izdelke za izbrane aplikacije kot jih lahko s tehnologijami z odvzemanjem materiala

## 2 TEORETIČNI DEL

### 2.1 Dodajalne tehnologije

Zaradi hitre spremembe trga in zapletenejših oblik izdelkov si danes ne moremo predstavljati razvoja brez uporabe 3D-modeliranja, ki omogoča hitrejšo spremembo in tudi samo izdelavo novih izdelkov [2].

Ker je v modelirniku računalniški prikaz 3D-modela, je vizualna predstavitev modela ustrezna, vendar pa ne more nadomestiti fizičnega prototipnega izdelka, saj si bolje predstavljamo, da poleg vizualnega čutila uporabljamo tudi tipanje in s tem lažje rešujemo probleme na posameznem izdelku. Zaradi tega se vse bolj razvijajo tehnologije, ki omogočajo kakovostno in hitro izdelavo prototipnega ali pa kar končnega izdelka. Metoda pa mora biti cenovno ugodna in okolju prijazna. Da izdelamo končni 3D-prototip ali izdelek, poznamo več različnih proizvodnih tehnologij, ki so na splošno razvrščene v štiri osnovne skupine [1]:

- preoblikovalne tehnologije (formative technologies),
- tehnologije z odvzemanjem materiala (subtractive technologies),
- dodajalne tehnologije (additive technologies),
- hibridne tehnologije (hybrid technologies).

Preoblikovalne tehnologije, kot že samo ime pove, uporabljajo postopek preoblikovanja polizdelkov v končne izdelke. To tehnologijo najbolje predstavlja tehnologija termoformiranja, ki deluje tako, da polizdelke, kot so polimerne plošče ali folije, s pomočjo toplote in stiskalnic preoblikuje v želene izdelke. Ta metoda se uporablja predvsem v živilski industriji za izdelavo embaliranih posod [1].

Pri tehnologijah z odvzemanjem materiala pogosto uporabljamo kratico CNC (Computer Numerical Control), ki označuje računalniško krmiljene obdelovalne stroje, ki so opremljeni z orodji za obdelavo. Orodja, ki uporabljajo CNC krmiljeni stroji, omogočajo postopno odvzemanje materiala, kot so frezanje, brušenje, vrtanje in struženje, ter tako izdelajo končni izdelek [1].

Imamo pa tudi hibridne tehnologije, ki končni predmet gradijo delno z dodajanjem in delno z odvzemanjem osnovnega materiala. Eden od primerov te vrste tehnologij je LOM – laminacija pol (sheet lamination), ki deluje tako, da se z enega valja na drugega previja osnovni material in se ga medtem s pomočjo laserja reže na želene oblike [1].

V zadnjih letih se srečujemo z dodajalnimi ali slojevitimi tehnologijami v proizvodnih in razvojnih procesih. Ta tehnologija deluje tako, da gradi končni izdelek z dodajanjem osnovnega materiala v slojih. Za to vrsto tehnologije se predvsem uporabljajo naprave, kot so 3D-tiskalniki [1].

AM (Additive Manufacturing) je kratica za dodajalne tehnologije, ki se imenuje tudi slojevita tehnologija, saj se 3D-predmeti gradijo v slojih. Za dodajalne tehnologije pa se predvsem uporablja izraz 3D-tiskanje ali 3D-tisk [3].

Tiskalniki so aparature, ki pretvorijo digitalne oziroma virtualne računalniške 3D-modele v fizične predmete z dodajanjem materiala. Skupno vsem tehnologijam 3D-tiska je, da se predmeti gradijo s tankimi sloji materiala in se zato, kot smo že omenili, imenujejo tudi slojevite tehnologije. Hiter razvoj samih materialov je privedel do uporabe tiskalnikov kot primer prototipnega orodja [4].

Vendar pa se jih čedalje več uporablja predvsem za izdelavo končnih izdelkov. Zaradi široke uporabe tiskalnikov v skoraj vseh industrijah je postopek dodajalnih tehnologij privedel do personalizacije izdelkov. V takih primerih izdelave govorimo o hitrem izdelovanju RM (Rapid Manufacturing) oziroma neposrednem digitalnem izdelovanju DDM (Direct Digital Manufacturing). Metoda DDM se uporablja predvsem za izdelavo prilagojenih izdelkov, kot so razni pripomočki za ljudi s posebnimi potrebami, na primer proteze, slušni aparati, prilagodljivi čevlji in podobni izdelki, ki morajo biti prilagojeni vsakemu posamezniku posebej [1].

Postopek izdelave 3D-izdelka se prične z uporabo CAD-programov, v katerih izdelamo želeni objekt. Postopek digitalne izdelave 3D-izdelka se imenuje 3D-modeliranje. Lahko pa uporabimo drugačen pristop, v katerem že imamo obstoječi fizični model in s pomočjo 3D-skeniranja ali fotografiranja izdelamo digitalni model. Ta postopek se imenuje vzratni inženiring (reverse engineering), kjer lahko uporabimo več različnih metod za pridobivanje 3D-modela [2].

Hitra izdelava prototipov

RP (Rapid Prototyping) je hitra izdelava prototipov, ki se nanaša na razred tehnologij. Te se uporabljajo za izdelavo fizičnih objektov plast za plastjo, in sicer neposredno iz podatkov CAD-modela. Te tehnike omogočajo oblikovalcem, da hitro izdelajo oprijemljive prototipe svojih modelov in ne le dvodimenzionalne slike [3].

Za aplikacije, ki niso za izdelavo prototipov, se hitra izdelava prototipov pogosto imenuje tudi izdelava trdne proste oblike ali večplastna proizvodnja. Za majhne serije in zapletene dele so te tehnike pogosto najboljši proizvodnji procesi, ki so na voljo. Vendar pa niso rešitev za vsak problem izdelave delov, navsezadnje sta tehnologija z odvzemanjem materiala in pa brizganje bolj ekonomična serijska postopka [3].

### **2.1.1 Uporaba dodajalnih tehnologij**

Uporaba dodajalnih metod se vedno bolj širi na različna področja – tako na proizvodnjo kot sam razvoj. Nikoli prej se nismo srečali z orodjem, ki nam nudi popolno samostojno izdelavo prototipov in pa izdelkov. Tako lahko lažje svoje ideje prenesemo s skice v realni prototip ali celo izdelek [1].

Metodo lahko uporabljamo za izdelavo maloserijskih izdelkov ali pa izdelamo orodja, ki jih uporabljamo za množično proizvodnjo tehniko [5]. V strojnem svetu lahko 3D-tisk nadomesti skoraj vsako fazo v samem procesu izdelave izdelka. Lahko se uporablja v samem razvoju, kot orodje za izdelavo priprav in pa merilnih priprav na sestavnih linijah, pa tudi kot metoda za izdelavo orodij za brizganje plastičnih komponent. Seveda je potrebno še mnogo raziskav na tem področju vendar sama tehnologija ponuja velik spekter uporabe – ne samo na strojnem področju, ampak tudi na drugih, kot so na primer medicina, biologija, agronomija, elektrotehnika, računalništvo in na večini drugih naravoslovnih področij [1].

### Hitra izdelava orodja RT

RT (Rapid Tooling) je kratica za hitro izdelovanje orodij. Metoda je namenjena aplikacijam, ki morajo biti izdelane v kratkem času. RT-orodja se uporabljajo predvsem za posebne potrebe, vključno z izdelavo prototipov in odpravljanjem obstoječih težav. Hitra izdelava prototipov se pogosto ne uporablja za obsežne in dolgoročne operacije [4].

Tehnologije z odvzemanjem materiala zahtevajo v nekaterih primerih več časa in sredstev za izdelavo orodij v primerjavi z RT, ta namreč omogoča hitro zagotavljanje orodij za zahtevane izdelke, ki podjetjem omogočajo hitro izdelavo zelenih produktov. Vendar so ta orodja manj odporna na obrabo, zato so namenjena manjšim serijskim izdelkom. Primer postopka je v zobozdravstvu, kjer se je prvotno uporabljal alginatni ali voščeni odtis zob. Z novim napredkom lahko zdravniki posnamejo zobne loke in pacientu pravilno in hitro izdelajo kalup, ki omogoča večjo natančnost in boljše prilaganje [4]. Slika 1 prikazuje orodje, izdelano s pomočjo postopka RT.



*Slika 1: Izdelava prototipnega orodja [3]*

Skoraj nobeno področje v proizvodnji pa ni tako občutljivo, kot je izdelava orodij, saj so bila orodja za stiskanje, orodja za brizganje in tlačno litje doslej najdražja komponenta v kateri koli serijski proizvodnji. Cena orodja pogosto celo presega nabavne stroške stroja, na katerem se uporablja. Razlog je v tem, da so orodja tista komponenta, ki odloča o kakovosti izdelkov, narejenih na njih. Proizvodnji procesi orodij so bili do sedaj

precej zapleteni in uporabljajo veliko obdelovalnih korakov in orodij, kot so CNC rezkalni stroji, stroji za erodiranje ter stroji za natančno brušenje, ki so dragi sistemi. Na tem področju se zdaj uveljavlja 3D-tiskanje s postopkom RT, ki je bil do sedaj bolj domena za RP, vendar pa se že kratek čas uporablja za serijsko proizvodnjo in pa celo kot proizvodni proces za izdelavo orodij. Hitra izdelava orodij z dodajalnimi metodami se nanaša na proizvodnjo orodij, ki jih je mogoče preizkusiti. Za hitro izdelana orodja pridejo v poštev aplikacije, kot so [4]:

- orodja za globok vlek in tankoplastne plastične dele (postopek vakuumskega oblikovanja),
- priprave za preizkušanje vzorcev (testna orodja),
- orodja za brizganje,
- stiskalna orodja za mehke in trdne materiale (npr. aluminijasta pločevina,
- komponente na linijah (držala, stojala ...),
- orodja za prebijanje tankih materialov z nizko natezno trdnostjo (papir, debela folija, plastika, MDF, furniran les),
- orodja za vlivanje (kovin, voska, betona...).

RT vključuje izdelavo modela orodja v razmerju 1 : 1 kot prvega koraka, kar v bistvu pomeni izdelavo uporabnega proizvodnega orodja z dodajalno metodo. V praksi RT orodja že nadomeščajo tradicionalno izdelana orodja v nekaterih aplikacijah [4].

Vse, kar je potrebno za izdelavo RT orodja, sta 3D-tiskalnik in programska oprema CAD. 3D-tiskalnik izdeluje dodajalno, torej ne ustvarja odpadkov, kot so ostružki in brusilni prah (plastike, kovine, itd.), posledično je njegova poraba materiala zelo učinkovita. Okoli dodajalnih metod se nenehno ustvarjajo novi izrazi. Ti so deloma sopomenke, deloma se njihovi pomeni prekrivajo, vendar jih je treba še vedno razlikovati med seboj [3]. Ko gre za metodo RT, so se v industrijskih aplikacijah, povezanih z dodajalnimi metodami, uveljavili naslednji izrazi:

- Neposredno orodje – DT (Direct Tooling): Orodja izdelana z DT-metodo se lahko uporabljajo takoj v proizvodnem procesu.
- Posredno orodje – IT (Indirect Tooling): Pri posrednem orodju se ne izdelava končno orodje, temveč testni model za orodje, ki bo izdelano pozneje. Mora biti zelo odporen in primeren za izdelavo nekaj prototipov predserijskih izdelkov. Vendar veliko serij ni mogoče realizirati na posrednem proizvodnem orodju.
- Prototipno orodje – PT (Prototype Tooling): Prototipno orodje je tesno povezano s posrednim orodjem. Opisuje tako izdelavo prototipnega orodja kot tudi prototipnega končnega izdelka, ki nista izdelana na orodju.
- Hitra izdelava/prototipiranje – RM/P (Rapid Manufacturing/Prototyping): Hitro je sinonim za 3D-tiskanje. Vendar to ne pomeni nujno, da se uporablja pri izdelavi orodij. RM se lahko nanaša tudi neposredno na 3D-tisk želenega končnega izdelka. Proizvodnja posameznih kosov in predserijskih modelov se imenuje RP (Rapid Prototyping) hitra izdelava prototipov. Če pa je treba s 3D-tiskanjem proizvesti velike količine, se to imenuje RM.

- Hitro popravilo – RR (Rapid Repair): Hitri postopki 3D-tiskanja so še posebej zanimivi za vzdrževanje in popravila. Pod ključno besedo RR ali hitro popravilo se 3D-tiskalniki uporabljajo za izdelavo rezervnih delov [4].

### **Klasifikacija dodajalnih tehnologij**

Dodajalne metode se delijo glede na tehnologijo izdelave na laserske tehnologije, ekstrudiranje materialov, navarjenje itd. Poleg tega se delijo glede na stanje uporabljenega materiala pri procesu dodajalne tehnologije. Nekatere tehnologije se razvrščajo na rastrske in vektorske. Če se material nanaša prekinjeno, govorimo o rastrskih tehnologijah, če pa je nanašanje neprekinjeno, pa govorimo o vektorskih tehnologijah. Dodajalne metode se delijo tudi glede na agregatno stanje uporabljenega materiala in pa tudi samega utrjevanja materiala – ali je to kemijski ali pa fizikalni pojav [1].

Standard ASTM F2792-10 razčlenjuje tehnologije v generične skupine zaradi boljšega pregleda.

- So tehnologije zasnovane na procesu fotopolimerizacije, ki omogoča tisk predmetov s selektivnim utrjevanjem tekočih fotopolimerov s svetlobnim virov (ASTM – vat photopolimerization, material jetting).
- Pri tej skupini tehnologij se uporabljajo praškasti materiali z različnimi načini povezovanja za gradnjo izdelka. Povezujejo se lahko z nanašanjem veziva ali pa z uporabo termičnih virov z različnimi močmi (ASTM – binder jetting, powder bed fusion, direct energy deposition).
- Ta skupina opredeljuje tehnologije, ki gradijo predmete z nalaganjem in lepljenjem ali laminiranjem osnovnega materiala (po navadi sta to papir ali folija) v obliki pol ali zvitkov. Te tehnologije spadajo med hibridne metode, saj poleg nalaganja uporabljajo tudi odzemanje (ASTM – sheet lamination).
- Zadnja skupina tehnologij pa deluje po principu gradnje predmetov z uporabo metode ekstrudiranja različnih materialov (ASTM – material extrusion) [1].

### **2.1.2 Generična skupina fotopolimerizacije**

Tehnologije, ki so zasnovane na principu fotopolimerizacije, uporabljajo fotopolimere, ki pod vplivom svetlobnega vira polimerizirajo in spremenijo agregatno stanje iz tekočega v trdno. Postopek izdeluje modele po principu selektivne slojevite gradnje 3D-objekta. Zaradi selektivnega utrjevanja se tiskani objekt utrjuje le na mestih, kjer so stene objekta. Za strjevanje fotopolimera se najpogosteje uporabljajo UV-laserji [1].

Generična skupina fotopolimerizacije zajema več različnih tehnologij, ki delujejo po principu utrjevanja fotopolimera. Tehnologije fotopolimerizacije so:

- stereolitografija (SLA),
- projekcijska tehnologija (DLP),
- dvofotonska fotopolimerizacija (2PP),
- kaplično nanašanje ali brizganje materiala (Material Jetting),

- stereolitografija (SLA).

Tiskalniki, ki delujejo po principu stereolitografije, so znani pod kratico SL (stereolithography) in so označeni s kratico SLA. Tehnologija uporablja računalniško uravnan svetlobni vir po navadi je to UV-laser za utrjevanje objekta v kadi s tekočim fotopolimerom [1].

Sama konstrukcija SLA-tiskalnikov je dokaj preprosta. Zahtevani 3D-objekt se tiska na kovinski delovni plošči, ki je med tiskanjem potopljena v kad s fotopolimerom. Ko je delovna plošča potopljena v fotopolimer, UV-laserski snop začne s selektivno fotopolimerizacijo. Ko UV-laser utrdi prvi sloj, se kad s tekočim fotopolimerom spusti za debelino sloja in to ponavlja, dokler se ne izdelata popolni 3D-model. Če ima objekt, ki se tiska, zahtevno geometrijsko obliko, je treba uporabiti podporni material (predvsem na previsih) [1].

Industrijski tiskalnik podjetja 3D System, imenovan ProXTM 950, izdeluje objekt z debelino slojev od 0,05 do 0,15 mm in zagotavlja visoko ponovljivost. Delovni volumen tiskalnika je 150 cm x 75 cm x 55 cm. Zaradi večjega delovnega volumna se uporablja predvsem za produkcijsko tiskanje. Poleg industrijskih tiskalnikov pa obstajajo tudi namizni tiskalniki, kot je na primer Form 1 podjetja Formlabs. Namizni tiskalnik izdeluje objekte z debelino sloja 0,025 mm do 0,200 mm, vendar pa je delovni volumen tiskanja 12,5 cm x 12,5 cm x 16,5 cm. Tiskalniki SL so za osebno uporabo trenutno manj razširjeni kot tehnologija ekstrudiranja termoplastičnih materialov, predvsem zaradi visoke cene fotopolimerov in tudi same toksičnosti materialov [1].

- Projekcijska tehnologija (DLP)

Tehnologija projekcijskega digitalnega procesiranja svetlobe – DLP (digital light processing) deluje po principu utrjevanja fotopolimera z digitalnim projektorjem. Prednost te tehnologije je predvsem v tem, da lahko hkrati utrjuje celotno površino sloja objekta. Tehnologija zagotavlja visoko stopnjo natančnosti [1].

Naprave DLP uporabljajo za gradnjo objektov volumetrične piksele oziroma voksle. Tiskalnik s pomočjo projektorja projicira piksele v fotopolimer in s tem omogoča boljšo gladkost površine objekta in večjo natančnost kot tehnologija stereolitografije [1].

Tiskalniki imajo podobno konstrukcijo, kot jo imajo SLA-tiskalniki, vendar namesto UV-laserja uporablja UV-projektorje visoke ločljivosti. DLP-tiskalniki so primerni za protetiko, uporabo v zlatarstvu, profesionalne modeliste itd.

Proizvajalci tiskalnikov ponujajo tudi fotopolimerne smole, ki se lahko uporabljajo za različna področja uporabe. Najbolje je uporabljati smole proizvajalcev tiskalnika, saj so bile izdelane predvsem za določen tiskalnik in specifikacije tiska. Pri tej metodi je debelina sloja odvisna od vrste materiala. Območje debeline sloja je od 20  $\mu\text{m}$  in 100  $\mu\text{m}$  [1].

#### - Dvofotonska fotopolimerizacija (2PP)

Tehnologija dvofotonske fotopolimerizacije je zelo podobna stereolitografiji. Ta tehnologija je bila razvita v sodelovanju podjetij Nanoscribe in Additive Manufacturing Technologies (AMT) ter tehnične univerze na Dunaju [1].

Tehnologija 2PP je selektivna metoda, ki uporablja pulzirajoči laser za utrjevanje fotopolimerov. V primerjavi s SLA-metodo, ki omogoča tisk z ločljivostjo 0,025 mm in debelino sloja 0,05 mm, je tehnologija 2PP 250-krat bolj natančna in poleg tega zagotavlja višjo hitrost tiskanja. Metoda izdeluje izdelke majhne velikosti do 500  $\mu\text{m}$ , zato ima predvsem prihodnost uporabe na medicinskem področju in pa za tisk optoelektronskih vezij [1].

#### - Kapljično nanašanje ali brizganje materiala (Material Jetting)

Tehnologija kapljičnega nanašanja ali brizganja materiala osnovni tekoči fotopolimerni material injicira skozi tiskalno glavo in ga nato točkovno utrdi z UV-svetlobo. Material se selektivno nanaša v slojih. ASTM je to tehnologijo poimenovalo PolyJet (photopolymer jetting). Ime tehnologije pa je odvisno od proizvajalca, saj podjetja uporabljajo tudi druga imena, kot so MJM (multi jet modelling), MJP (multi jet printing), ipd. [1].

Metoda navadno uporablja podporne strukture, ki se injicirajo v obliki gela sočasno, ko se tiska tudi želeni objekt. Objektu se podporne strukture odstranijo in ni potrebne naknadne obdelave modela. Za to tehnologijo je že razvitih veliko ustreznih materialov, kot so trdni, fleksibilni, prozorni, gume, imitacije ABS itd. Tiskalniki, ki uporabljajo tehnologijo PolyJet Matrix, ki je blagovna znamka podjetja Stratasys, lahko tiska z več materiali hkrati, kar je prednost pri izdelavi 2K-izdelka [1].

Tehnologija PolyJet se uporablja za izdelavo natančnih in gladkih konceptualnih in funkcionalnih izdelkov ter orodij. Predvsem se uporablja na področju protetike in zobozdravstva. Metoda ima ločljivost 16  $\mu\text{m}$  in natančnost večjo od 100  $\mu\text{m}$ , tako lahko izdelamo zapletene geometrije in izdelke s tankimi stenami in širokim naborom materialov [1].

### **2.1.3 Generična skupina spajanje praškastega materiala**

Tehnologije povezovanja praškastega materiala za izdelavo 3D-predmetov lahko uporabljajo različne materiale, kot so: keramika, steklo, kovine, mavec, polimere itd. Tehnologija spajanja praškastega materiala uporablja različne načine povezovanja materiala, ki je predvsem odvisen od samega osnovnega materiala. Tehnologijo z uporabo spajanja praškastega materiala tako ločimo na tri skupine:

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

Metoda zajema širok spekter tehnologij, ki praškasti material selektivno spajajo z uporabo toplotnih virov [1].



Prva tehnologija, ki je bila razvita, je selektivno lasersko sintranje – SLS (selective laser sintering). Tehnologija deluje tako, da praškasti material spaja z uporabo laserskega vira. Za izdelavo predmetov je na voljo veliko različnih materialov, predvsem pa polimerni. Lahko uporabljamo tudi dvokomponentni material, vendar je treba najprej prevleči material, ki ima nižjo točko tališča. SLS je zelo natančen proces in omogoča izdelavo kakovostnih izdelkov. Zaradi potrebe po močnejših toplotnih virih so se razvile modifikacije obstoječe SLS-tehnologije. Modifikacije SLS-tehnologije so na primer DMLS, SLM in LaserCusing. SLS-tiskalniki lahko dosežejo debelino sloja od 0,03 do 0,200 mm. Površine predmetov so kakovostne in pogosto ne potrebujejo naknadne obdelave [1].

Druga skupina spajanja slojev praškastega materiala je taljenje z elektronskim snopom. Ta tehnologija namesto laserskega izvora za spajanje uporablja elektronski snop. Tehnologija deluje tako, da najprej izvede predgretje materiala, nato drugi prehod stali zunanjo plast materiala in tretji prehod stali še preostali material. Prednost tehnologiji pred SLS ali DMLS tehnologijami je v tem, da lahko izdelava predmete polne gostote. Tehnologija se predvsem uporablja v letalski in vesoljski industriji. Sama natančnost tehnologije je okoli 0,13 mm [1].

Tretja tehnologija v skupini spajanja slojev praškastega materiala je selektivno toplotno sintranje – SHS (selective heat sintering) podjetja Bluepinter. Tehnologija deluje na principu, da za sintranje osnovnega polimera uporablja termično tiskalno glavo. Prednost te tehnologije je predvsem poceni osnovni material. Deluje pa tako, da termična tiskalna glava skenira površino in hkrati topi ter povezuje polimerne delce. Tehnologija omogoča tisk z debelino sloja 0,1 mm in pa debelino sten 1 mm [1].

#### - Kapljično nanašanje in brizganje veziva (Binder Jetting)

Zadnja skupina spajanja praškastega materiala je kapljično nanašanje in brizganje veziva. Objekti se pri tej metodi selektivno povezujejo iz delcev praškastega materiala, ki je lahko na osnovi polimerov, keramike, kovine, stekla, mavca in tudi živil [1].

Tehnologija deluje tako, da se na delovno platformo ali posteljo, na katero se natančno nanese vsak posamezen sloj praškastega materiala, nato se nanj selektivno kapljično nanaša vezivo tako sloj za slojem gradi želeni objekt. Zaradi uporabe praškastega materiala tiskanje podpornih struktur ni potrebno, saj neuporabljeni praškasti material zagotavlja dovolj podpore tudi pri predmetih s previsnimi mesti. Tehnologije, ki delujejo po principu kapljičnega nanašanja in brizganja veziva, so tridimenzionalno tiskanje – 3DP (three dimensional printing), tiskanje kovin – BJMP (binder jetting metal printing), tiskanje keramike – BJCP (binder jetting ceramic printing) in tiskanje stekla – BJGP (binder jetting glass printing) [1].

#### - Lasersko navarjanje

Tehnologije laserskega navarjanja uporabljajo kovinski praškasti material, ki ga usmerjajo skozi šobo neposredno v laserski snop z veliko močjo. Praškasti material

hitro prehaja iz trdne v taljeno obliko. Za to vrsto tehnologije se uporablja izraz lasersko praškovno oblikovanje – LPF (laser powder forming) [1].

Materiali, ki se uporabljajo pri tej metodi, so po navadi baker, nerjavna jekla, nikelj, aluminij, kobalt, titan ipd. Same naprave so v hermetično zaprtem ohišju, napolnjenem z argonom. Ta preprečuje, da prihaja do onesnaževanja tiskanega predmeta in tudi same oksidacije. Ločljivost te metode je okoli 25 µm in dosega natančnost okoli 250 µm. Tehnologije se uporabljajo za tiskanje kovinskih izdelkov, popravljanja poškodovanih kovinskih izdelkov, elektronskih vezij in predvsem v industriji orožja ter letalski industriji [1].

#### **2.1.4 Generična skupina laminiranja osnovnega materiala**

Tehnologija deluje po principu laminacije materiala. Metoda je hibridna, saj se pri gradnji predmeta material dodaja, po končani izdelavi 3D-modela pa se ves preostali material odstrani, gre za dodajalno in hkrati za tehnologijo z odvzemanjem materiala. Poleg tega se metoda razlikuje od ostalih treh generičnih skupin po tem, da ni možno tiskanega predmeta reciklirati in ponovno uporabiti [1].

V to skupino se uvršča tehnologija nalaganja krojenih plasti – LOM (laminated object manufacturing). Metoda deluje tako, da se objekt gradi v slojih z lepljenjem osnovnega materiala, ki so lahko papir, polimer ali pa kovinska folija. Material se dodaja tako, da se odvija iz enega zvitka na drugi zvitok, medtem pa se s pomočjo laserja izreže želena oblika in na koncu doda adhezivno sredstvo za spajanje slojev iz folije. Ko se izdelava sloj, se delovna plošča spusti za debelino materiala in postopek se ponovi, dokler ni izdelan cel predmet [1].

Tehnologija se uporablja za izdelovanje maket, funkcionalnih prototipov, konceptualnih prototipov in umetniških eksponatov. V industriji se predvsem uporabljajo za izdelavo pramodelov, s katerimi izdelamo kalupe za poznejše vlivanje kovin [1].

#### **2.1.5 Generična skupina ekstrudiranja materiala**

Tehnologija ekstrudiranja materialov je najbolj razširjena dodajalna tehnologija. Pri metodi se lahko uporabljajo različni materiali, od keramike, betona, kovin, polimerov do živil. Pri ekstrudiranju živil in biokemijskih substanc se uporabljajo po navadi materiali v tekoči obliki, ki se potiskajo s batom proti izhodni odprtini. Za praškaste ali granulatanne oblike pa se uporablja polž, ki se vrti in potiska taljeno plastično maso proti izhodni odprtini [1].

Omenjena tehnologija je dostopna zaradi nizke cene osnovnih termoplastičnih materialov. Zaradi širokega izbora materialov je možna uporaba različnih pristopov ekstrudiranja, ki pa se določijo glede na obliko materiala (granulatni, praškasti, filamentni in tekoči materiali). Tiskalniki, ki uporabljajo tehnologijo ekstrudiranja, so zaradi lažje konstrukcije med preprostejšimi in tudi dostopnejšimi vrstami dodajalnih

metod. Od vseh štirih generičnih skupin je skupina ekstrudiranja materiala na trgu najbolj razširjena [1].

Večinoma ta tehnologija uporablja toploto za segrevanje materiala v ekstrudirni glavi. Zaradi segrevanja se materialu spremeni agregatno stanje iz trdnega v poltekoče stanje. S pomočjo transportnega sistema se potem material potiska skozi šobo tiskalne glave. Obstajajo tudi drugi sistemi, ki namesto temperature uporabljajo kemično spremembo materialov. Glavne stopnje izdelave za celotno generično skupino tehnologij ekstrudiranja materiala so [1]:

- dovod materiala do ekstrudirne glave,
- sprememba agregatnega stanja materiala (po navadi se uporablja taljenje),
- potiskanje materiala skozi šobo,
- računalniško vodenje ekstrudirne glave in nanos materiala po slojih,
- spajanje novih slojev na predčasno nanosene sloje,
- uporaba podpor za predmete z zahtevnejšo obliko.

Ker se uporablja pri tiskalniku princip ekstrudiranja, mora biti v ekstrudirno komoro neprekinjeno dovajan material. Navadno se uporablja material v trdni obliki, in sicer v obliki plastične niti, ki se imenuje filament. Lahko pa se uporabljajo tudi druge oblike, kot so na primer granule ali pa praškasta oblika. Pri praškasti in granuladni obliki se uporablja vijačni mehanizem, ki je ogrevan in sili poltekoči material iz zgornje lege v spodnjo lego skozi šobo. Pri sistemu filamentne oblike materiala pa se uporabljajo potisni valji, ki omogočajo dovajanje in tudi končno ekstrudiranje materiala skozi šobo [1].

V svetu 3D-tiska je več različnih sistemov dovajanja materialov v komoro ekstrudirne šobe. Najpogosteje se uporablja sistem dovajanja filameta s potisnimi valji. Raziskave so pokazale, da je sila potiska odvisna od modula elastičnosti materiala. Predvsem prihaja do težavnosti pri tisku kompozitnih materialov, ki vsebujejo delce keramike. Vzrok za to je sama krhkost materiala, saj je težje potiskati takšen material skozi šobo [2].

Za spremembo agregatnega stanja iz trdne v tekočo obliko se uporabljajo različni grelni sistemi. Lahko so v obliki navitja na zunanji strani komore ali pa v obliki grelnega vložka. Ta sistem mora omogočati poleg segrevanja tudi ohranjanje konstantne temperature v komori. Konstantna temperatura je odvisna od velikosti same grelne komore: večja je komora, težje je vzdrževati konstantno temperaturo. Zato so odgovorni številni dejavniki, kot so termični tok znotraj pol tekočega materiala, prenos toplote, lokacija temperaturnega senzorja in seveda kakovost samega grelnega sistema [1].

Pri ekstrudiranju sta pomembni tudi velikost in oblika ekstrudiranega filameta, ki ga določa šoba ekstrudirne glave. Če želimo zmanjšati čas tiska, uporabimo večji premer odprtine na šobi, vendar hkrati izgubljamo natančnost tiska. Metoda ekstrudiranja

materialov je primerna predvsem za tisk predmetov, ki imajo steno vsaj dvakrat debelejšo in večjo, kot pa je sam premer odprtine na šobi [5].

## 2.2 Ekstrudiranje termoplastov

Največ se uporablja predvsem ekstrudiranje polimernih materialov, to tehnologijo je razvilo podjetje Stratasys in jo poimenovalo FDM (Fused Deposition Modeling), kar pomeni modeliranje s spajanjem slojev. To kratico lahko praviloma uporablja samo podjetje Stratasys, saj je to njihovo zaščiteno ime [1].

Na trgu se pojavlja veliko proizvajalcev, ki izdelujejo tudi tiskalnice, ki uporabljajo enako vrsto tehnologije, vendar jo drugače poimenujejo. Največkrat se uporablja kratica FFF (Fused Filament Fabrication), kar pomeni izdelovanje s spajanjem filameta. Ta tehnologija je dostopna predvsem zaradi nizke cene dodajalnih strojev in samega polimernega materiala. Zaradi uporabe velikega nabora materialov se razlikujejo tudi načini ekstrudiranja. Najlažji pristop je seveda pri namiznih tiskalnikih, ki uporabljajo trdno polimerno žico, ki jo potiska skozi ogrevano območje, da se material delno stali in se potiska skozi določeno odprtino šobe na tiskarsko ploščad [5].

Najpogostejši materiali, ki se uporabljajo pri ekstrudiranju termoplastov, so PET-G (polietilen tereftalat glikol), ABS (akrilonitril butadien stiren), PA12 (nylon), PLA (polimlečna kislina), TPU (termoplastičen poliuretan) in pa PVA (polivinil alkohol), Ti se največkrat uporablja za izdelavo vodotopnih podpor pri izdelkih, ki zahtevajo dobre površine brez znakov podpor [5].

Industrijski in namizni tiskalniki imajo več razlik, ne samo velikost, temveč tudi sam presek filameta. Večina industrijskih tiskalnikov uporablja filament s presekom 2.85 mm, saj s tem zmanjšajo obrate motorja na samem ekstruderju, medtem ko namizni tiskalniki večinoma uporabljajo filament s presekom 1.75 mm. Motor ekstruderja z manjšim presekom filameta opravlja več obratov, s čimer prihaja do hitrejši izrabe motorja ter samih pogonskih mehanskih delov za potiskanje filameta. Poleg tega se razlikujejo tudi po možnosti uporabe različnih termoplastičnih materialov, ločljivosti tiska in tudi številu ekstrudirnih glav. Komercialni namizni tiskalniki imajo manjši nabor termoplastičnih materialov, kot jih imajo na voljo industrijski tiskalniki. Poleg že omenjenih konvencionalnih polimernih materialov (ABS, PLA, PA ...) se uporabljajo tudi kompozitni materiali, ki omogočajo izdelavo predmetov z imitacijo kamna, lesa in stekla. Obstajajo tudi toplotno in električno prevodni materiali, ki ponujajo veliko novih aplikacij. Poleg že omenjenih dodatkov se dodajajo v polimerne matrice namagneten prah za izdelavo plastomagnetov. Seveda pa se uporabljajo tudi kompozitni materiali, ki imitirajo videz kamna. Ti materiali se predvsem uporabljajo pri tiskanju večjih arhitekturnih maket, modelov in reliefnih površin. Omenjene materiale lahko uporabljamo predvsem na odprtokodnih tiskalnikih, kot so tiskalniki RepRap. Komercialni tiskalniki so omejeni pri uporabi materialov, ki jih proizvajalec navaja v samih navodilih uporabe [1].

Metoda za 3D-tiskanje kovin se imenuje modeliranje s spajanjem slojev kovin ali FDMm (Fused Deposition Modeling of metals). Pogoji za tiskanje s kovinami je, da zlitina omogoča čim nižjo temperaturo taljenja, manj kot 300 stopinj Celzija [9]. Navadno se osnovni keramični ali kovinski praškasti material meša z vezivom, da se oblikuje filamentno navitje. Kot vezivo se lahko uporablja več različnih materialov, kot sta polipropilen ali vosek. Mešanica je sestavljena iz 60 odstotkov keramičnega ali kovinskega prahu in 40 odstotkov veziva [2].

Tehnika, pri kateri se uporablja keramika, se komercialno imenuje spajanje slojev keramike FDC (Fused Deposition of Ceramics). Izdelki, ki so tiskani s to metodo, so po navadi krhki in jih je treba dodatno obdelati. Najprej se odstrani vezivo s topljenjem ali pa segrevanjem, nato pa se preostali model iz kovinskega ali keramičnega prahu obdeluje pri temperaturi nad 1000 stopinj Celzija. Seveda so temperature odvisne od materiala, ki ga uporabljamo [1].

### 2.2.1 Sestava tiskalnika za ekstrudiranje materiala

Tiskalniki so opisani splošno, vendar pa obstaja veliko različic, ki pa se razlikujejo od proizvajalca naprave. 3D-tiskalnik sestavljajo naslednje komponente: delovna ploščad, ki je premična po osi Z, vendar poznamo tudi tiskalnike, ki se jim delovna plošča premika po osi Y. Osnovna plošča je pozicionirana na delovni površini in nosi 3D-delovni predmet, po navadi so te plošče opremljene z ogrevalnim sistemom, ki poskrbi, da ima tiskan predmet več časa za enakomerno ohlajanje [3].

Tiskalniki so opremljeni tudi z ekstrudirnimi glavami, ki imajo izmenljive šobe. Ekstrudirna glava je nameščena na nosilno konstrukcijo, ki se giblje v smeri X–Y ali pa tudi v smeri X–Z. Poleg tega pa vsebuje tudi nosilec navitja termoplastičnega filamenta in pa termoplastičen filament. Če želimo tiskati predmet, je treba predčasno termoplastičen filament odviti s koluta in napeljati v ekstrudirno glavo, ki ima električno uravnano ogrevano komoro [1].

Temperatura je odvisna od same vrste termoplastičnega materiala. Ko preide tiskani material iz trdne v poltekočo obliko, se ta nanaša na osnovno ploščo. Ko se izdelka prvi sloj izdelka, se delovna površina spusti za debelino sloja v smeri Z in ponovno nanese poltekoči termoplast, sloj za slojem do izdelave končnega predmeta [1].

### 2.2.2 FDM in FFF metoda

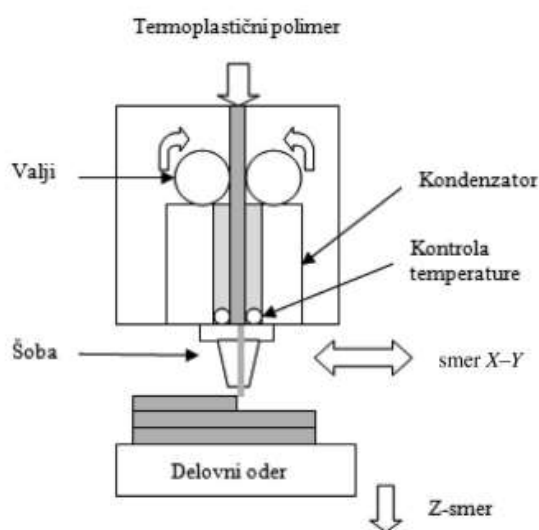
Prva razvita tehnologija v generični skupini ekstrudiranja materiala (material extrusion), je modeliranje s spajanjem slojev FDM (Fused Deposition Modeling). Kot osnovni material se uporablja termoplastični material in se tudi zato pogosto uporablja izraz ekstrudiranje termoplastov [2].

To tehnologijo je leta 1988 razvil Scott Crump, ki je želel izdelati igračo za hčer s pištolo z vročim lepilom in tako dobil idejo, da se lahko izdelek izdeluje tako, da se termoplast

nanaša po slojih do končnega izdelka. Iste leta je s svojo ženo ustanovil podjetje Stratasy in nato leta 1989 patentiral tehnologijo in s tem tudi kratico FDM. Podjetje je leta 1992 na trgu predstavilo svoj prvi komercialni industrijski tiskalnik, imenovan 3D-Modeler [1].

Princip delovanja je zasnovan na uporabi termoplastov kot materialov za izdelavo 3D-modelov. Pri tem ekstrudirna glava nanaša termoplast na tiskalno površino in se premika ter s tem opisuje površino sloja predmeta. Ko aparat izdelava celotno površino, se delovna površina spusti v smeri Z za debelino sloja ter ponovno opiše površino predmeta. Ker se površine izdelujejo počasi, imajo spodnje površine dovolj časa, da se ohladijo, vendar zgornji nanosi talijo zgornjo površino spodnjega sloja dovolj, da se lahko sloja spojita [1].

Predvsem se uporabljajo tiskalniki, ki so opremljeni z ogrevalno komoro, ki preprečuje nihanje temperature in s tem zagotavlja dimenzijsko stabilnost ter omogoča zmanjšanje notranjih napetosti v predmetu. Od vseh tehnologij, ki delujejo po principu ekstrudiranja polimernega materiala, omogoča FDM izdelavo predmetov z najvišjo žilavostjo in trdnostjo, vendar pa ima slabost nizke hitrosti tiskanja [1]. Slika 2 prikazuje delovanje tehnologije FDM.



Slika 2: Delovanje tehnologije FDM [2]

### 2.3 Uvajanje v tradicionalno proizvodnjo

Poleg uporabe tiskalnikov v samem razvoju izdelkov se lahko dodajalne tehnologije uporabljajo tudi v proizvodnjah, kjer uporabljajo orodja za proizvodnjo izdelkov. Predvsem se tu zmanjša čas izdelave pramodela, saj jih v nekaterih podjetjih še vedno izdelujejo ročno. Področje je predvsem zanimivo pri vlivanju kovin v natisnjene peščene kalupe (sand casting), kjer na koncu dobimo kovinske izdelke in polizdelke. Z uporabo dodajalnih metod se lahko zmanjša čas za 70 odstotkov. Alternativa peščenim kalupom so tiskani kalupi, v katere se najprej vbrizga vosek, nato naredi

keramični ovoj in na koncu vlije vanj kovina. Takšen pristop se imenuje brizganje materiala na osnovi voska WDM (Wax Deposition Modeling). Predvsem se vedno bolj razvijajo tudi orodja za brizganje IM (injection moulding), kjer se predčasno natisnejo orodne votline in se nato vlagajo v kovinske okvire. Čeprav orodja zdržijo do 100 brizgov, so dobra alternativna metoda za testiranje brizganja novih izdelkov. Predvsem je zanimiva za manjše serije, kjer zmanjša stroške izdelka [4].

## 2.4 Nastanek odpadnega materiala

Danes je proizvodnja usmerjena v množično izdelavo in pri tem uporablja tehnologije z odvzemanjem materiala, ki proizvedejo veliko odpadnega materiala. 3D-tisk je zato optimalna metoda, saj v primerjavi s tehnologijami z odvzemanjem materiala proizvede minimalno količino odpadka. Največ odpadka nastane pri podporah in raznih ojačitvah izdelka na gradbeno ploščad [3].

Pomemben podatek je, da lahko s to metodo izdelamo specifično lažje izdelke in obstaja vizija, da se lažje okvarjenih izdelke ne zavrže, ampak se jih popravi z izdelavo rezervnih delov.

Poleg tega sam postopek pripomore k izdelavi lažjih in geometrijsko optimiziranih izdelkov. Tehnika pri sami izdelavi porabi manj energije, kot jo na primer tradicionalne tehnike in ker gre za dodajalno tehniko, se pri tej metodi material nanaša samo toliko, kot ga potrebujemo [5].

## 2.5 Vzratni inženiring

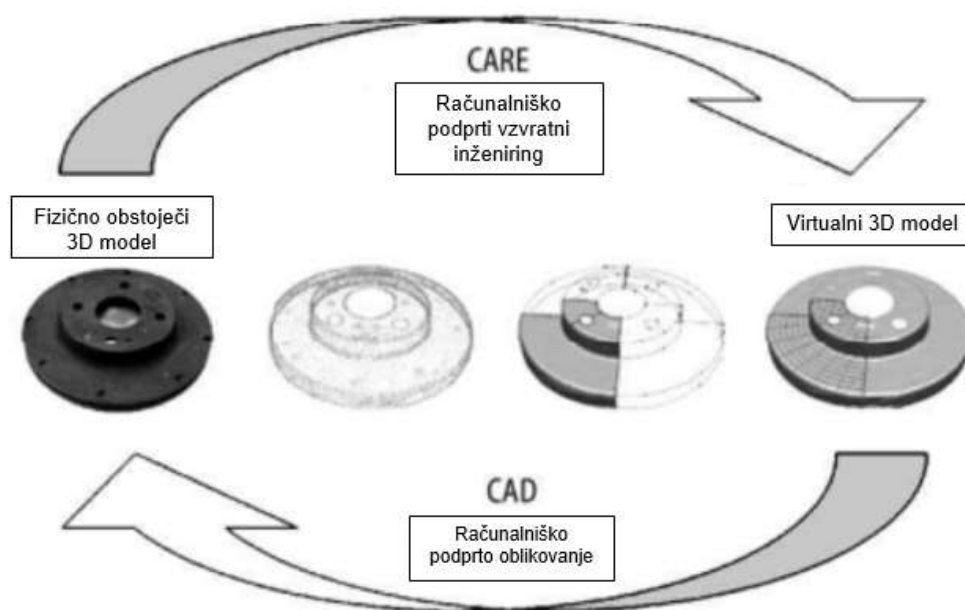
Inženirstvo je postopek izdelave, sestavljanja in izdelave izdelka ter sistemov. Oblikovno vzratno inženirstvo je opredeljen kot postopek pridobivanja geometrijskega CAD-modela iz 3D-točk, dobljenih z digitalizacijo obstoječih delov in izdelkov. Velja za eno od tehnologij, ki zagotavlja poslovne koristi pri skrajšanju cikla razvoja izdelka. Ta postopek omogoča zapiranje zanke med tem, kar je zasnovano in kar je dejansko izdelano [6].

Uporablja se v številnih aplikacijah, kot so proizvodnja, industrijsko oblikovanje ter reprodukcija. V nekaterih primerih, kot je na primer avtomobilsko oblikovanje, oblikovalci svoje ideje oblikujejo z uporabo gline, mavca, lesa ali penaste gume. Vendar je za izdelavo dela potreben CAD-model, ki ga pridobimo s pomočjo vzratnega inženiringa [6].

Ker izdelki postajajo vse bolj organske oblike, postaja oblikovanje v CAD-modelirniku zahtevnejše in tudi ni zagotovilo, da bo predstavitev CAD natančna ponovitev zelenega modela. Vzratni inženiring ponuja rešitev za ta problem, saj je fizični model vir informacij za CAD-model; takšen pristop se imenuje fizično-digitalni proces. Drugi razlogi za uporabo vzratnega inženiringa je stiskanje časov razvoja izdelka. Na izredno konkurenčnem svetovnem trgu proizvajalci nenehno iščejo nove načine

krajšanja rokov za trženje novega izdelka. Hitri razvoj izdelkov se nanaša na tehnologije in tehnike, ki pomagajo proizvajalcem in oblikovalcem pri izpolnjevanju zahtev za skrajšanje časa za razvoj izdelka [7].

Z uporabo vzratnega inženiringa je možno tridimenzionalne fizične izdelke ali makete iz gline hitro zajeti v digitalni obliki, preoblikovati in izvoziti za hitro izdelavo prototipov in orodij za hitro izdelavo z dodajalnimi ali tehnologijami z odvzemanjem materiala. Vzratni inženiring (VI) je opredeljen kot postopek pridobivanja geometrijskega CAD-modela iz oblaka 3D-točk, dobljenih z digitalizacijo obstoječih delov ali celotnih sistemov. V literaturi se velikokrat srečamo s kratico RE, ki je angleška skrajšava za vzratno inženirstvo [6]. Slika 3 prikazuje popolni računalniški pristop do inženiringa in vzratnega inženiringa.



Slika 3: Računalniško podrti vzratni inženiring (CARE) [7]

Vzratno inženirstvo je proces ali metoda, s katero je možno ugotoviti, kako je bilo nekaj narejeno in kateri koraki so bili potrebni za izdelavo naprav, izdelkov, procesov, sistemov in tudi programske opreme. Poleg oblikovnega vzratnega inženiringa, kjer pridobivamo obliko fizičnega izdelka v CAD-obliko, poznamo tudi druga področja, ki uporabljajo vzratni inženiring [7].

Sistem računalniško podprtega inženiringa CAE (Computer Aided Engineering) je s pomočjo računalniško podprtega oblikovanja CAD (Computer Aided Design) in računalniško podprte proizvodnje CAM- (Computer Aided Manufacturing) tehnologije omogočil avtonomno inženirstvo in izdelovanje, kjer oblikovna ideja preide skozi računalniško oblikovanje in izdelovanje v fizični izdelek ali sistem. Sistem CARE poteka v ravno nasprotni smeri. CARE izdelava računalniški model s pomočjo meritev obstoječega modela. Zato definiramo CARE kot vzratni CAD. CARE (Computer



Added Reverse Engineering) je računalniško podprt vzratni inženiring, ki z meritvami ustvari računalniški model predmeta, kot obstaja v resničnem svetu [7].

Sistem CARE uporablja oblak točk (zbirka točk) in zazna lastnosti, ki ustrezajo površinam za modeliranje celotne geometrije predmeta. Sistem na primer omogoča hiter pregled in preverjanje na proizvodnji liniji, ki temelji na originalnih CAD-modelih, hitro oceni odstopanje glede na originalni CAD-model ter ustvarja digitalne modele, ki so idealni za elektronsko širjenje informacij [8].

Poleg vseh naštetih aplikacij je velik interes tudi v modifikaciji izdelkov. Predvsem je tu mišljena izboljšava komponent, ki zaradi različnih vzrokov ne prestanejo določenega življenjskega cikla. S pomočjo sistema lahko tako izdelamo računalniški model poškodovanega izdelka in ga analiziramo ter tako ugotovimo, zakaj prihaja do predčasne mehanske poškodbe ali utrujanja [8].

### 2.5.1 Uporaba vzratnega inženiringa

Aplikacije vzratnega inženiringa se uporabljajo na področju strojnega, elektronskega, računalniškega, programskega in kemijskega inženiringa ter v sistemski biologiji in pri oblikovanju. Vzratni inženiring izhaja iz analize strojne opreme za komercialno ali vojaško prednost. Vendar se ta vzratno inženirski proces ni uporabljal za izdelavo kopije ali spremembo obstoječega modela. Postopek se je uporabljal za analizo obstoječih oblikovnih značilnosti. V nekaterih primerih je lahko cilj postopka vzratnega inženiringa preprosto preoblikovanje starih sistemov. Vendar pa se predvsem uporablja v sedanjem času za izvedbo analize na konkurenčnih izdelkih.

Vzratni inženiring se uporablja na različnih področjih, kot so:

- Preurejanje: uporabljene predmete se ponovno uporabi za drugačen uporaben način (recikliranje).
- Varčevanje denarja: če kupec ve, kako lahko popravi napravo z nakupom in zamenjavo komponente in ne celotnega aparata, s tem prihrani denar.
- Analiza varnosti izdelka: preučevanje delovanja izdelka, tako da določimo specifikacije njegovih sestavnih delov in oceno stroškov, ter ugotovitev morebitnih kršitev patentov. Analiza varnosti izdelka je tudi pridobivanje občutljivih podatkov z razstavljanjem in analizo zasnove systemske komponente.
- Konkurenčna tehnična inteligenca: to pomeni, da razumemo, kaj v resnici počne konkurent, ne pa, kaj pravi konkurent, da počne.
- Zastarelost: integrirana vezja so pogosto zasnovana na lastniških sistemih, ki zastarajo v le nekaj letih. Ko sistemov, ki uporabljajo te dele, ni več mogoče vzdrževati, ker deli niso več izdelani, je edini način vključitev funkcionalnosti v novo tehnologijo, to pa je vzratni inženiring obstoječega čipa, in ga nato preoblikovati z uporabo novejših orodij.
- Povezovanje: vzratni inženiring se lahko uporabi, ko mora biti eden od sistemov povezljiv z drugim sistemom in je treba določiti, kako bi se oba pogajala.

- Vojaško ali komercialno vohunjenje: Pod to področje prištevamo spoznavanje sovražnikovih ali konkurentovih najnovejših raziskav z zajemanjem prototipa in njegovih razstavljanjem, ki lahko povzroči razvoj podobnega izdelka ali boljši protiukrep proti konkurentu [8].

Vzratni inženiring se pogosto uporablja v številnih aplikacijah, kot so proizvodnja, industrijsko oblikovanje ter oblikovanje in reprodukcija nakita. Na primer, ko je nov avtomobil predstavljen na trgu, ga lahko konkurenčni proizvajalci kupijo in ga razstavijo, da bi izvedeli, kako je bil zgrajen in kako deluje. V programskem inženirstvu je dobra izvorna koda pogosto različica druge dobre izvorne kode. Vzratni inženiring ponuja ogromno različnih aplikacij.

Primeri, v katerih se lahko uporabi vzratni inženiring:

- Prvotni proizvajalec izdelka ne proizvaja več, npr. prvotni izdelek je zastarel.
- Izvirna dokumentacija o zasnovi izdelka je bila izgubljena ali ni nikoli obstajala.
- Pregled in /ali nadzor kakovosti – primerjava izdelanega dela z njegovim CAD- opisom ali standardnem izdelkom.
- Nekatere slabe lastnosti izdelka je treba odpraviti, npr. pretirana obraba lahko kaže, kje je treba izdelek izboljšati.
- Raziskovanje novih poti za izboljšanje zmogljivosti in lastnosti izdelka.
- Ustvarjanje podatkov za izdelavo zobne ali kirurške protetike, tkivno izdelani deli telesa ali za kirurško načrtovanje.
- Ustvarjanje 3D-podatkov posameznika, modela ali skulpture za ustvarjanje, merjenje ali reproduciranje umetniškega dela.
- Arhitekturno in gradbeno dokumentiranje in izdelava meritev.
- Dokumentacija in reprodukcija prizorišča zločina.
- Ustvarjanje 3D-podatkov iz modela ali skulptur za izdelavo animacij v igrah in pa filmih.
- Izdelava oblačil in obutve, ki so namenjene samo za določenega posameznika [9].

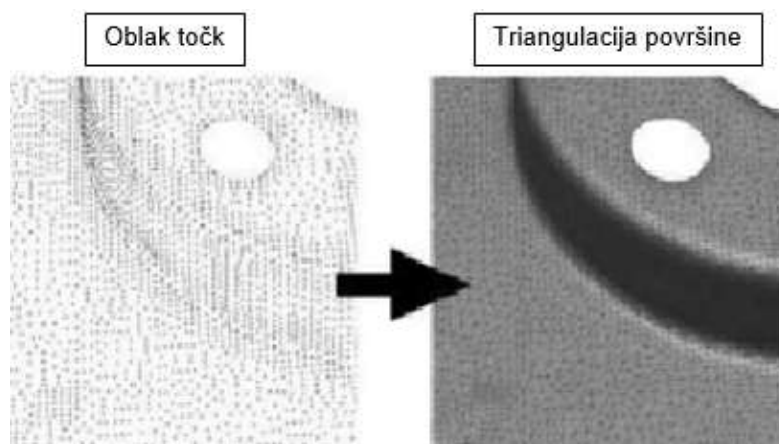
### 2.5.2 Generični proces izdelave modela

Generični proces izdelava modela je hitro se razvijajoča disciplina, ki zajema več aktivnosti. Obstoj računalniškega modela nudi veliko prednost v izboljšavi kakovosti in učinkovitosti oblike, izdelave in pa analize. Sedaj je mogoče ustvariti ne samo kopijo, s čimer pridobimo znanje o obliki in tako izdelamo nove oblike, temveč ustvarimo tudi različice, analiziramo oblikovne lastnosti in določimo količine, kot sta na primer prostornina in pa površina [10].

#### Točkovna obdelava

Faza točkovne obdelave vključuje uvažanje oblaka točk, zmanjševanje šuma v zbirki informacij in zmanjšanje števila točk. Te naloge se izvajajo z uporabo vnaprej določenih filtrov. Izjemno pomembno je, da uporabniki zelo dobro razumejo algoritme filtrov, da vedo, kateri filter je najprimernejši za posamezno nalogo [10].

Za točkovno obdelavo je na voljo široka paleta komercialne programske opreme. Rezultat točkovne obdelave je čist, združen, nabor podatkov v oblaku točk v najbolj priročni obliki. Zaradi razvoja zajemalnih metod in programov prihaja do samostojne točkovne obdelave. To pomeni, da programi med fazo zajemanja že samostojno obdelujejo točke, ki so relevantne za določen model. Slika 4 prikazuje postopek točkovne obdelave [11].



Slika 4: Obdelava točk iz oblaka točk v triangulirane površine [7]

Izdelava CAD-modela iz točkovnih informacij je najzahtevnejši korak v samem vzratnem inženirskem postopku, saj je potrebna uporaba algoritmov, ki pravilno združujejo površine v model in so opisani v tridimenzionalnem oblaku točk [7].

Zadnji del vzratnega inženiringa je dejanska izdelava in dodelava CAD-modela in se običajno doseže z uporabo zelo heterogenih metod, odvisno od celotnega okvira rekonstrukcije, pa tudi od vrste zelenega rezultata, ki ga je mogoče doseči z uporabo vzratno inženirske strategije (parametrična ali neparametrična). Tipične operacije, ki se lahko zahtevajo, so šivanje sosednjih površin in nalaganje geometrijskih omejitev. Korak generiranja CAD-modela se včasih neposredno izvede med postopkom modeliranja in prilagajanja analitičnih površin in ga obravnavamo kot edinstven korak. Končni rezultat te faze je geometrijski model v enem od lastniških formatov, kot so IGES, VDA, STL, DXF, OBJ, VRML, ISO G koda itd [11].

## 2.6 3D-digitalizacija

Pri fazi digitalizacije je potrebna izbira pravilne tehnike skeniranja, priprava modela za skeniranje in izvedba dejanskega skeniranja za zajem informacij, ki opisujejo vse geometrijske značilnosti modela, kot so stopnice, reže, žepki in luknje [10].

Tridimenzionalni skenerji se uporabijo za zajemanje geometrije modela. Ti ustvarijo oblake točk, ki določijo geometrijo modela in s tem izdelka iz oprijemljivega telesa kopirajo v digitalni obliki. Naprave za zajemanje so na voljo kot namenska orodja ali kot dodatki k obstoječim računalniško numerično krmiljenim (CNC) obdelovalnim strojem. Obstajata dve različni vrsti skenerjev: kontaktni in brezkontaktni. Brezkontaktni

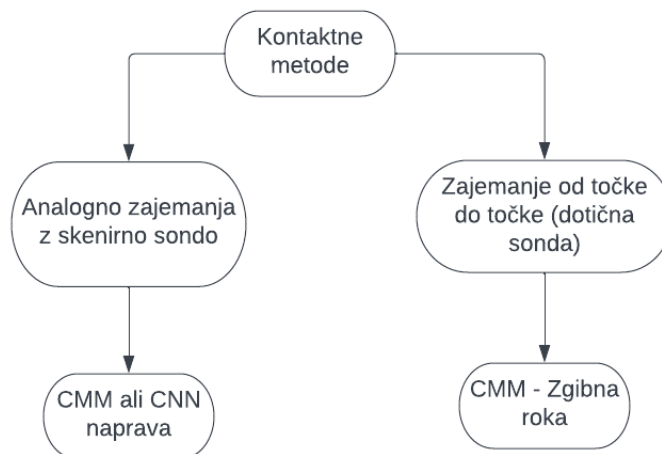
metode uporabljajo svetlobo, zvok, magnetno polje, X-žarki, itd. za pridobivanje podatkov, medtem ko pa se na primer pri kontaktnih ali taktilnih metodah naprava dotika površine in uporablja mehanske sonde na koncu mehanske roke. V vsakem primeru je treba izvesti ustrezno analizo, da se določijo položaji točk na površini predmetov iz pridobljenega fizičnega odčitka. Hitrost, s katero pojav deluje, in hitrost senzorske naprave določata hitrost pridobivanja podatkov. Obstaja veliko praktičnih problemov s pridobivanjem uporabnih podatkov, kot so [7] :

- natančnost,
- kalibracija,
- dostopnost,
- okluzija,
- šum in nepopolni podatki,
- statistična distribucija delov,
- več pogledov,
- površinska obdelava.

### 2.6.1 Kontaktne metode

Kontaktne metode predstavljajo še enega od priljubljenih pristopov k zajemanju oblike. Kontaktne metode se dotikajo površine z uporabo mehanske roke. Senzorske naprave v sklepih roke določajo relativne koordinatne lokacije. Te metode so večinoma omejene z omejitvami merilne naprave. Na primer triosni rezkalni stroj je lahko opremljen s sondo na dotik in se uporablja kot taktilni merilni sistem. Vendar ni zelo učinkovit za konkavne površine. Obstaja veliko različnih robotskih naprav, ki se uporabljajo za kontaktno merjenje. Te metode so med najbolj robustnimi (manj šuma, natančnejše, bolj ponovljive itd.), vendar so tudi najpočasnejše metode za pridobivanje podatkov. Verjetno najbolj priljubljena metoda je uporaba koordinatnih merilnih strojev (CMM). Te stroje je mogoče programirati tako, da sledijo poti vzdolž površine in zbirajo zelo natančne podatke, ki so skoraj brez šuma [10].

Obstajata dva tipa zajemalnih tehnologij, ki se v sedanjem času uporabljata za zajemanje informacij. Ti dve metodi sta zaznavanje od točke do točke, poznamo pa tudi analogno zaznavanje. Pri metodi zaznavanja od točke do točke je na CMM-napravo nameščeno tipalo, ki deluje po principu dotičnega zaznavanja. S tem program zaznava točke in jih vnaša v sistem ter sočasno izrisuje obliko, ki se zajema. Slika 5 prikazuje delitev kontaktnih zajemalnih metod [10].



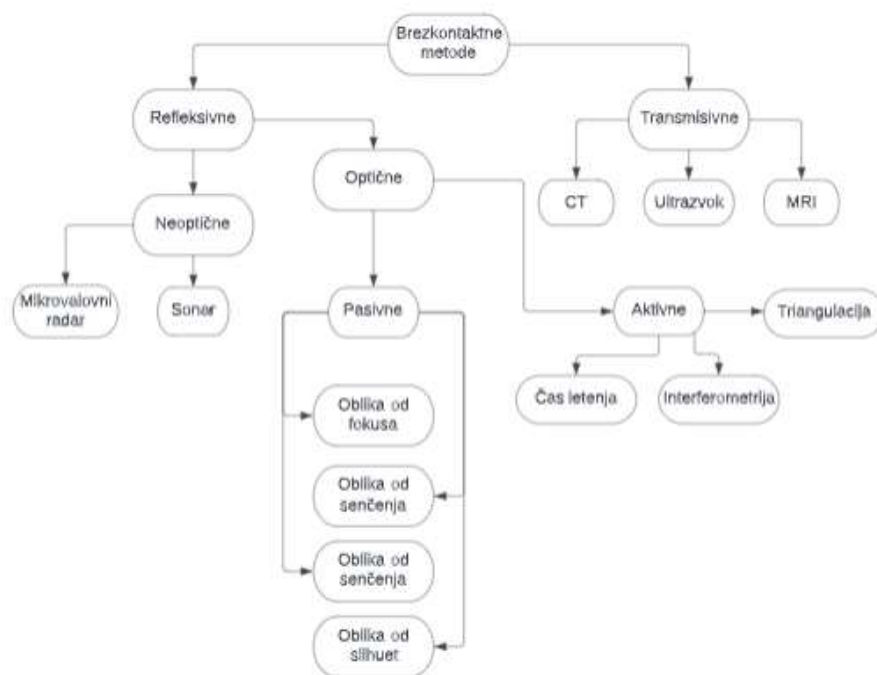
Slika 5: Delitev kontaktnih metod [3]

Pri analognem zaznavanju se uporablja zajemalna sonda, ki je lahko nameščena na CNC- ali CMM-stroj. Pri zajemanju se konica sonde dotakne in se nato neprekinjeno premika po površini predmeta in pri tem zbira podatke. Ves čas meritve je treba ohranjati odklon sonde znotraj merilnega območja. Analogni sistem zaznavanja je do trikrat hitrejši, kot je sistem zaznavanja od točke do točke. Metode kontaktnega zajemanja imajo prednosti in slabosti. Prednosti kontaktnih metod so nizka cena, visoka natančnost, metoda ni občutljiva na barvo ali prosojnost ter tudi sposobnost merjenja globokih rež in žepov. Slabosti kontaktnih metod pa so nepravilno zajemanje informacij na mehkih predmetih in počasno zajemanje informacij predmeta [10].

### 2.6.2 Brezkontaktne metode

Poleg kontaktnih poznamo tudi brezkontaktne metode, ki uporabljajo različne pojave za zajemanje geometrijskih informacij predmeta. Metode zajemajo 2D-slike prečnega prereza in oblake točk, ki predstavljajo geometrijo predmeta, in to tako, da zajamejo geometrijo s projiciranjem vira energije (svetloba, zvočna, energija magnetnega polja, X – žarki, itd.) na predmet, senzor nato zajame odbito energijo od predmeta. Geometrijske informacije za predmet se končno izračunajo z uporabo časa letenja, triangulacije, informacij o interferenci valov ali algoritmov za obdelavo slik. Kot že samo ime pove, pri tej metodi ni stika med strojno opremo in predmetom, ki mu zajemamo geometrijske lastnosti. Metode brezkontaktnega zajemanja se razvrščajo glede na senzorske tehnologije in tehnike zajemanja podatkov [10].

Kot kontaktne imajo tudi brezkontaktne metode prednosti in slabosti. Prednosti brezkontaktnih metod so predvsem v tem, da hitro zajemajo veliko količino podatkov. Poleg tega pa se lahko s to metodo zajemajo objekti z velikimi površinami in volumni. Poleg tega ni potrebnega fizičnega dotikanja, ima dobro natančnost in pa resolucijo za uporabo pri običajnih aplikacijah. Slika 6 prikazuje klasifikacijo brezkontaktnih zajemalnih metod [10].



Slika 6: Klasifikacija brezkontaktnih metod [10]

Brezkontaktna metode se razvrščajo v več podskupin, ki so določene glede na kriterije. Eden teh kriterijev je način zajemanja in predstavljanja podatkov kot posameznih, linearnih točk ali pa kot mreže točk. Delitve so predvsem koristne za uporabnike, saj sami uporabniki vedo, katero metodo bodo izbrali za zajemanje podatkov, ki jih zanimajo. Vendar pa premalo pove o fizičnem načelu teh metod. Zato so brezkontaktna metode združene tudi glede na izhodno energijo, ki jo merijo [12].

Brezkontaktna metode se delijo glede na vrsto elektromagnetnega sevanja in vrsto mehanskih valov na dve podskupini. Ti podskupini sta refleksivna in transmisivna. Pri refleksivni metodi se meri odboj svetlobe od površine predmeta, pri transmisivnih metodah pa se meri delež energije, ki prodre v merjeno telo, in koliko energije zajame detektor. Ta metoda zajema CT, MRI in ultrazvok. Prednosti transmisivnih metod je, da omogočajo tudi merjenje notranjih oblik v predmetu, kot so na primer notranji organi, votline v zlitinah, nepravilnosti v izdelkih. Slabost te metode pa je cenovna dostopnost, teža same naprave, volumen zajemanja in pa varnost med uporabo. Refleksivne metode delimo na optične in neoptične. Neoptične temeljijo na detekciji mikro- in ultrazvočnih valov [13].

### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

V tej diplomski nalogi želimo ugotoviti, ali lahko tehnologije z odvzemanjem materiala nadomestimo z dodajalnimi tehnologijami, kot je npr. modeliranje s spajanjem slojev (FDM). Za primerjavo smo vzeli obstoječi komponenti iz priprave za zatiskanje ohišja B12. Najprej smo pripravili modela v programu GrabCAD, v katerem določimo parametre tiskanja, kot so temperatura šobe, tiskalne mize, atmosfere komore, vzorec zapolnitve, odstotek zapolnitve in pa pozicijo tiskanega modela. Poleg tega smo nastavili osnovni material, ki je v našem primeru ABS Black in pa material za podpore QSR Support. Za izdelavo modelov smo uporabili FDM-tiskalnik F370 podjetja Stratasys. Ko je tiskalnik naredil obe komponenti, smo jim odstranili podporni (raft) splav in pa podpore, ki jih je tiskalnik izdelal. Te smo odstranili v napravi, ki uporablja vodno kopel (Naprava za raztapljanje podpor SCA 1200HT), da raztopi podpore, ki so izdelane iz materiala QSR Support. Modele smo nato odstranili iz kopeli in obrisali odvečno vodo ter pustili, da se modeli popolnoma osušijo. Vzorca smo nato zajeli s pomočjo računalniške tomografije z napravo Metrotom 1500 podjetja Zeiss, in sicer po končanem zajemanju geometrijskih lastnosti obeh komponent. Nato smo za obe originalni komponenti, ki sta bili izdelani s tehnologijami z odvzemanjem materiala, zajeli geometrijske lastnosti. Po končanem izdelovanju in zajemanju komponent smo opravili še dimenzijsko, časovno, stroškovno primerjavo ter primerjavo nastanka odpadnega materiala.

#### 3.1 Izdelava plastičnih komponent priprave za zatiskanje ohišja B12

V podjetju smo pridobili obstoječe CAD-modele, saj je priprava že bila narejena in je tudi v uporabi na liniji za sestavljanje aparata Bosch B12 mini blender. S pomočjo FDM-tiskalnika Stratasys F370 smo izdelali plastične komponente priprave za zatiskanje ohišja naprave B12. Iz CAD-modela celotne priprave smo najprej izvozili STEP-obliki komponent ter ju s pomočjo modelirnika Siemens NX 12 preoblikovali v STL-obliki. Modela smo morali pretvoriti v STL-obliko, saj program GrabCAD operira s to obliko. Ko smo modela pripravili v rezalniku GrabCAD, smo nato prenesli vsako komponento posebej v tiskalnik in pričeli s tiskanjem komponent. Priloga 1 prikazuje proces tiskanja komponent. Po končanem tiskanju smo iz snemljive tiskalne mize odstranili komponente in jih nato prenesli v napravo za raztapljanje podpor. Komponento smo pustili v vodni kopeli, dokler se podpore niso popolnoma raztopile. Priloga 2 prikazuje proces raztapljanja podpornega materiala. Priloga 3 prikazuje dimenzije komponente ležišče ohišja B12. Priloga 4 prikazuje dimenzije komponente obroč zatisni B12.

#### Izdelava plastične komponente ležišče ohišja B12

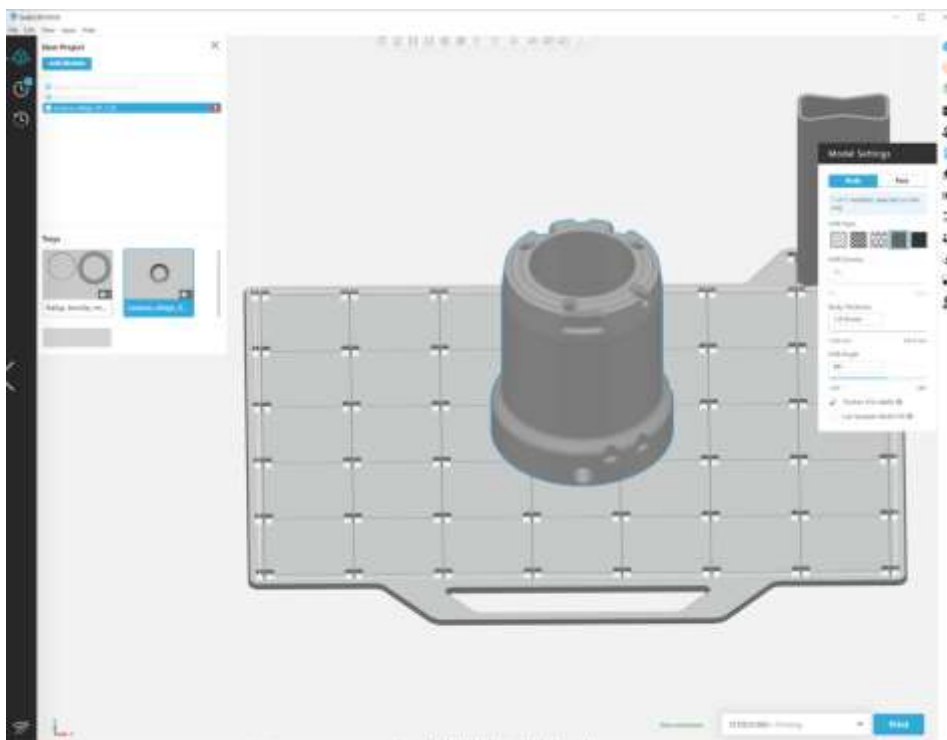
Za pripravo CAD-modela ležišče ohišja B12 smo uporabili program podjetja Stratasys, ki se imenuje GrabCAD. V program smo vstavili STL-obliko komponente ležišče ohišja B12. Ker je program skoraj popolnoma avtomatiziran, potrebuje samo nekaj manjših nastavitvev. Najprej smo izbrali položaj tiskanja modela, material, obliko polnila,

debelino zunanje skorje modela in pa podporni material. Tabela 1 prikazuje profil tiskanja komponente ležišče ohišja B12.

*Tabela 1: Profil tiskanja komponente ležišče ohišja B12*

| Ime modela         | Čas tiskanja    | Temp. šobe (°C) | Temp. mize (°C) | Temp. ozračja komore (°C) | Odstotek polnila (%) | Debelina skorje modela (mm) | Volumen porabljenega materiala ABS (cm <sup>3</sup> ) | Volumen porabljenega podpornega materiala QSR (cm <sup>3</sup> ) | Končna masa modela (g) |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|---|--|------------------------|
| Ležišče ohišja B12 | 10 ur<br>50 min | 270             | 90              | 90                        | 80                   | 1.016                       | 493.657   | 13.967   | 481                    |

Ko smo vnesli vse potrebne podatke, smo v tiskalnik poslali model za pričetek tiskanja. Slika 7 prikazuje nastavitve v programu GrabCAD za komponento ležišče ohišja B12.



*Slika 7: Nastavitve v programu GrabCAD za komponento ležišče ohišja B12*

Tiskanje komponente ležišče ohišja B12 smo izvajali na FDM-tiskalniku Stratasys F370. Uporabili smo osnovni material ABS Black in QSR Support. Tiskalnik ima tiskalno mizo, ki jo najprej segreje na 90 °C in ogreje samo ozračje v tiskalni komori, s čimer zmanjša verjetnost krčenja materiala. Ker smo za tiskanje modelov uporabili material ABS Black, je tiskalnik uporabil 270 °C temperaturni profil na ekstrudirni šobi. Ko je tiskalnih končal komponento, smo to odstranili s tiskalne mize in jo vstavili v napravo za raztapljanje podpor SCA 1200HT, ki je v roku dveh ur odstranila vse podporne strukture. Komponento smo nato odstranili iz naprave ter jo osušili.



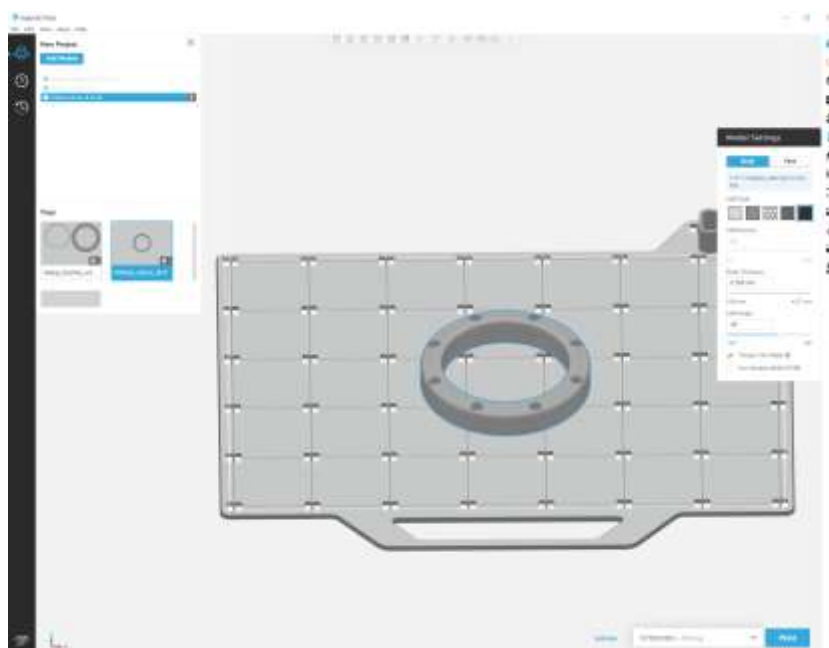
## Izdelava plastične komponente obroč zatisni B12

Za pripravo CAD-modela obroč zatisni B12 smo uporabili program podjetja Stratasys, ki se imenuje GrabCAD. V program smo vstavili STL-obliko komponente obroč zatisni B12. Ker je program skoraj popolnoma avtomatiziran, potrebuje samo nekaj manjših nastavitvev. Najprej smo izbrali položaj tiskanja modela, material, obliko polnila, debelino zunanje skorje modela in podporni material. Tabela 2 prikazuje profil tiskanja komponente obroč zatisni B12.

Tabela 2: Profil tiskanja komponente obroč zatisni B12

| Ime modela        | Čas tiskanja | Temp. šobe (°C) | Temp. mize (°C) | Temp. ozračja komore (°C) | Odstotek polnila (%) | Debelina skorje modela (mm) | Volumen porabljenega materiala ABS (cm <sup>3</sup> ) | Volumen porabljenega suportnega materiala QSR (cm <sup>3</sup> ) | Končna masa modela (g) |
|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|---|--|------------------------|
| Obroč zatisni B12 | 2 ure 30 min | 270             | 90              | 90                        | 80                   | 1.016                       | 67.371  | 11.689   | 63                     |

Ko smo vnesli vse potrebne podatke, smo v tiskalnik poslali model za pričetek tiskanja. Slika 8 prikazuje nastavitve v programu GrabCAD za komponento obroč zatisni B12.



Slika 8: Nastavitve v programu GrabCAD za komponento obroč zatisni B12

Tiskanje komponente obroč zatisni B12 smo izvajali na FDM-tiskalniku Stratasys F370. Uporabili smo osnovni material ABS Black in QSR Support. Tiskalnik ima tiskalno mizo, ki jo najprej segreje na 90 °C in ogreje samo ozračje v tiskalni komori, s čimer zmanjša verjetnost krčenja materiala. Ker smo za tiskanje modelov uporabili material ABS Black, je tiskalnik uporabil 270 °C temperaturni profil na ekstrudirni šobi. Ko je tiskalnik dokončal komponento, smo to odstranili s tiskalne mize in jo vstavili v napravo za

raztapljanje podpor SCA 1200HT, ki je v roku dveh ur odstranila vse podporne strukture. Komponento smo nato odstranili iz naprave in jo osušili.

### 3.2 3D-digitalizacija komponent

Za 3D-digitalizacijo komponent smo se odločili za transmisivno tehnologijo računalniške tomografije. Predvsem zato, ker je metoda hitra in poleg tega je tudi zelo natančna v primerjavi z ostalimi optičnimi metodami. Uporabili smo industrijski CT Metrotom 1500. Zajemanje smo opravili tako, da smo na enkrat zajemali samo eno komponento. Tabela 3 prikazuje specifikacije naprave.

*Tabela 3: Specifikacije CT Zeiss Metrotom 1500*

| Ime naprave         | Maks. napetost cevi (kV) | Maks. tok cevi ( $\mu$ A) | Maks. ciljna uspešnost (W) | Min. velikost žariščne točke (mm) | Število slikovnih pik | Velikost slikovnih pik ( $\mu$ m) | Programska oprema                   |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Zeiss Metrotom 1500 | 225                      | 3000                      | 500                        | 0,007                             | 3072x3072             | 139x139                           | Zeiss Metrotom OS/GOM Inspect Suite |

### 3D-digitalizacija komponente ležišče ohišja B12 izdelana z dodajalno tehnologijo

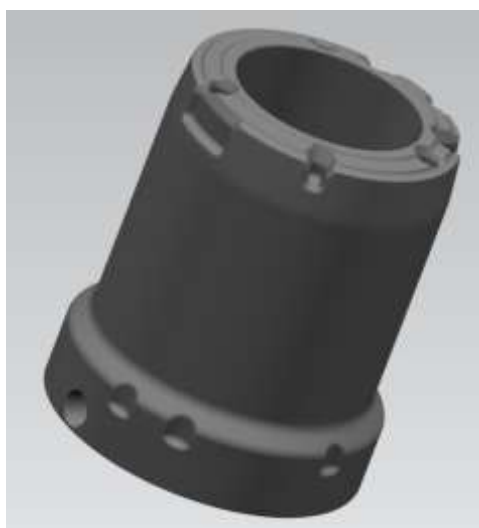
Zajemanje smo opravili tako, da smo najprej očistili komponento ležišče ohišja B12 in tako odstranili delce, ki bi kontaminirali model in privedli do večjega odstopanja. Komponento smo nato postavili v komoro naprave. Nato smo komoro zaprli in pritisnili na gumb za pričetek zajemanja. V programu GOM smo nato pregledali, če je model popolnoma zajet in brez okluzij iz okolja. Ko smo model pregledali, smo ga nato v programu shranili v STL-obliko ter izvozili. Slika 9 prikazuje 3D-digitalizacijo komponente ležišče ohišja B12 izdelana z dodajalno metodo.



*Slika 9: 3D-digitalizacija komponenta ležišča ohišja B12 izdelana z dodajalno metodo*

**3D-digitalizacija komponente ležišče ohišja B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala**

Zajemanje smo opravili tako, da smo najprej očistili komponento ležišče ohišja B12 in tako odstranili delce, ki bi kontaminirali model in privedli do večjega odstopanja. Komponento smo nato postavili v komoro naprave. Nato smo komoro zaprli in pritisnili na gumb za pričetek zajemanja. V programu GOM smo nato pregledali, če je model popolnoma zajet in brez okluzij iz okolja. Ko smo model pregledali, smo ga nato v programu shranili v STL-obliko ter izvozili. Slika 10 prikazuje 3D-digitalizacijo komponente ležišče ohišja B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala.



*Slika 10: 3D-digitalizacija komponente ležišče ohišja B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala*

### **3D-digitalizacija komponente obroč zatisni B12, izdelana z dodajalno tehnologijo**

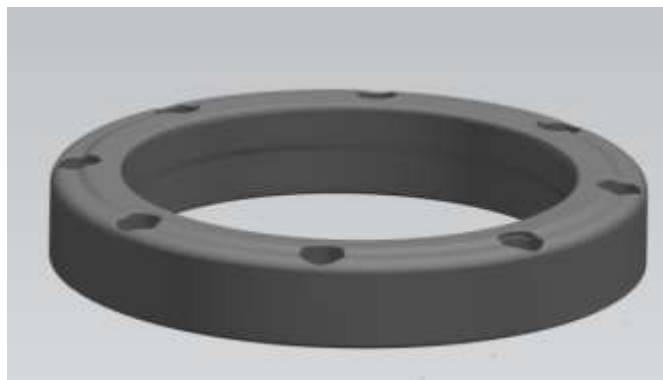
Zajemanje smo opravili tako, da smo najprej očistili komponento obroč zatisni B12 in tako odstranili delce, ki bi kontaminirali model in privedli do večjega odstopanja. Komponento smo nato postavili v komoro naprave. Nato smo komoro zaprli in pritisnili gumb za pričetek zajemanja. V programu GOM smo nato pregledali, če je model popolnoma zajet in brez okluzij iz okolja. Ko smo model pregledali, smo ga nato v programu shranili v STL-obliko ter izvozili. Slika 11 prikazuje 3D-digitalizacijo komponente obroč zatisni B12, izdelan z dodajalno metodo.



*Slika 11: 3D-digitalizacija komponente obroč zatisni B12, izdelana z dodajalno tehnologijo*

### **3D-digitalizacija komponente obroč B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala**

Zajemanje smo opravili tako, da smo najprej očistili komponento obroč zatisni B12 in tako odstranili delce, ki bi kontaminirali model in privedli do večjega odstopanja. Komponento smo nato postavili v komoro naprave. Nato smo komoro zaprli in pritisnili na gumb za pričetek zajemanja. V programu GOM smo nato pregledali, če je model popolnoma zajet in brez okluzij iz okolja. Ko smo model pregledali, smo ga nato v programu shranili v STL-obliko ter izvozili. Slika 12 prikazuje 3D-digitalizacijo komponente obroč zatisni B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala.



*Slika 12: 3D-digitalizacija komponente obroč zatisni B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala*

### 3.3 Časovna primerjava

Pri časovni primerjavi smo primerjali čas izdelave komponent, izdelanih z dodajalnimi metodami in tehnologijami z odvzemanjem materiala. Za izračun časovne primerjave komponent smo uporabili skupni čas, ki je sestavljen iz časa izdelave in obdelave ter transportnega in montažnega časa.

#### Časovni podatki izdelave komponente ležišče ohišja B12, izdelana z dodajalno tehnologijo

Pri dodajalni metodi smo čas izdelave pridobili iz samega programa GrabCAD. V čas obdelave smo všteli čas, ki je bil potreben za odstranitev podpornih struktur in samega sušenja. Ker smo komponento vstavili v samo pripravo na liniji, smo tako dobili tudi sam čas, ki je potreben za montažo komponente. Tabela 4 prikazuje časovne podatke izdelave dodajalne tehnologije za komponento ležišče ohišja B12.

*Tabela 4: Časovni podatki izdelave dodajalne metode za komponento ležišče ohišja B12*

| Komponenta         | Čas izdelave (ura/min) | Čas obdelave (ura/min) | Transportni čas (ura/min) | Montažni čas (ura/min) | Skupni čas (ura/min) |
|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| Ležišče ohišja B12 | 10:50                  | 3:00                   | 0:00                      | 0:30                   | 14:20                |

#### Časovni podatki izdelave komponente ležišča ohišja B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala

Ker je bila komponenta izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala, smo podatke o času izdelave in obdelave ter transportni čas pridobili od samega dobavitelja, ki je komponento izdelal. Ker smo komponento vstavili v samo pripravo na liniji, smo tako dobili tudi sam čas, ki je potreben za montažo komponente. Tabela 5 prikazuje časovne podatke izdelave tehnologij z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12.

*Tabela 5: Časovni podatki izdelave tehnologij z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12*

| Komponenta         | Čas izdelave (ura/min) | Čas obdelave (ura/min) | Transportni čas (ura/min) | Montažni čas (ura/min) | Skupni čas (ura/min) |
|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| Ležišče ohišja B12 | 6:30                   | 1:30                   | 0:30                      | 0:30                   | 9:00                 |

### Časovni podatki izdelave komponente obroč zatisni B12, izdelana z dodajalno tehnologijo

Pri dodajalni metodi smo čas izdelave pridobili iz samega programa GrabCAD. V čas obdelave smo všteli čas, ki je bil potreben za odstranitev podpornih struktur in pa samega sušenja. Ker smo komponento vstavili v samo pripravo na liniji, smo tako dobili tudi sam čas, ki je potreben za montažo komponente. Tabela 6 prikazuje časovne podatke izdelave dodajalne tehnologije za komponento obroč zatisni B12.

Tabela 6: Časovni podatki izdelave dodajalne metode za komponento obroč zatisni B12

| Komponenta        | Čas izdelave (ura/min) | Čas obdelave (ura/min) | Transportni čas (ura/min) | Montažni čas (ura/min) | Skupni čas (ura/min) |
|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| Obroč zatisni B12 | 2:30                   | 3:00                   | 0:00                      | 0:30                   | 5:30                 |

### Časovni podatki izdelave komponente obroč zatisni B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala

Ker je bila komponenta izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala, smo podatke o času izdelave in obdelave ter transportni čas pridobili od samega dobavitelja, ki je komponento izdelal. Ker smo komponento vstavili v samo pripravo na liniji, smo tako dobili tudi sam čas, ki je potreben za montažo komponente. Tabela 7 prikazuje časovne podatke izdelave tehnologij z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12.

Tabela 7: Časovni podatki izdelave tehnologij z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12

| Komponenta        | Čas izdelave (ura/min) | Čas obdelave (ura/min) | Transportni čas (ura/min) | Montažni čas (ura/min) | Skupni čas (ura/min) |
|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| Obroč zatisni B12 | 1:00                   | 1:30                   | 0:30                      | 0:30                   | 3:30                 |

#### 3.3.1 Časovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12

Za izračun časovne primerjave za komponento ležišča ohišja B12 med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala (tukaj smo izbrali skupni čas) smo uporabili enačbo 1.

$$r_{\check{c}} = \check{c}_d - \check{c}_o \quad (1),$$

pri čemer je:

- $r_{\check{c}}$  - razlika v času izdelave komponente (min),

- $\check{c}_d$  - čas izdelave komponente z dodajalnimi tehnologijami (*min*),
- $\check{c}_o$  - čas izdelave komponente s tehnologijami z odvzemanje materiala (*min*).

### 3.3.2 Časovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12

Za izračun časovne primerjave za komponento obroč zatisni B12 med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala (tukaj smo izbrali skupni čas) smo uporabili enačbo 1.

### 3.4 Stroškovna primerjava

Pri stroškovni primerjavi smo izračunali stroške, ki nastanejo pri samem izdelovanju teh komponent. V ceno komponente so všteti cena uporabljenega materiala, strojne ure, cena urne postavke delavca in cena obdelave.

#### Stroškovni podatki za izdelavo komponente ležišče ohišja B12 izdelana z dodajalno tehnologijo

Pri dodajalni tehnologiji smo za izračun stroškovne primerjave uporabili skupno ceno izdelave komponente ležišče ohišja B12. Skupna cena je sestavljena iz materialne cene, ki smo jo izračunali v spodnjem izračunu, nato smo všteli tudi strojno uro, v katero je všteta cena električne porabe za komponento, ter pa sama cena obdelave (raztapljanje podpornega materiala). Za izračun materialne cene pri dodajalni tehnologiji smo uporabili enačbo 2. Za izračun materialne cene za uporabljeni podporni material QSR Support smo uporabili enačbo 3. Za izračun materialne cene za oba uporabljena materiala ABS Black in QSR Support pa smo uporabili enačbo 4. Tabela 8 podaja podatke za izračun materialne cene za komponento ležišče ohišja B12 izdelana z dodajalno tehnologijo.

Tabela 8: Podatki za izračun materialne cene za izdelavo komponente ležišče ohišja B12

| Material    | Cena celotnega koluta $c^k$ (€) | Volumen celotnega koluta $V^c$ (cm <sup>3</sup> ) | Volumen uporabljenega materiala $V^m$ (cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|---------------------------------|---|--|
| ABS Black   | 250,10                          | 1474,84   | 493,657  |
| QSR Support | 183,11                          | 983,22  | 13,967   |

$$x_{ABS} = \frac{c^k}{V^c} * V^m \quad (2),$$

$$x_{QSR} = \frac{c^k}{V^c} * V^m \quad (3),$$

$$x_c = x_{ABS} + x_{QSR} \quad (4),$$

pri čemer je:

- $x_{ABS}$  - cena končne komponente, izdelane iz materiala ABS (€),
- $x_{QSR}$  - cena podpornega materiala uporabljen pri izdelavi komponente (€),
- $c^k$  - cena celotnega koluta (€),
- $V^c$  - volumen celotnega koluta ( $cm^3$ ),
- $V^m$  - volumen modela ( $cm^3$ ),
- $x_c$  - cena končnega modela (€).

Tabela 9 prikazuje skupno nabavno ceno komponente ležišča ohišja B12.

*Tabela 9: Skupna nabavna cena komponente ležišče ohišja B12*

| Komponenta         | Cena materiala (€) | Strojna ura (€) | Cena obdelave (€) | Skupna cena: (€) |
|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Ležišče ohišja B12 | 86,31              | 2,0             | 1,0               | 89,31            |

### **Stroškovni podatki za izdelavo komponente ležišče ohišja B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala**

Cena za izdelavo plastične komponente ležišče ohišja B12 s tehnologijami z odvzemanjem materiala nam je posredoval dobavitelj, ki je izdelal komponente. Tabela 10 in Priloga 5 prikazuje nabavno ceno komponente ležišča ohišja izdelan, s tehnologijami z odvzemanjem materiala.

Tabela 10: Podatki o nabavni ceni komponente ležišče ohišja B12, izdelan s tehnologijami z odvzemanjem materiala

| Komponenta         | Cena kosa (€) |
|--------------------|---------------|
| Ležišče ohišja B12 | 285           |

### **Stroškovni podatki za izdelavo komponente obroč zatisni B12, izdelana z dodajalno tehnologijo**

Pri dodajalni tehnologiji smo za izračun stroškovne primerjave uporabili skupno ceno izdelave komponente obroč zatisni B12. Skupna cena je sestavljena iz materialne cene, ki smo jo izračunali v spodnjem izračunu, nato smo všteli tudi strojno uro, v katero je všteta cena električne porabe za komponento, ter pa sama cena obdelave (raztapljanje podpornega materiala). Za izračun materialne cene pri dodajalni tehnologiji smo uporabili enačbo 2. Za izračun materialne cene za oba uporabljena materiala ABS Black in QSR Support pa smo uporabili enačbo 3. Za izračun materialne cene za oba uporabljena materiala ABS Black in QSR Support pa smo



uporabili enačbo 4. Tabela 11 podaja podatke za izračun materialne cene za komponento obroč zatisni B12 izdelana z dodajalno tehnologijo.

*Tabela 11: Podatki za izračun materialne cene za izdelavo komponente obroč zatisni -B12*

| Material    | Cena celotnega koluta $c^k$ (€) | Volumen celotnega koluta $V^c$ (cm <sup>3</sup> ) | Volumen uporabljenega materiala $V^m$ (cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|---------------------------------|---|--|
| ABS Black   | 250,10                          | 1474,84   | 67,371   |
| QSR Support | 183,11                          | 983,22  | 11,689   |

Tabela 12 prikazuje skupno nabavno ceno komponente obroč zatisni B12.

*Tabela 12: Skupna nabavna cena komponente obroč zatisni B12*

| Komponenta        | Cena materiala (€) | Strojna ura (€) | Cena obdelave (€) | Skupna cena: (€) |
|-------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Obroč zatisni B12 | 13,61              | 0,4             | 0,2               | 14,21            |

### **Stroškovni podatki za izdelavo komponente obroč zatisni B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala**

Cena za izdelavo plastične komponente obroč zatisni B12, s tehnologijami z odvzemanjem materiala nam je posredoval dobavitelj, ki je izdelal komponente. Tabela 13 in Priloga 6 prikazuje nabavno ceno komponente obroč zatisni B12, izdelan s tehnologijami z odvzemanjem materiala.

*Tabela 13: Podatki o nabavni ceni komponente obroč zatisni, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala*

| Komponenta        | Cena kosa (€) |
|-------------------|---------------|
| Obroč zatisni B12 | 122           |

#### **3.4.1 Stroškovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12**

Za izračun razlike prodajne cene med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala je spodaj navedena enačba 5:

$$r_c = c_o - c_d \quad (5),$$

pri čemer je:

- $r_c$  - razlika v nabavni ceni med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala (€),
- $c_o$  - nabavna cena za komponento, izdelano z dodajalno tehnologijo (€),
- $c_d$  - nabavna cena za komponento, izdelano s tehnologijami z odvzemanjem materiala (€).

Tabela 14 prikazuje razliko v nabavni ceni med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala.

*Tabela 14: Razlika v nabavni ceni za komponento ležišče ohišja B12*

| Komponenta         | Razlika v ceni (€) |
|--------------------|--------------------|
| Ležišče ohišja B12 | 195,69 €           |

### 3.4.2 Stroškovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12

Za izračun razlike nabavne cene med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala smo uporabili enačbo 5.

Tabela 15 prikazuje razliko v nabavni ceni med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala.

*Tabela 15: Razlika v nabavni ceni za komponento obroč zatisni B12*

| Komponenta        | Razlika v ceni (€) |
|-------------------|--------------------|
| Obroč zatisni B12 | 107,88 €           |

### 3.5 Primerjava nastanka odpadnega materiala

Pri primerjavi nastanka odpadnega materiala smo izračunali količino odpadnega materiala, ki nastane pri obeh metodah. Primerjali smo dodajalne tehnologije in tehnologije z odvzemanjem materiala za komponenti ter izračunali, kolikšna je razlika pri generiranju odpadnega materiala. Pri dodajalni metodi nismo upoštevali odpadnega topila, ki nastane pri raztapljanju podpor, saj nas je zanimal samo odpadni plastični material, ki nastane zaradi izdelave komponent.

#### **Podatki o nastanku odpadnega materiala za komponento ležišče ohišja B12, izdelana z dodajalno tehnologijo**

Pri dodajalni metodi je nastalo toliko odpadnega materiala, kolikor je bilo uporabljenega podpornega materiala. Tabela 16 prikazuje maso odpadnega podpornega materiala QSR Support.

*Tabela 16: Masa odpadnega materiala pri dodajalni metodi*

| Komponenta         | Masa (g) |
|--------------------|----------|
| Ležišče ohišja B12 | 16,6     |

## Podatki o nastanku odpadnega materiala za komponento ležišče ohišja B12, izdelana s tehnologijo z odvzemanjem materiala

Izračunali smo odpadni material, ki nastane pri izdelavi komponente ležišča ohišja B12 s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Izračunali smo tako, da smo iz volumna valja, iz katerega je bila narejena komponenta, odšteli volumen same komponente in pridobili volumen odpadnega materiala. Nato smo iz volumna in gostote materiala izračunali maso odpadnega materiala. Tabela 17 prikazuje volumen komponente ležišče ohišja B12, ki je izdelana iz akrilonitril butadien stirena ali skrajšano ABS.

*Tabela 17: Volumen ABS komponente ležišče ohišja B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala*

| Komponenta         | Volumen (cm <sup>3</sup> ) |
|--------------------|----------------------------|
| Ležišče ohišja B12 | 468,0                      |

Tabela 18 prikazuje podatke za izračun volumna obdelovanca za komponento ležišče ohišja B12.

*Tabela 18: Podatki za izračun volumna obdelovanca za komponento ležišče ohišja B12*

| Komponenta         | Višina obdelovanca (cm) | Polmer obdelovanca (cm) |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ležišče ohišja B12 | 13                      | 6                       |

Za izračun odpadnega materiala pri tehnologijah z odvzemanjem materiala so spodaj navedene enačbe:

Za izračun volumna valja, iz katerega je bila izdelana komponenta, smo uporabili enačbo 6.

$$V_{valja\ za\ izdelavo\ komponente} = \pi r^2 v \quad (6),$$

pri čemer je:

- $V_{valja\ za\ izdelavo\ komponente}$  - volumen valja za izdelavo komponente (cm<sup>3</sup>),
- $\pi$  - pi,
- $r$  - polmer (cm),
- $v$  - višina (cm).

Za izračun volumna odpadnega materiala, ki je nastal pri izdelavi, smo uporabili enačbo 7.

$$V_{odpadnega\ materiala} = V_{valja} - V_{komponente} \quad (7),$$

pri čemer je:

- $V_{odpadnega\ materiala}$  - volumen odpadnega materiala (cm<sup>3</sup>),
- $V_{valja}$  - volumen valja - surovca (cm<sup>3</sup>),

- $V_{komponente}$  - volumen komponente ( $cm^3$ ).

Za izračun mase odpadnega ABS materiala, ki je nastal pri izdelavi, smo uporabili enačbo 8. Pri tem smo upoštevali, da je gostota ( $\rho$ ) materiala ABS  $1.07 \text{ g/cm}^3$ .

$$m_{odpadnega\ materiala} = \rho_{ABS\ materiala} * V_{odpadnega\ materiala} \quad (8),$$

pri čemer je:

- $m_{odpadnega\ materiala}$  - masa odpadnega materiala (g),
- $\rho_{ABS\ materiala}$  - gostota ABS materiala ( $g/cm^3$ ),
- $V_{odpadnega\ materiala}$  - volumen odpadnega materiala ( $cm^3$ )

### Podatki o nastanku odpadnega materiala za komponento obroč zatisni B12, izdelana z dodajalno tehnologijo

Pri dodajalni metodi je nastalo toliko odpadnega materiala, kolikor je bilo uporabljenega podpornega materiala. Tabela 19 prikazuje maso odpadnega podpornega materiala QSR Support.

Tabela 19: Masa odpadnega materiala pri dodajalni metodi

| Komponenta        | Masa (g) |
|-------------------|----------|
| Obroč zatisni B12 | 13,9     |

### Podatki o nastanku odpadnega materiala za komponento obroč zatisni B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala

Izračunali smo odpadni material, ki nastane pri izdelavi komponente obroč zatisni B12 s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Izračunali smo tako, da smo iz volumna valja, iz katerega je bila narejena komponenta, odšteli volumen same komponente in pridobili volumen odpadnega materiala. Nato smo iz volumna in gostote materiala izračunali maso odpadnega materiala. Tabela 20 prikazuje volumen komponente obroč zatisni B12, ki je izdelana iz akrilonitril butadien stiren ali skrajšano ABS.

Tabela 20: Volumen ABS komponente obroč zatisni B12 izdelan s tehnologijami z odvzemanjem materiala

| Komponenta        | Volumen ( $cm^3$ ) |
|-------------------|--------------------|
| Obroč zatisni B12 | 64,1               |

Tabela 21 prikazuje podatke za izračun volumna surovca za komponento obroč zatisni B12.

Tabela 21: Podatki za izračun volumna surovca za komponento obroč zatisni B12

| Komponenta        | Višina obdelovanca (cm) | Polmer obdelovanca (cm) |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Obroč zatisni B12 | 2,5                     | 6                       |

Za izračun odpadnega materiala pri tehnologijah z odvzemanjem materiala smo uporabili tri enačbe. Za izračun volumna valja, iz katerega je bila izdelana komponenta, smo uporabili enačbo 6. Za izračun volumna odpadnega materiala, ki je nastal pri izdelavi, smo uporabili enačbo 7. Za izračun mase odpadnega ABS materiala, ki je nastal pri izdelavi, smo uporabili enačbo 8. Pri tem smo upoštevali, da je gostota ( $\rho$ ) materiala ABS  $1.07 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.5.1 Primerjava nastanka odpadnega materiala med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12

Za izračun razlike odpadnega materiala, ki je nastal pri izdelavi komponente ležišče ohišja B12 med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala, smo uporabili enačbo 9.

$$r_m = m_o - m_d \quad (9),$$

pri čemer je:

- $r_m$  - razlika v masi odpadnega materiala za komponento (g)
- $m_o$  - masa odpadnega materiala komponente, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala (g)
- $m_d$  - masa odpadnega materiala komponente, izdelane z dodajalno metodo (g)

### 3.5.2 Primerjava nastanka odpadnega materiala med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12

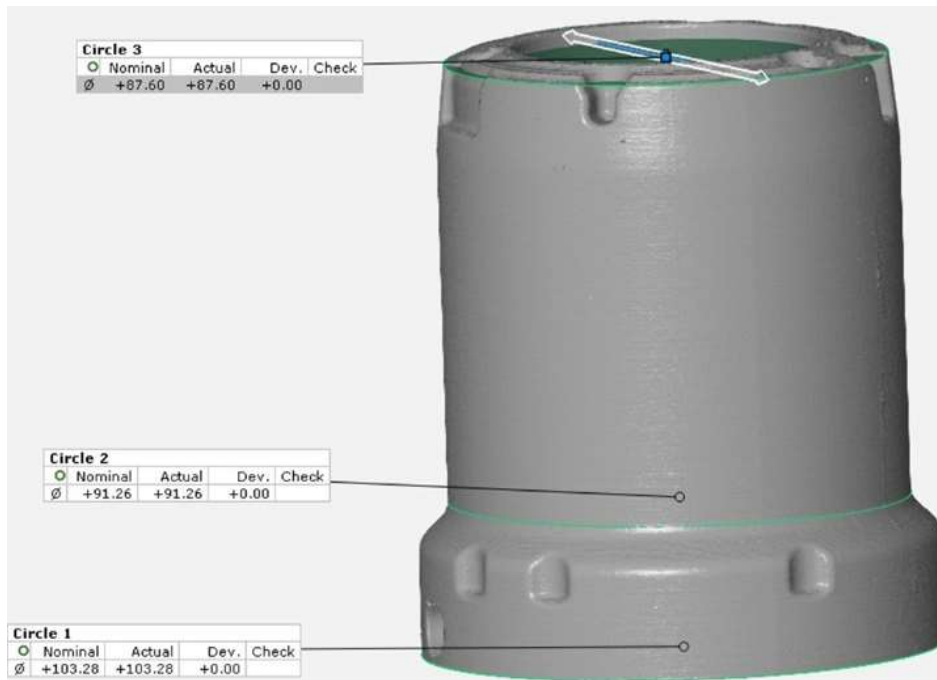
Za izračun razlike odpadnega materiala, ki je nastal pri izdelavi komponente obroč zatisni B12 med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala, smo uporabili enačbo 9.

## 3.6 Dimenzijski podatki

Pri dimenzijski primerjavi smo v programu GOM Inspect izmerili tri obsege, ki so tolerančno definirani. Te točke so definirane, saj določujejo območje, v katerem se mora komponenta nahajati, da jo lahko uporabimo na liniji za sestavljanje aparata. Modele STL-oblike smo uvozili v program GOM Inspect ter s pomočjo programa izmerili zahtevane obsege za določanje, ali je komponenta v tolerančnem območju.

### Dimenzijski podatki za komponento ležišče ohišja B12 izdelana z dodajalno tehnologijo

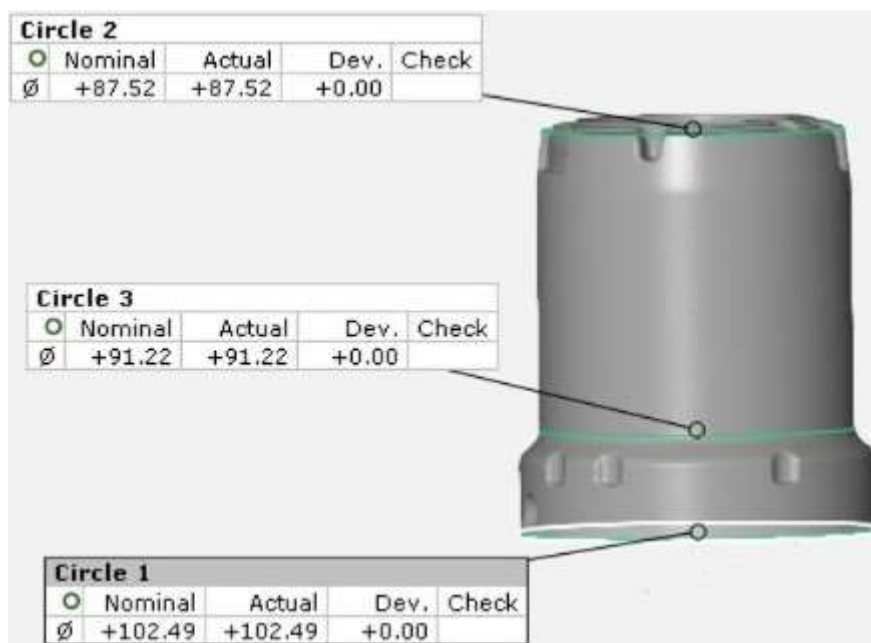
V program GOM Inspect smo uvozili STL-datoteko komponente ležišče ohišja B12, ki je bila izdelana z dodajalno metodo. Komponento smo uvozili kot trigonometrično mrežo (Mesh), saj to zahteva program. Nato smo določili točke, kjer smo izmerili tri zahtevane obsege. Slika 13 prikazuje merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente ležišče ohišja B12.



Slika 13: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente ležišče ohišja B12

### Dimenzijski podatki za komponento ležišče ohišja B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala

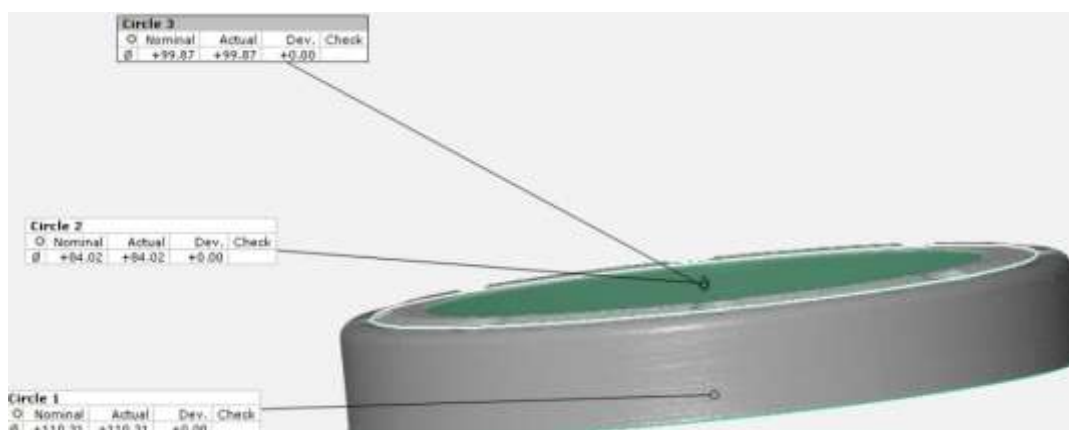
V program GOM Inspect smo uvozili STL-datoteko komponente ležišče ohišja B12, ki je bila izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Komponento smo uvozili kot trigonometrično mrežo (Mesh), saj to zahteva program. Nato smo določili točke, kjer smo izmerili tri zahtevane obsege. Slika 14 prikazuje merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente ležišče ohišja B12.



Slika 14: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente ležišče ohišja B12

### Dimenzijski podatki za komponento obroč zatisni B12, izdelano z dodajalno tehnologijo

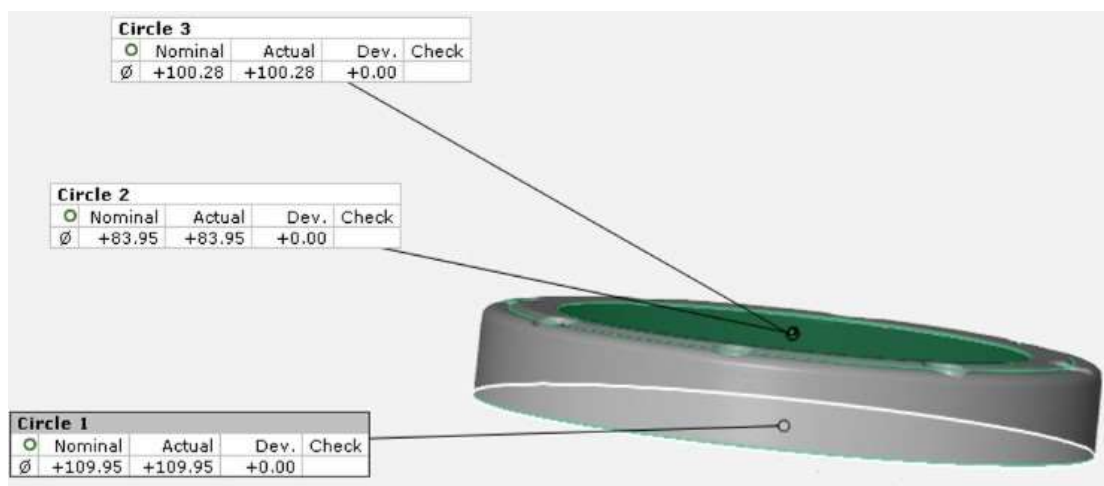
V program GOM Inspect smo uvozili STL-datoteko komponente obroč zatisni B12, ki je bila izdelana dodajalno tehnologijo. Komponento smo uvozili kot trigonometrično mrežo (Mesh), saj to zahteva program. Nato smo določili točke, kjer smo izmerili tri zahtevane obsege. Slika 15 prikazuje merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente obroč zatisni B12.



Slika 15: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente obroč zatisni B12

## Dimenzijski podatki za komponento obroč zatisni B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala

V program GOM Inspect smo uvozili STL-datoteko komponente obroč zatisni B12, ki je bila izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Komponento smo uvozili kot trigonometrično mrežo (Mesh), saj to zahteva program. Nato smo določili točke, kjer smo izmerili tri zahtevane obsege. Slika 16 prikazuje merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente obroč zatisni B12.

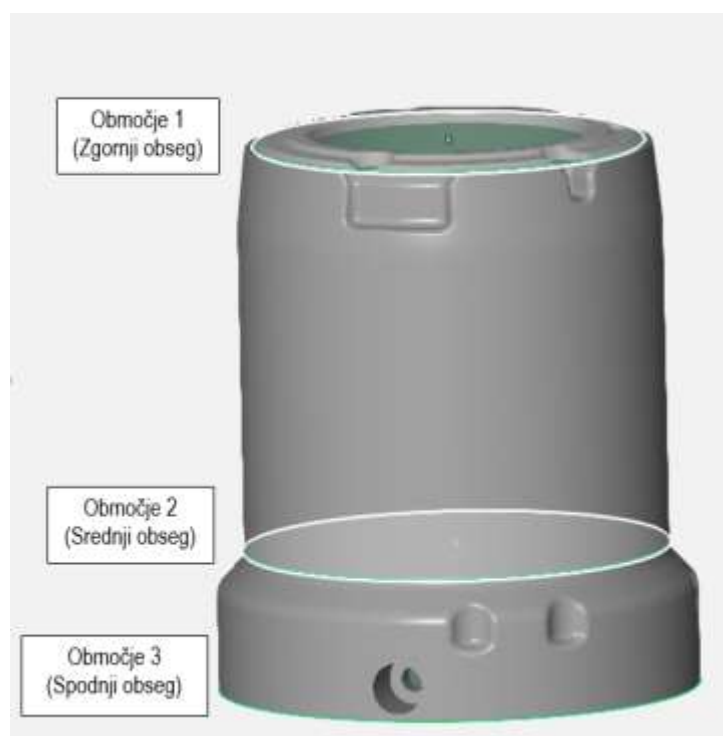


Slika 16: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente obroč zatisni B12

### 3.7 Primerjava modelov

Primerjali smo komponento ležišče ohišja B12, izdelano z dodatno tehnologijo z originalnim CAD-modelom in s komponento, izdelano s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Enako smo naredili s komponento obroč zatisni B12, izdelano s tehnologijami z odvzemanjem materiala z originalnim CAD-modelom, in pa komponento, izdelano z dodatno tehnologijo. To smo opravili v programu GOM Inspect. Slika 17 prikazuje območja merjenja obsegov komponente ležišče ohišja B12.





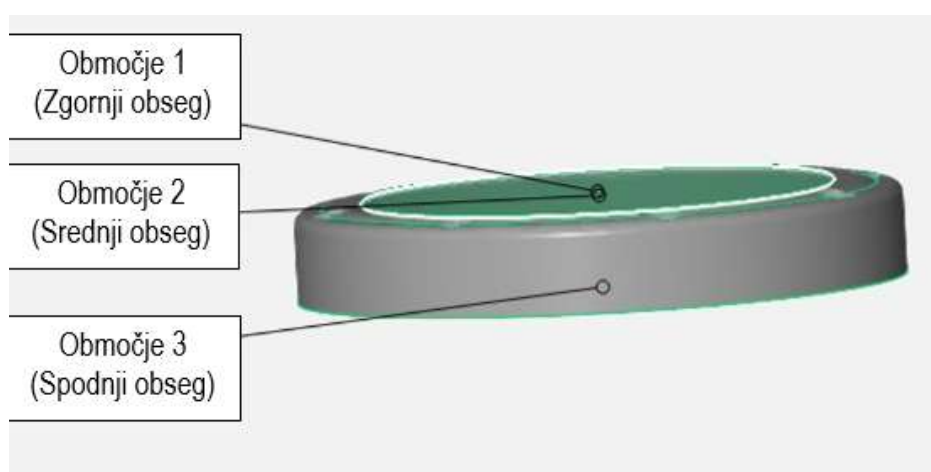
Slika 17: Določena območja merjenja komponente ležišče ohišja B12

Tabela 22 prikazuje tolerance komponente ležišče ohišja B12.

Tabela 22: Tolerančno območje za komponento ležišče ohišja B12

|                      | Območje 1 (Zgornji obseg) | Območje 2 (srednji obseg) | Območje 3 (Spodnji obseg) |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Originalni CAD model | 87,49 mm                  | 91,06 mm                  | 103,00 mm                 |
| Tolerančno območje   | + 0,30 / - 1,00 mm        | + 0,30 / - 1,00 mm        | + 0,30 / - 1,00 mm        |

Slika 18 prikazuje območja merjenja obsegov komponente obroč zatisni B12.



Slika 18: Določena območja merjenja komponente obroč zatisni B12

Tabela 23 prikazuje tolerance komponente obroč zatisni B12.

Tabela 23: Tolerančno območje za komponento obroč zatisni B12

|                      | Območje 1 (Zgornji obseg) | Območje 2 (srednji obseg) | Območje 3 (Spodnji obseg) |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Originalni CAD model | 84,68 mm                  | 100,54 mm                 | 110,00 mm                 |
| Tolerančno območje   | + 0,50 / - 0,75 mm        | + 0,50 / - 0,75 mm        | + 0,50 / - 0,75 mm        |

### 3.7.1 Primerjava komponente ležišče ohišja B12

Komponento ležišče ohišja B12, izdelano z dodajalno tehnologijo, smo primerjali s komponento, izdelano s tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD modelom. To smo naredili tako, da smo vsa območja merjenja odšteli med sabo in tako dobili odstopanje ene komponente z drugo, ter s samim originalnim CAD modelom komponente. Tabela 24 prikazuje podatke meritev obsegov v treh točkah za obe komponenti in originalni CAD model, ter samo odstopanje.

Tabela 24: Podatki meritev obsegov v treh točkah in odstopanje

|  | Območje 1 (Zgornji obseg) | Območje 2 (srednji obseg) | Območje 3 (Spodnji obseg) |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Originalni CAD model   | 87,49 mm                  | 91,06 mm                  | 103,00 mm                 |
| Dodajalna tehnologija  | 87,60 mm                  | 91,26 mm                  | 103,28 mm                 |
| Tehnologije z odvzemanjem materiala  | 87,52 mm                  | 91,22 mm                  | 102,49 mm                 |
| Razlika med dodajalno tehnologijo in originalnim CAD modelom                 | + 0,11 mm                 | + 0,20 mm                 | + 0,28 mm                 |
| Razlika med tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD modelom | + 0,03 mm                 | + 0,16 mm                 | - 0,51 mm                 |
| Razlika med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala   | + 0,08 mm                 | + 0,04 mm                 | + 0,79 mm                 |

### 3.7.2 Primerjava komponente obroč zatisni B12

Komponento obroč zatisni B12, izdelano z dodajalno tehnologijo, smo primerjali s komponento, izdelano s tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD modelom. To smo naredili tako, da smo vsa območja merjenja odšteli med sabo in tako dobili odstopanje ene komponente z drugo, ter s samim originalnim CAD modelom komponente. Tabela 25 prikazuje podatke meritev obsegov v treh točkah za obe komponenti in originalnim CAD modelom ter samo odstopanje.

*Tabela 25: Podatki meritev obsegov v treh točkah in odstopanje*

|  | Območje 1<br>(Zgornji obseg) | Območje 2<br>(srednji obseg) | Območje 3<br>(Spodnji obseg) |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Originalnim CAD model  | 84,68 mm                     | 100,54 mm                    | 110,00 mm                    |
| Dodajalna tehnologija  | 84,02 mm                     | 99,87 mm                     | 110,31 mm                    |
| Tehnologije z odvzemanjem materiala  | 83,95 mm                     | 100,28 mm                    | 109,95 mm                    |
| Razlika med dodajalno tehnologijo in originalnim CAD modelom                 | - 0,66 mm                    | - 0,67 mm                    | + 0,31 mm                    |
| Razlika med tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD modelom | - 0,73 mm                    | - 0,26 mm                    | - 0,05 mm                    |
| Razlika med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala   | + 0,07 mm                    | - 0,41 mm                    | + 0,36 mm                    |

## 4 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 4.1 Časovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala

Pri izdelavi komponente ležišče ohišja B12 z dodajalno tehnologijo smo potrebovali 14 ur in 20 minut. V primerjavi so tehnologije z odvzemanjem materiala potrebovale 9 ur, kar je 320 minut ali 5 ur in 30 min manj kot dodajalna tehnologija.

Pri izdelavi komponente obroč zatisni B12 z dodajalno tehnologijo smo potrebovali 5 ur in 30 minut. V primerjavi so tehnologije z odvzemanjem materiala potrebovale 3 ure in 30 minut, kar je 120 minut ali 2 ure manj kot dodajalna tehnologija.

Dodajalna tehnologija potrebuje več časa za izdelavo komponent, saj kot že ime pove, se tehnologija nanaša sloje. Ti sloji so v našem primeru debeline 0.254 mm. Za izdelavo ležišča ohišja B12 potrebujemo 483 slojev, medtem ko pri obroču zatisnem B12 potrebujemo 79 slojev. V primerjavi tehnologije z odvzemanjem materiala hitro izdelajo obliko iz surovca s pomočjo struženja, rezkanja, brušenja in poliranja komponent.

Vzrok za dobljene rezultate leži v geometrijski zahtevnosti izdelkov, ki smo jih primerjali. Ker gre za relativno enostavne izdelke (osno simetrične), so posledično dodajalne tehnologije nekonkurenčne. Ob bolj zahtevnih geometrijah (previsna mesta, izpraznitve, področja, ki jih je težko doseči in tako naprej) pa bi rezultat verjetno bil drugačen.

### 4.2 Stroškovna primerjava med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala

Za izdelavo komponente ležišče ohišja B12 z dodajalno tehnologijo je nabavna cena 89,31 €. V primerjavi je nabavna cena komponente izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala 285 €. Razlika v nabavni ceni med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala znaša 195,69 €.

Za izdelavo komponente obroč zatisni B12 z dodajalno tehnologijo je nabavna cena 14,12 €. Za primerjavo: nabavna cena komponente, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala, je 122,00 €. Razlika v nabavni ceni med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala znaša 107,88 €.

Dodajalna tehnologija je za izdelavo komponent cenejša kot pa tehnologije z odvzemanjem materiala. Tehnologija z odvzemanjem materiala je dražja zaradi tega, ker so obdelovalni stroji dražji kot je 3D tiskalnik. Zaradi cene strojev in pa orodij, ki se uporabljajo za izdelavo komponent, je v ceno všteta tudi amortizacija strojev. Poleg tega pa pri tehnologijah z odvzemanjem materiala potrebujemo več faz, kot so struženje, rezkanje, brušenje, ter s tem tudi več strojev za izdelavo komponente.

### **4.3 Primerjava nastanka odpadnega materiala med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala**

Pri izdelavi komponente ležišče ohišja B12 z dodajalno tehnologijo nastane 16,6 gramov odpadnega podpornega materiala. V primerjavi tehnologije z odvzemanjem materiala proizvedejo 1072,42 gramov odpadnega materiala. Tehnologije z odvzemanjem materiala proizvedejo 1055,82 gramov več odpadnega materiala kot dodajalna tehnologija, kar v našem primeru znaša 64,6-krat več.

Pri izdelavi komponente obroč zatisni B12 z dodajalno tehnologijo nastane 13,9 gramov odpadnega podpornega materiala. V primerjavi tehnologije z odvzemanjem materiala proizvedejo 233,95 gramov odpadnega materiala. Tehnologije z odvzemanjem materiala proizvedejo 220,05 gramov več odpadnega materiala kot dodajalna tehnologija, kar v našem primeru znaša 16,8-krat več.

Pri tehnologijah z odvzemanjem materiala nastane več odpadnega materiala, kot pri dodajalnih tehnologijah. Dodajalne tehnologije dodajajo toliko materiala, kot je potrebno za izdelavo komponente. Pri tem pa proizvede odpadni material v obliki podpornih struktur.

Tehnologije z odvzemanjem materiala proizvedejo več odpadnega materiala, ker izdelajo komponente iz valjastega surovca. Posledično nastane odpad pri obdelavi zunanjih in notranjih oblik posamezne komponente.

### **4.4 Dimenzijska primerjava**

#### **Dimenzijska primerjava komponente ležišče ohišja B12 med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala**

Pri primerjavi komponent smo bili znotraj tolerančnega območja. Primerjali smo odstopanje med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12. Komponenta, izdelana z dodajalno tehnologijo, je v območju 1 večja za 0,80 mm od komponente, izdelane s tehnologijami z odvzemanjem materiala. V območju 2 je komponenta večja za 0,04 mm in v območju 3 je večja za 0,79 mm od komponente, izdelane s tehnologijami z odvzemanjem materiala.

#### **Dimenzijska primerjava komponente ležišče ohišja B12 med dodajalno tehnologijo in originalnim CAD-modelom**

Pri primerjavi komponente z originalnim CAD-modelom smo bili znotraj tolerančnega območja. Primerjali smo odstopanje med dodajalno tehnologijo in originalnim CAD-modelom komponente ležišče ohišja B12. Komponenta, izdelana z dodajalno tehnologijo, je v območju 1 večja za 0,11 mm od originalnega CAD-modela ležišča ohišja B12. V območju 2 je komponenta večja za 0,20 mm in v območju 3 je večja za 0,28 mm od originalnega CAD-modela komponente.

### **Dimenzijska primerjava komponente ležišče ohišja B12 med tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD-modelom**

Pri primerjavi komponente z originalnim CAD-modelom smo bili znotraj tolerančnega območja. Primerjali smo odstopanje med tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD-modelom komponente ležišče ohišja B12. Komponenta, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala, je v območju 1 večja za 0,03 mm od originalnega CAD-modela ležišča ohišja B12. V območju 2 je komponenta večja za 0,16 mm in v območju 3 je manjša za 0,51 mm od originalnega CAD-modela komponente.

### **Dimenzijska primerjava komponente obroč zatisni B12 med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala**

Pri primerjavi komponent smo bili znotraj tolerančnega območja. Primerjali smo odstopanje med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12. Komponenta, izdelana z dodajalno tehnologijo, je v območju 1 večja za 0,07 mm od komponente, izdelane s tehnologijami z odvzemanjem materiala. V območju 2 je komponenta manjša za 0,41 mm in v območju 3 je večja za 0,36 mm od komponente, izdelane s tehnologijami z odvzemanjem materiala.

### **Dimenzijska primerjava komponente obroč zatisni B12 med dodajalno tehnologijo in originalnim CAD-modelom**

Pri primerjavi komponente z originalnim CAD-modelom smo bili znotraj tolerančnega območja. Primerjali smo odstopanje med dodajalno tehnologijo in originalnim CAD-modelom komponente obroč zatisni B12. Komponenta, izdelana z dodajalno tehnologijo, je v območju 1 manjša za 0,66 mm od originalnega CAD-modela obroč zatisni B12. V območju 2 je komponenta manjša za 0,67 mm in v območju 3 je večja za 0,31 mm od originalnega CAD-modela komponente.

### **Dimenzijska primerjava komponente obroč zatisni B12 med tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD-modelom**

Pri primerjavi komponente z originalnim CAD-modelom smo bili znotraj tolerančnega območja. Primerjali smo odstopanje med tehnologijami z odvzemanjem materiala in originalnim CAD-modelom komponente obroč zatisni B12. Komponenta, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala, je v območju 1 manjša za 0,73 mm od originalnega CAD-modela obroč zatisni B12. V območju 2 je komponenta manjša za 0,26 mm in v območju 3 je večja za 0,05 mm od originalnega CAD-modela komponente.

## 5 SKLEP

V diplomski nalogi smo uspešno izdelali plastične komponente priprave za sestavo ohišja naprave Bosch B12, mini blender. Glavni poudarek raziskave je bil, da ugotovimo, ali lahko uporabimo dodajalno metodo za izdelavo sestavnih delov za pripravo, ki se uporablja na sami serijski sestavni liniji. Eksperimentalni del diplomske naloge smo pričeli z izdelavo 3D-tiskanih delov priprave na FDM-tiskalniku. Ko smo izdelali plastični komponenti, smo naredili 3D digitalizacijo samih komponent s transmisivno tehnologijo CT, ki nam je izdelala triangulirane modele, ki smo jih lahko uporabili za geometrijsko primerjavo z originalnima CAD-modeloma. Ker je priprava že narejena, smo CAD-modele pridobili že od podjetja in smo jih lahko tako uporabili za primerjavo v programu GOM Inspect. Z našim raziskovalnim delom smo ugotovili naslednje:

- Z eksperimentalnim delom smo potrdili hipotezo 1, da lahko z dodajalnimi tehnologijami za izbrane aplikacije dosegamo zahtevano tolerančno območje. Dodajalne metode so primerljive tehnologijam z odvzemanjem materiala za aplikacijo, kot je izdelava orodij za montažo izdelkov. Če je tolerančno območje manjše in je zahteva po bolj natančnih komponentah, so tehnologije z odvzemanjem materiala boljše za takšne aplikacije, saj lahko z naknadno obdelavo dobimo izdelke natančnosti tudi do stotinke milimetra. Pri dodajalni metodi takšne natančnosti ne moremo zagotoviti. Za izboljšanje natančnosti izdelka, izdelanega z dodajalnimi tehnologijami, lahko uporabimo naknadno obdelavo s tehnologijami z odvzemanjem materiala (hibridne tehnologije). Pri dodajalnih tehnologijah moramo biti pozorni, da so parametri ustrezni, saj lahko prihaja do razslojevanja in s tem do poškodbe komponente.
- Z eksperimentalnim delom smo potrdili hipotezo 2, da lahko z dodajalnimi tehnologijami za izbrane aplikacije izdelamo cenejše izdelke, kot jih lahko s tehnologijami z odvzemanjem materiala. V našem primeru smo imeli relativno enostavne komponente (osno simetrične) in smo s pomočjo dodajalnih tehnologij izdelali veliko cenejše komponente kot s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Če bi bilo potrebno izdelati oblikovno zahtevnejše komponente, bi bile razlike v ceni med dodajalnimi tehnologijami in tehnologijami z odvzemanjem materiala še večje. Pri projektih, kjer je strošek pomembnejši od časa, se lahko uporabijo dodajalne tehnologije za zmanjšanje stroškov.
- Z eksperimentalnim delom smo potrdili hipotezo 3, da lahko z dodajalnimi tehnologijami za izbrane aplikacije proizvedemo manj odpadnega materiala kot s tehnologijami z odvzemanjem materiala. Do tega prihaja zato, ker 3D tiskalniki dodajajo samo toliko materiala, kot je potrebno za izdelavo komponent. Edini odpadni material, ki nastane pri izdelavi komponent z dodajalno tehnologijo, so podporne strukture. Poleg tega smo ugotovili, da pri večjih komponentah proizvedejo tehnologije z odvzemanjem materiala več odpadnega materiala kot pri manjših komponentah.
- Z eksperimentalnim delom smo ovrgli hipotezo 4, da lahko z dodajalnimi tehnologijami hitreje izdelamo izdelke za določene aplikacije kot s tehnologijami z

odvzemanjem materiala. V našem primeru smo imeli relativno enostavne komponente (osno simetrične), zato je bila izdelava s tehnologijami z odvzemanjem materiala hitrejša. V primeru zahtevnejših oblik (votline, notranje izpraznitve, oblika polnila, itd.) pa lahko z dodajalnimi tehnologijami izdelamo izdelke v krajšem času, saj se z zahtevnostjo lahko faze izdelave s tehnologijami z odvzemanjem materiala podaljšujejo.

S pomočjo rezultatov, ki smo jih pridobili v tej diplomski nalogi, se bo v podjetju uporabilo več časa za raziskovanje uporabe dodajalnih tehnologij v samem proizvodnem procesu. Poleg uporabe 3D tiskalnikov za izdelavo komponent na pripravah na sestavnih linijah se bo uporaba razširila v laboratorije za izdelavo orodij za testiranje različnih komponent. Poleg tega je velik interes za izdelavo več komponentnih priprav, ki bodo imele v območju, kjer se dotika priprava zunanje površine izdelka, elastomerni material. Tako bomo raziskovanje posvetili zmanjšanjem mehanskih poškodb (risi, razbarvanje, itd.), ki nastanejo na izdelkih med sestavo zaradi same priprave. Poleg omenjenih aplikacij pa se bomo posvečali predvsem raziskovanju uporabe dodajalnih tehnologij za izdelavo rezervnih komponent za izdelke, ki so bili vrnjeni zaradi reklamacije.



**SEZNAM LITERATURE IN VIROV**

- [1] Muck, Deja, and Igor Križanovskij. *3D-tisk*. Ljubljana, Slovenia: Pasadena, 2015.
- [2] Bukovec, Mitja, Finšgar, Matjaž (2017). 3D-tisk. *Vakuumist, letnik 37, številka 2, str. 19-23*. URN:NBN:SI:doc-TW838U3S from <http://www.dlib.si>
- [3] Moeskopf, E., Feenstra, F. (2008). Introduction to Rapid Prototyping. In: Raja, V., Fernandes, K. (eds) *Reverse Engineering*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2_5)
- [4] A Rosochowski, A Matuszak, Rapid tooling: the state of the art, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 106, Issues 1–3, 2000, Pages 191-198, ISSN 0924-0136, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00613-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00613-0).
- [5] Zhang, J., Yu, Z. Overview of 3D printing technologies for reverse engineering product design. *Aut. Control Comp. Sci.* 50, 91–97 (2016). <https://doi.org/10.3103/S0146411616020073>
- [6] Raja, V. (2008). Introduction to Reverse Engineering. In: Raja, V., Fernandes, K. (eds) *Reverse Engineering*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2_1)
- [7] Page, D., Koschan, A., Abidi, M. (2008). Methodologies and Techniques for Reverse Engineering—The Potential for Automation with 3-D Laser Scanners. In: Raja, V., Fernandes, K. (eds) *Reverse Engineering*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2_2)
- [8] Francesco Buonamici , Monica Carfagni , Rocco Furferi , Lapo Governi , Alessandro Lapini & Yary Volpe (2017): Reverse engineering modeling methods and tools: a survey, *Computer-Aided Design and Applications*, DOI: 10.1080/16864360.2017.1397894
- [9] L. Li, N. Schemenauer, X. Peng, Y. Zeng, P. Gu, A reverse engineering system for rapid manufacturing of complex objects, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 18, Issue 1, 2002, Pages 53-67, ISSN 0736-5845, [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(01\)00026-6](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(01)00026-6).
- [10] Pham, D., Hieu, L. (2008). Reverse Engineering—Hardware and Software. In: Raja, V., Fernandes, K. (eds) *Reverse Engineering*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2_3)
- [11] Tamás Várady, Ralph R Martin, Jordan Cox, Reverse engineering of geometric models—an introduction, *Computer-Aided Design*, Volume 29, Issue 4, 1997, Pages 255-268, ISSN 0010-4485, [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(96\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(96)00054-1).
- [12] Stella Fahrni, Lorenzo Campana, Alejandro Dominguez, Tanya Uldin, Fabrice Dedouit, Olivier Delémont & Silke Grabherr (2017) CT-scan vs. 3D surface scanning of a skull: first considerations regarding reproducibility issues, *Forensic Sciences Research*, 2:2, 93-99, DOI: 10.1080/20961790.2017.1334353
- [13] Flisch, Alexander, et al. "Industrial computed tomography in reverse engineering applications." *DGZ-fP-Proceedings BB 4.7* (1999): 45-53.

**SEZNAM SLIK**

|  |           |
|--|-----------|
| Slika 1: Izdelava prototipnega orodja [3].....   | 4         |
| Slika 2: Delovanje tehnologije FDM [2].....  | 14        |
| <i>Slika 3: Računalniško podrti vzvratni inženiring (CARE) [7].....</i>  | <i>16</i> |
| Slika 4: Obdelava točk iz oblaka točk v triangulirane površine [7].....  | 19        |
| Slika 5: Delitev kontaktnih metod [3].....   | 21        |
| Slika 6: Klasifikacija brezkontaktnih metod [10].....  | 22        |
| <i>Slika 7: Nastavitve v programu GrabCAD za komponento ležišče ohišja B12.....</i>                              | <i>24</i> |
| Slika 8: Nastavitve v programu GrabCAD za komponento obroč zatisni B12.....                                      | 25        |
| Slika 9: 3D-digitalizacija komponenta ležišča ohišja B12 izdelana z dodajalno metodo.....                        | 27        |
| Slika 10: 3D-digitalizacija komponente ležišče ohišja B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala..... | 27        |
| Slika 11: 3D-digitalizacija komponente obroč zatisni B12, izdelana z dodajalno tehnologijo.....                  | 28        |
| Slika 12: 3D-digitalizacija komponente obroč zatisni B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala.....  | 28        |
| Slika 13: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente ležišče ohišja B12.....                        | 38        |
| Slika 14: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente ležišče ohišja B12.....                        | 39        |
| Slika 15: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente obroč zatisni B12.....                         | 39        |
| Slika 16: Merilne točke in mere (mm) določenih obsegov komponente obroč zatisni B12.....                         | 40        |
| Slika 17: Določena območja merjenja komponente ležišče ohišja B12.....   | 41        |
| Slika 18: Določena območja merjenja komponente obroč zatisni B12.....  | 41        |

**SEZNAM TABEL**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Profil tiskanja komponente ležišče ohišja B12.....  | 24 |
| Tabela 2: Profil tiskanja komponente obroč zatisni B12.....   | 25 |
| Tabela 3: Specifikacije CT Zeiss Metrotom 1500.....   | 26 |
| Tabela 4: Časovni podatki izdelave dodajalne metode za komponento ležišče ohišja B12.....                             | 29 |
| Tabela 5: Časovni podatki izdelave tehnologij z odvzemanjem materiala za komponento ležišče ohišja B12.....           | 29 |
| Tabela 6: Časovni podatki izdelave dodajalne metode za komponento obroč zatisni B12.....                              | 30 |
| Tabela 7: Časovni podatki izdelave tehnologij z odvzemanjem materiala za komponento obroč zatisni B12.....            | 30 |
| Tabela 8: Podatki za izračun materialne cene za izdelavo komponente ležišče ohišja B12.....                           | 31 |
| Tabela 9: Skupna nabavna cena komponente ležišče ohišja B12.....  | 32 |
| Tabela 10: Podatki o nabavni ceni komponente ležišče ohišja B12, izdelan s tehnologijami z odvzemanjem materiala..... | 32 |
| Tabela 11: Podatki za izračun materialne cene za izdelavo komponente obroč zatisni -B12.....                          | 33 |
| Tabela 12: Skupna nabavna cena komponente obroč zatisni B12.....  | 33 |
| Tabela 13: Podatki o nabavni ceni komponente obroč zatisni, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala.....     | 33 |
| Tabela 14: Razlika v nabavni ceni za komponento ležišče ohišja B12.....   | 34 |
| Tabela 15: Razlika v nabavni ceni za komponento obroč zatisni B12.....  | 34 |
| Tabela 16: Masa odpadnega materiala pri dodajalni metodi.....   | 34 |
| Tabela 17: Volumen ABS komponente ležišče ohišja B12 izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala.....            | 35 |
| Tabela 18: Podatki za izračun volumna obdelovanca za komponento ležišče ohišja B12.....                               | 35 |
| Tabela 19: Masa odpadnega materiala pri dodajalni metodi.....   | 36 |
| Tabela 20: Volumen ABS komponente obroč zatisni B12 izdelan s tehnologijami z odvzemanjem materiala.....              | 36 |
| Tabela 21: Podatki za izračun volumna surovca za komponento obroč zatisni B12.....                                    | 36 |
| Tabela 22: Tolerančno območje za komponento ležišče ohišja B12.....   | 41 |
| Tabela 23: Tolerančno območje za komponento obroč zatisni B12.....  | 42 |
| Tabela 24: Podatki meritev obsegov v treh točkah in odstopanje.....   | 42 |
| Tabela 25: Podatki meritev obsegov v treh točkah in odstopanje.....   | 43 |

**SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV**

$\rho$  - gostota

$m$  - masa

€ - evro

$\mu$  - mikro

$mm$  - milimeter

$cm^3$  - kubični centimeter

$V$  - volumen

$g$  - gram

$\mu A$  - mikroamper

$kV$  - kilovolt

$W$  - vat

$\mu m$  - mikrometer

$h$  - ura

$r$  - polmer

$v$  - višina

$x_c$  - cena končnega modela

% - odstotek

$^{\circ}C$  - stopinj Celzija

$\Pi$  - pi

$c^k$  - cena celotnega koluta (€)

$V^c$  - volumen celotnega koluta ( $cm^3$ )

$V^m$  - volumen modela ( $cm^3$ )

$x_{ABS}$  - cena končne komponente, izdelane iz materiala ABS (€)

$x_{QSR}$  - cena podpornega materiala uporabljen pri izdelavi komponente (€)

$m_o$  - masa odpadnega materiala komponente, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala ( $g$ )

$m_d$  - masa odpadnega materiala komponente, izdelane z dodajalno metodo ( $g$ )

$r_m$  - razlika v masi odpadnega materiala za komponento ( $g$ )

$\check{c}_o$  - čas izdelave komponente s tehnologijami z odvzemanje materiala ( $min$ )

$\check{c}_d$  - čas izdelave komponente z dodajalnimi tehnologijami ( $min$ )

$r_{\check{c}}$  - razlika v času izdelave komponente ( $min$ )

$r_c$  - razlika v nabavni ceni med dodajalno tehnologijo in tehnologijami z odvzemanjem materiala (€)

$c_o$  - nabavna cena za komponento, izdelano z dodajalno tehnologijo (€)

$c_d$  - nabavna cena za komponento, izdelano s tehnologijami z odvzemanjem materiala (€)

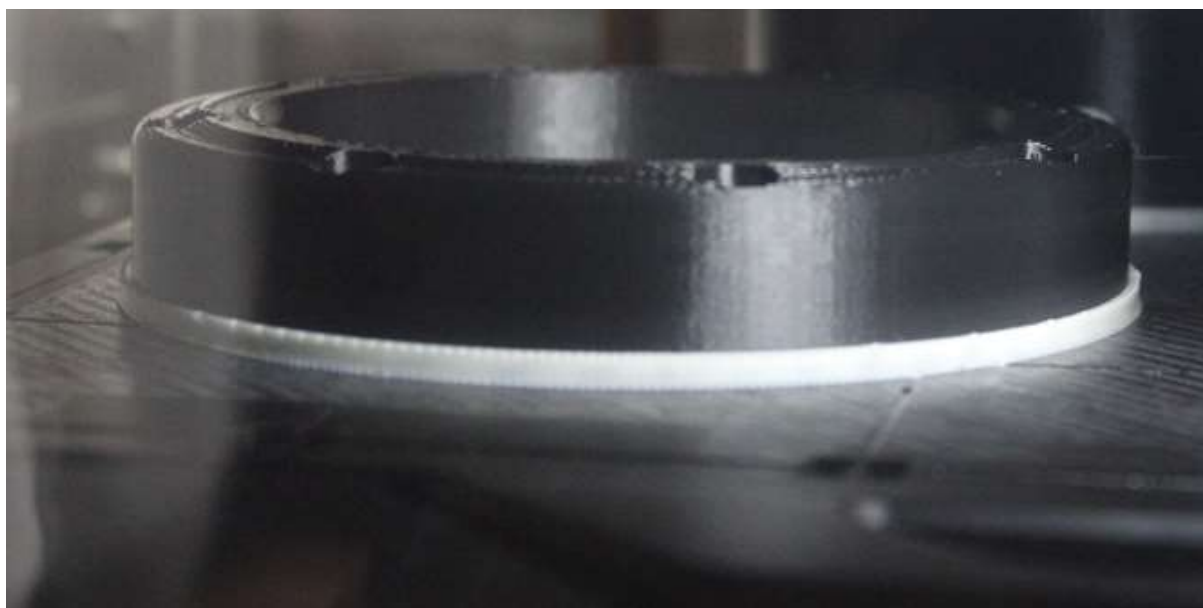
---

**SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC**

DT - Direct Tooling  
IT - Indirect Tooling  
PT - Prototype Tooling  
RR - Rapid Repair  
CMM - Koordinatna merilna naprava  
DAT - Digitalna aksialna tomografija  
CAM - Computer Aided Manufacturing  
POM - Polioksimetilen  
CAD - Computer Aided Design  
FDM - Fused Deposition Modeling  
VI - Vzratni inženiring  
RT - Rapid Tooling  
RP - Rapid Prototyping  
FFF - Fused Filament Fabrication  
RE - Reverse Engineering  
CT - Computed tomography  
CAE - Computer Aided Engineering  
CARE - Computer Aided Reverse Engineering  
CNC - Computer numerical control  
LOM - Sheet lamination  
AM - Additive manufacturing  
RM - Rapid Manufacturing  
DDM - Direct digital manufacturing  
PET-G - Polietilen tereftalat glikol  
ABS - Akrlonitril butadien stiren  
PA12 - Poliamid 12  
PLA - Polimlečna kislina  
TPU - Termoplastični poliuretan  
PVA - Polivinil alkohol  
PA - Poliamid  
FDMm - Fused deposition modeling of metals  
FDC - Fused deposition of ceramics  
WDM - Wax Deposition Modeling  
IM - Injection moulding  
MRI - Magnetna resonanca

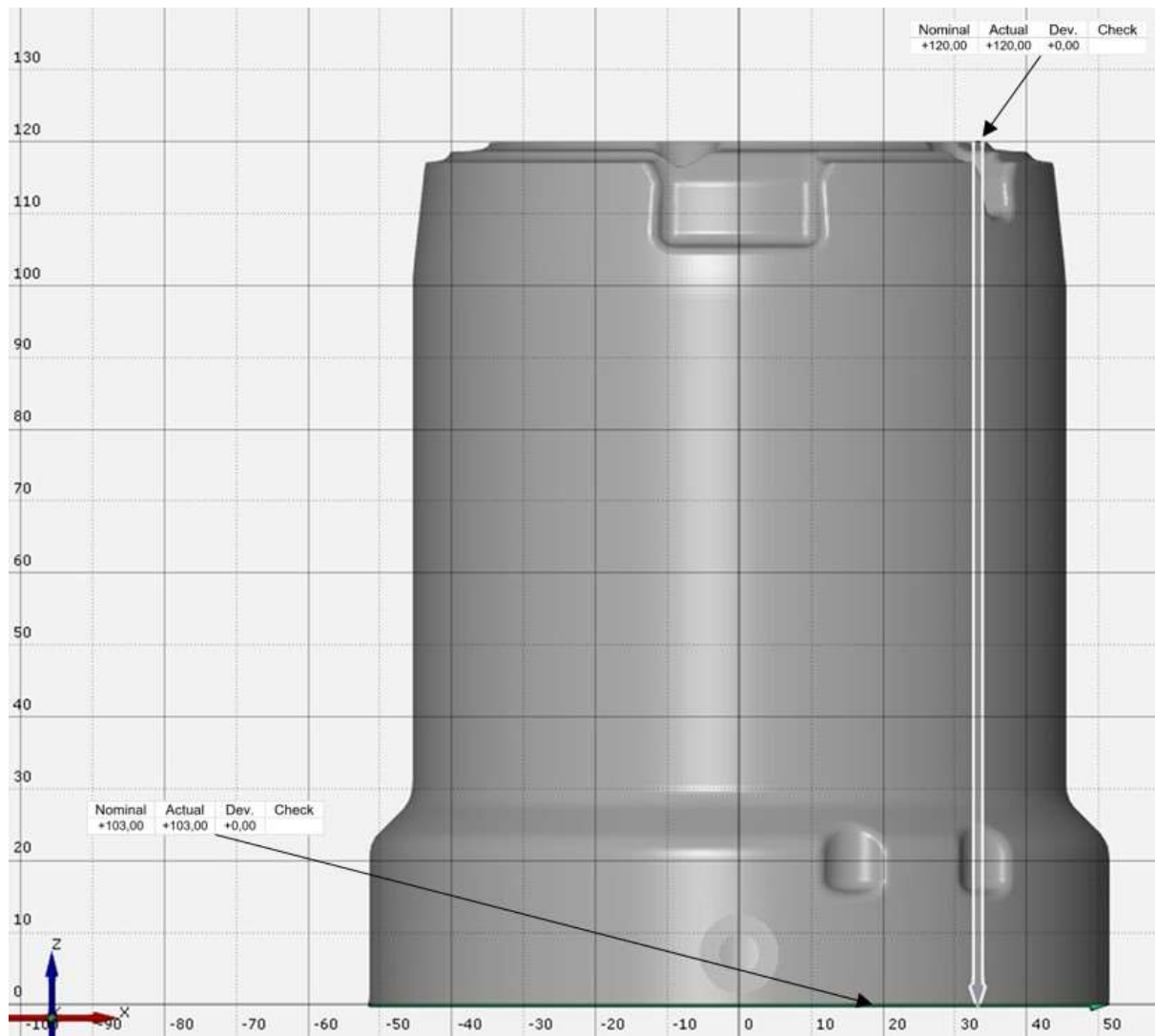
## **PRILOGE**

### **Priloga 1: Prikaz komponente med tiskanjem**



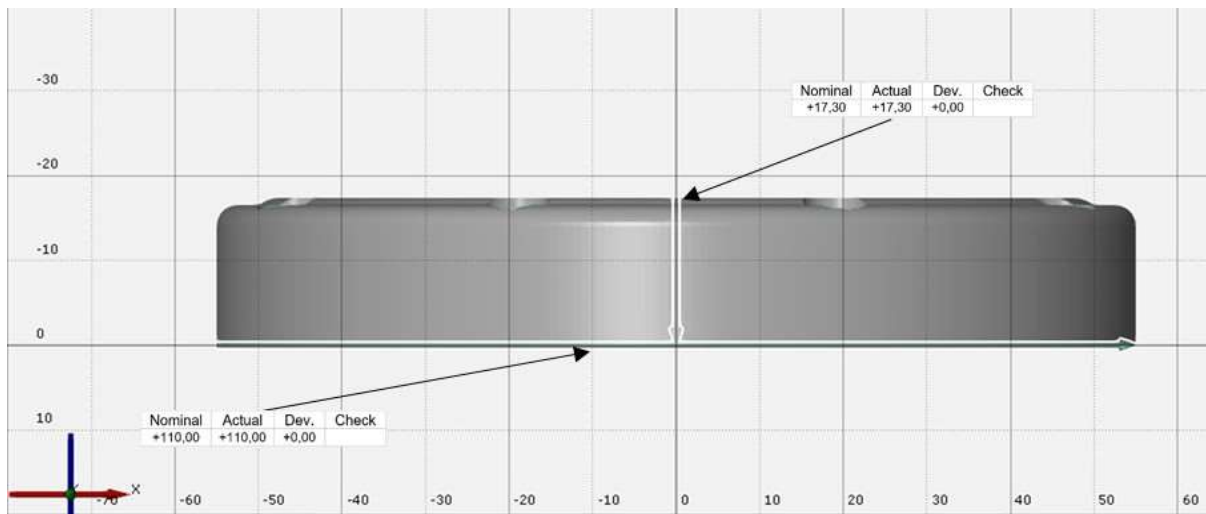
## Priloga 2: Proces raztapljanja podpornega materiala



**Priloga 3: Dimenzije (mm) komponente ležišče ohišja B12**



### Priloga 4: Dimenzije (mm) komponente obroč zatisni B12



### Priloga 5: Ponudba dobavitelja za izdelavo komponente ležišče ohišja B12, izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala

#### Ležišče ohišja B12

(material ABS črni porezkano iz enega kosa)

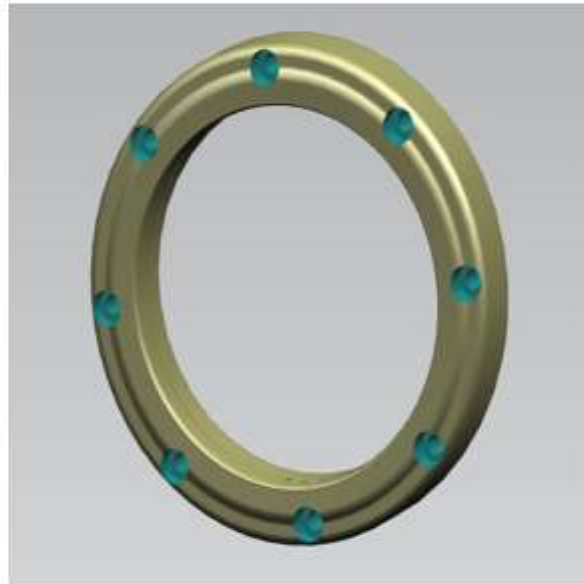


cena za kos ..... 285,00 €

**Priloga 6: Ponudba dobavitelja za izdelavo komponente obroč zatisni B12,  
izdelana s tehnologijami z odvzemanjem materiala**

**Obroč zatisni B12**

(material ABS črni porezkano iz enega kosa)



**cena za kos ..... 122,00 €**