

# Primjena aditivnih postupaka u automobilskej industriji

---

**Videršćak, Dalibor**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:057813>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dalibor Videršćak**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Dalibor Viderščak

Zagreb, 2018.

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

Najviše se zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović na ukazanom razumijevanju, odvojenom vremenu i strpljenju prilikom pomoći kod izrade ovog rada. Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Damiru Godecu na pomoći kod izrade modela kalupa i proračuna za injekcijsko prešanje te se zahvaljujem dr. sc. Petru Ilinčiću na pomoći oko odabira teme.

Zahvaljujem se Marku Veličkovu iz *Rimac Automobil*-a i Antunu Vručini iz *DOK-ING*-a na pomoći kod pisanja poglavlja o aditivnoj proizvodnji u Republici Hrvatskoj.

Zahvaljujem se svom prijatelju Marinu Holiju na pomoći kod izrade eksperimentalnog dijela. Također se zahvaljujem svim svojim prijateljicama i prijateljima koji su me na bilo koji način podržali u izradi ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj mami Valentini sestrama Maji i Davorki, te bratu Mariju, najboljem prijatelju Davoru te mojoj Melissi na bezuvjetnoj podršci tijekom mojeg studiranja.

Dalibor Videršćak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dalibor Videršćak** Mat. br.: 0035194056

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena aditivnih postupaka u automobilskoj industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Additive Manufacturing in Automotive Industry**

Opis zadatka:

Aditivni postupci su postupci izrade modela, prototipa, dijelova kalupa i alata i gotovih tvorevina komplicirane geometrije u kratkom vremenu. Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi proizvode tvorevine dodavanjem materijala sloj po sloj. Primjena aditivnih postupaka u automobilskoj industriji je 17 %, što zauzima vrlo visoko drugo mjesto od svih ostalih područja primjene.

U radu je potrebno načiniti pregled primjene aditivnih postupaka i polimernih materijala u automobilskoj industriji te navesti primjere tvorevina. U radu je zatim potrebno napraviti kratki osvrt na primjenu aditivnih postupaka u automobilskoj industriji u Republici Hrvatskoj.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je pomoću 3D računalnog programa modelirati različite verzije određenih dijelova modela vozila te time pokazati fleksibilnost primjene aditivnih postupaka u konstrukciji i vremenu izrade. Na kraju je potrebno pomoću odgovarajućeg aditivnog postupka izraditi model vozila s pripadajućim dijelovima.

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

Zadatak zadan:  
16. studenog 2017.

Datum predaje rada:  
18. siječnja 2018.

Predvideni datum obrane:  
24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:

*Ana Pilipović*  
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:

*Biserka Runje*  
Prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| POPIS SLIKA .....   | I    |
| POPIS TABLICA.....  | IV   |
| POPIS KRATICA I OZNAKA .....  | V    |
| SAŽETAK.....  | VII  |
| SUMMARY .....   | VIII |
| 1. UVOD.....  | 1    |
| 1.1. Povijesni razvoj aditivne proizvodnje.....   | 1    |
| 1.2. Aditivna proizvodnja.....  | 2    |
| 1.3. Načela aditivne proizvodnje.....   | 5    |
| 1.4. Postupci aditivne proizvodnje .....  | 7    |
| 1.4.1. Aditivna proizvodnja polimernih proizvoda .....                                      | 9    |
| 1.4.2. Aditivna proizvodnja metalnih proizvoda .....  | 13   |
| 2. ADITIVNA PROIZVODNJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI .....                                    | 17   |
| 2.1. Model prilagodbe aditivnih postupaka u automobilsku industriju.....                    | 19   |
| 2.2. Utjecaj aditivne proizvodnje na opskrbni lanac i varijante proizvoda.....              | 21   |
| 2.3. Upotreba aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji .....                         | 23   |
| 2.3.1. Prednosti aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji .....                      | 25   |
| 2.3.2. Način kako će aditivna proizvodnja promijeniti automobilsku industriju.....          | 26   |
| 2.4. Aditivna proizvodnja u automobilskoj industriji .....                                  | 27   |
| 2.4.1. Primjeri automobila izrađenih AM postupcima.....                                     | 28   |
| 2.5. Materijali i postupci aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji.....             | 35   |
| 2.6. Uobičajena primjena AM u automobilskoj industriji .....                                | 43   |
| 2.6.1. Primjeri suradnje u automobilskoj industriji.....                                    | 53   |
| 3. ADITIVNA PROIZVODNJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI U HRVATSKOJ ..                           | 55   |
| 3.1. <i>DOK-ING</i> .....   | 55   |
| 3.1.1. Aditivna proizvodnja u <i>DOK-ING</i> .....  | 55   |
| 3.2. <i>Rimac Automobili</i> .....  | 61   |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO .....  | 63   |
| 4.1. Izrada dijelova.....   | 64   |
| 4.2. Modeli automobila nakon ugradnje izrađenih dijelova.....                               | 69   |
| 4.3. Pogreške kod modeliranja i proizvodnje dijelova.....                                   | 72   |
| 4.4. Troškovi aditivne proizvodnje i injekcijskog prešanja upotrebom 3D tiskanog alata..... | 74   |
| 5. ZAKLJUČAK.....   | 79   |
| 6. LITERATURA .....   | 80   |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1.1. Povijesni razvoj tehnologija.....   | 2  |
| Slika 1.2. Usporedba konvencionalnih postupaka s aditivnim postupcima.....                                 | 3  |
| Slika 1.3. Područja primjene u 2015. godini: a) područja primjene, b) primjena aditivnih<br>tvorevina..... | 4  |
| Slika 1.4. Primjena aditivne proizvodnje.....  | 4  |
| Slika 1.5. Gradnja sloj po sloj: a) 3D model, b) slaganje 2D slojeva, c) slojeviti proizvod.....           | 5  |
| Slika 1.6. Faze aditivne proizvodnje.....  | 6  |
| Slika 1.7. Tvorevina: a) 3D model, b) STL datoteka.....  | 6  |
| Slika 1.8. Tok podataka u aditivnoj proizvodnji.....   | 7  |
| Slika 1.9. Postupak stereolitografije (SLA).....   | 9  |
| Slika 1.10. Postupak 3D tiskanja (3DP).....  | 10 |
| Slika 1.11. Postupak ispisivanja mlazom fotopolimera (PolyJet).....  | 10 |
| Slika 1.12. Postupak taložnog očvršćivanja (FDM).....  | 11 |
| Slika 1.13. Postupak proizvodnje laminiranih objekata (LOM).....   | 12 |
| Slika 1.14. Postupak selektivnog laserskog srašćivanja (SLS).....  | 12 |
| Slika 1.15. Postupak selektivnog laserskog taljenja (SLM).....   | 13 |
| Slika 1.16. Postupak 3D tiskanja metala (postupak ProMetal).....   | 14 |
| Slika 1.17. Postupak izravnog taloženja metala (LENS).....   | 14 |
| Slika 1.18. Postupak taljenja s pomoću snopa elektrona (EBM).....  | 15 |
| Slika 1.19. Postupak izravnog taloženja metalnog praha (DMD).....  | 16 |
| Slika 2.1. Tijek razvoja aditivnih postupaka u automobilskoj industriji.....                               | 18 |
| Slika 2.2. Model prilagodbe aditivnih postupaka u automobilskoj industriji.....                            | 19 |
| Slika 2.3. Četiri smjera promjene u poslovnom modelu proizvođača automobila.....                           | 21 |
| Slika 2.4. Usporedba opskrbnih lanaca.....   | 24 |
| Slika 2.5. Prezencijski modeli izrađeni različitim AM postupcima.....                                      | 25 |
| Slika 2.6. Prikaz primjena AM postupaka kod proizvodnje automobila.....                                    | 27 |
| Slika 2.7. <i>Shelby Cobra 56</i> .....  | 29 |
| Slika 2.8. <i>Strati</i> .....   | 29 |
| Slika 2.9. <i>Blade</i> .....  | 30 |
| Slika 2.10. <i>Light Cocoon</i> .....  | 30 |
| Slika 2.11. <i>Lotus 340R</i> .....  | 31 |
| Slika 2.12. <i>Light Rider</i> .....   | 31 |
| Slika 2.13. <i>LM3D</i> .....  | 32 |
| Slika 2.14. <i>Dagger</i> .....  | 32 |
| Slika 2.15. <i>StreetScooter C-16</i> .....  | 33 |
| Slika 2.16. <i>PUV (Printed Utility Vehicle)</i> .....   | 33 |
| Slika 2.17. <i>Olli</i> .....  | 34 |
| Slika 2.18. <i>Urbee</i> .....   | 34 |
| Slika 2.19. <i>NTU Venture 8</i> .....   | 35 |
| Slika 2.20. Usporedba: a) tradicionalne proizvodnje i b) aditivne proizvodnje.....                         | 36 |
| Slika 2.21. Zaštitno kućište baterije električne formule iz PA12 materijala (postupak SLS).....            | 39 |
| Slika 2.22. Upravljačka konzola automobila (postupak PolyJet).....   | 39 |
| Slika 2.23. Kanali klimatizacije automobila (postupak SLS).....  | 40 |
| Slika 2.24. Prednji branik automobila (postupak SLA).....  | 40 |
| Slika 2.25. Nosač alternatora (postupak SLS).....  | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.26. Ovjes kotača (postupak DMLS).....   | 41 |
| Slika 2.27. Okvir upravljačke ploče (postupak PolyJet) .....  | 42 |
| Slika 2.28. Posebno dizajnirano prednje svjetlo motocikla (postupak SLS) .....  | 42 |
| Slika 2.29. Dijelovi ispušnog sustava: a.) nastavak ispušne cijevi, b.) ispušni sustav formule, c.) ispušni sustav komplicirane geometrije, d.) ispušni sustav prilagođenog oblika .....  | 44 |
| Slika 2.30. Dijelovi aerodinamike: a.) krilce (FDM – ULTEM 9085), b.) aerodinamički tunel formule (SLA), c.) prednje krilo formule (SLS) .....  | 45 |
| Slika 2.31. Pumpni sustavi: a.) kućište vodene pumpe (PolyJet) uz kombinaciju s dijelom izrađenim klasičnim postupkom, b.) pumpa vode (SLM), c.) kućište pumpe za ulje, d.) rotor vodene pumpe, e.) kućište pumpe .....                                 | 45 |
| Slika 2.32. Konzole i sjedala: a.) aluminijski okvir sjedala, b.) potpuna kontrolna konzola, c.) upravljačka konzola (SLA), d.) polimerno sjedalo automobila i struktura (SLS), e.) središnja konzola (SLA) .....                                       | 46 |
| Slika 2.33. Dijelovi kočionog sustava: a.) pedale formule smanjene mase (SLM – Ti64), b.) disk kočnice (SLM), c.) držač kočnice.....  | 46 |
| Slika 2.34. Dijelovi podvozja: a.) čvorište karoserije (SLM), b.) cijela karoserija, c.) spojnica podvozja, d.) razdjelnik (SLS), e.) prednja vilica motora .....   | 47 |
| Slika 2.35. Alati i kalupi: a.) kalup za kućište spojke, b.) kalup za gume, c.) prilagođeni alat, d.) alat za montažu (FDM) .....   | 48 |
| Slika 2.36. Dijelovi usisnih sustava: a.) usisnik zraka motora, b.) usisnik zraka automobila (FDM – ULTEM 9085), c.) vanjski usisnik zraka, d.) prilagođeni usisni razvodnik (SLS), e.) usisnik zraka formule (SLS), f.) usisni razvodnik .....         | 49 |
| Slika 2.37. Gume i naplatci: a.) model gume (PolyJet), b.) automobilski naplatak (PolyJet) .  | 49 |
| Slika 2.38. Nosači svjetla: a.) nosač prednjeg svjetla (PolyJet), b.) Nosač svjetla protiv magle (PolyJet), c.) nosač prednjeg svjetla (SLS) .....  | 50 |
| Slika 2.39. Različiti prototipovi: a.) dijelovi motora (FDM - PC), b.) blok motora (FDM), c.) ugrađeni prototip motora (FDM), d.) kompletan prototip motora motocikla (FDM), e.) prototip kvačila (FDM), f.) prototip prijenosa, g.) prototip prijenosa | 51 |
| Slika 2.40. Prototip kvake automobila : a.) prototip (FDM), b.) konačan proizvod .....  | 51 |
| Slika 2.41. Dijelovi motora: a.) kućište uljnog filtera, b.) ispušni razvodnik , c.) kućište mjenjača, d.) klip motora, e.) turbo punjač motora .....   | 52 |
| Slika 2.42. Ostalo: a.) zaštita vozača u sportskim automobilima (FDM – PC), b.) retrovizor (SLS), c.) prednje svjetlo automobila (SLA), d.) izmjenjivač topline (SLM) .....   | 53 |
| Slika 3.1. <i>DOK-ING – EOSINT P385</i> .....   | 56 |
| Slika 3.2. Prezentacijski modeli izrađeni SLS-om.....   | 56 |
| Slika 3.3. Dijelovi podvozja.....   | 57 |
| Slika 3.4. Prednji i zadnji nosači za svjetla (neobrađeni).....   | 58 |
| Slika 3.5. Ugrađena prednja svjetla (nosači) kod različitih modela.....   | 58 |
| Slika 3.6. Ugrađeno stražnje svjetlo.....   | 59 |
| Slika 3.7. Kutije elektronike.....  | 59 |
| Slika 3.8. <i>DOK-ING LOOX</i> .....  | 60 |
| Slika 3.9. Nosač prednjeg svjetla .....   | 61 |
| Slika 3.10. Nosač zadnjeg svjetla.....  | 62 |
| Slika 3.11. Dijelovi kućišta elektronike .....  | 62 |
| Slika 4.1. <i>Ferrari 250 LM</i> .....  | 63 |
| Slika 4.2. <i>Ferrari 456 GT</i> .....  | 63 |
| Slika 4.3. <i>Ferrari 250 GT</i> – početno stanje.....  | 64 |
| Slika 4.4. <i>Ferrari 456 GT</i> – početno stanje.....  | 64 |



|   |    |
|---|----|
| Slika 4.5. Modeli dijelova za <i>Ferrari 250 LM</i> : a) naplatak s gumom, b) prednje svjetlo, c) zadnji spojler, d) retrovizor, e) krovni spojler, f) zadnja maska, g) prednja maska, h) zadnje svjetlo..... | 66 |
| Slika 4.6. Modeli dijelova za <i>Ferrari 456 GT</i> : a) naplatak s gumom, b) zadnje svjetlo, c) prednje maglenke, d) prednja maska, e) auspuh, f) krovni spojler .....                                       | 66 |
| Slika 4.7. Treći model naplatka i gume za oba tipa automobila: a) 3D CAD model, b) 3D tiskani model .....   | 67 |
| Slika 4.8. Držać baterija .....   | 67 |
| Slika 4.9. Orijehtacija dijelova .....  | 68 |
| Slika 4.10. Dijelovi tijekom izrade na radnoj podlozi stroja.....   | 68 |
| Slika 4.11. <i>Ferrari 250 LM</i> – nakon ugradnje dijelova .....   | 69 |
| Slika 4.12. <i>Ferrari 456 GT</i> – nakon ugradnje dijelova .....   | 69 |
| Slika 4.13. Ugrađene baterije za rasvjetu .....   | 70 |
| Slika 4.14. Držać baterija .....  | 70 |
| Slika 4.15. Automobili s ugrađenim svjetlima .....  | 71 |
| Slika 4.16. Prozirni poklopac svjetla.....  | 71 |
| Slika 4.17. Greška: debljina gume – lijeva je pogrešna, desna je smanjena i prilagođena debljina .....  | 72 |
| Slika 4.18. Pogrešan oblik i dimenzije prednje maske – kronološki slijed konstruiranja.....   | 72 |
| Slika 4.19. Nedovoljna duljina nosača zadnjeg spojlera .....  | 73 |
| Slika 4.20. Pogrešna orijentacija na radnoj podlozi stroja .....  | 73 |
| Slika 4.21. Modeli dijelova kalupa za injekcijsko prešanje: a) pomični dio, b) nepomični dio .....  | 76 |
| Slika 4.22. Modeli dijelova kalupa na radnoj podlozi stroja.....  | 76 |
| Slika 4.23. Tri modela naplatka na radnoj podlozi .....   | 77 |
| Slika 4.24. 50 kompleta različitih naplatka na radnoj podlozi .....   | 78 |

**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1.1. Materijali u aditivnoj proizvodnji za pojedine postupke.....            | 8  |
| Tablica 2.1. Modeli i proizvođači motornih vozila proizvedenih AM postupcima .....   | 28 |
| Tablica 2.2. Primjeri najčešće AM primjene u automobilskoj industriji .....          | 38 |
| Tablica 2.3. Ostali primjeri upotrebe AM u automobilskoj industriji.....             | 43 |
| Tablica 4.1. Troškovi aditivne proizvodnje svih dijelova .....                       | 74 |
| Tablica 4.2. Troškovi izrade tri modela naplatka i guma .....                        | 75 |
| Tablica 4.3. Troškovi aditivne proizvodnje pomičnog i nepomičnog dijela kalupa ..... | 75 |
| Tablica 4.4. Troškovi aditivne proizvodnje sva tri modela naplatka automobila .....  | 77 |

## POPIS KRATICA I OZNAKA

| <b>Kratice</b> | <b>Opis</b>   |
|----------------|---|
| 2D             | Dvodimenzionalno  |
| 3DP            | Trodimenzionalno tiskanje (e. <i>3D printing</i> )  |
| 3D             | Trodimenzionalno  |
| ABS            | Akilonitril/butadien/stiren   |
| AM             | Aditivna proizvodnja, aditivni postupci (e. <i>Additive Manufacturing</i> )                 |
| AMF            | Datoteka modela pri primjeni za aditivne postupke (e. <i>Additive Manufacturing File</i> )  |
| CAD            | Konstruiranje pomoću računala (e. <i>Computer Aided Design</i> )                            |
| DLP            | Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. <i>Digital Light Processing</i> ) |
| DMD            | Izravno taloženje metalnog praha (e. <i>Direct Metal Deposition</i> )                       |
| DMLS           | Izravno lasersko srašćivanje metala (e. <i>Direct Metal Laser Sintering</i> )               |
| EBM            | Taljenje s pomoću snopa elektrona (e. <i>Electron Beam Melting</i> )                        |
| EP             | Epoksidna smola   |
| FDM            | Taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i> )                                 |
| IMLS           | Posredno lasersko srašćivanje metala (e. <i>Indirect Metal Laser Sintering</i> )            |
| LENS           | Izravno taloženje metala (e. <i>Laser Engineering Net Shaping</i> )                         |
| LOM            | Proizvodnja laminiranih objekata (e. <i>Laminated Object Manufacturing</i> )                |
| PA             | Poliamid  |

---

|         |  |
|---------|--|
| PA 12   | Poliamid na osnovi dodekanske kiseline                                 |
| PC      | Polikarbonat   |
| PE      | Polietilen   |
| PE-HD   | Polietilen visoke gustoće  |
| PE-LD   | Polietilen niske gustoće   |
| PLA     | Poliaktid  |
| PMMA    | Poli(metil-metakrilat)   |
| PolyJet | Ispisivanje mlazom fotopolimera  |
| PP      | Polipropilen   |
| PPSU    | Poli(fenilen-sulfon)   |
| PS      | Polistiren   |
| PVC     | Poli(vinil-klorid)   |
| RM      | Brza (izravna) proizvodnja (e. <i>Rapid Manufacturing</i> )            |
| RP      | Brza proizvodnja prototipova (e. <i>Rapid Prototyping</i> )            |
| RT      | Brza proizvodnja kalupa i alata (e. <i>Rapid Tooling</i> )             |
| SLA/SL  | Stereolitografija (e. <i>Stereolithography</i> )                       |
| SLM     | Selektivno lasersko taljenje (e. <i>Selective Laser Melting</i> )      |
| SLS     | Selektivno lasersko srašćivanje (e. <i>Selective Laser Sintering</i> ) |
| .STL    | Triangulizacijska datoteka (e. <i>Standard Tessellation Language</i> ) |
| UV      | Ultravioletno zračenje   |

## SAŽETAK

Aditivna proizvodnja u automobilskoj industriji s udjelom od 17 % zauzima visoko drugo mjesto u područjima primjene. Svakim danom aditivni postupci se sve više i više primjenjuju te se predviđa da će aditivna proizvodnja u automobilskoj industriji biti bitan dio proizvodnog procesa. Postoje različite tehnologije, ali trenutno su najviše u primjeni postupci za polimerne materijale: stereolitografija (SLA), 3D tiskanje (3DP), selektivno lasersko srašćivanje (SLS), taložno očvršćivanje (FDM) i ispisivanje mlazom fotopolimera (PolyJet), te postupci za metalne materijale: selektivno lasersko taljenje (SLM), izravno taloženje metala (LENS) i izravno taloženje metalnog praha (DMD).

U ovom radu će najprije biti prikazani aditivni postupci koji se upotrebljavaju kod izrade polimernih i metalnih tvorevina. Nakon toga će biti prikazan pregled primjene aditivnih postupaka u automobilskoj industriji te razlozi primjene tih postupaka u automobilskoj industriji.

Naposljetku, u eksperimentalnom dijelu, bit će prikazana fleksibilnost aditivne proizvodnje na primjeru izrade dijelova za dva modela automobila koji će se montirati umjesto originalnih dijelova. Dijelovi za eksperimentalni dio bit će izrađeni postupkom ispisivanja mlazom fotopolimera (PolyJet) na stroju *Connex 350* tvrtke *Stratasys*.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, automobilska industrija, *Connex 350*, ispisivanje mlazom fotopolimera (PolyJet), metalni materijali, polimerni materijali

## SUMMARY

Additive manufacturing in automotive industry takes high second place in area of application with 17 %. Every day additive manufacturing continuously develop and it is assumed that it will be important part of production process in automotive industry. There are many different technologies, but in application most in use are processes for polymer materials: stereolithography (SLA), 3D printing (3DP), selective laser sintering (SLS), fused deposition modeling (FDM) and PolyJet, and processes for metal materials: selective laser melting (SLM), laser engineering net shaping (LENS) and direct metal deposition (DMD).

In this master thesis first will be reviewed additive procedures used in production of polymer and metal products. Then follows application review of additive procedures in automotive industry and benefits of using it in automotive industry.

Lastly, in experimental part, is shown flexibility of additive manufacturing through example of making parts for two car models which are installed instead of original parts. Parts in experimental section will be produced with PolyJet technology on machine *Connex 350* from *Stratasys*.

Key words: additive manufacturing, automotive industry, *Connex 350*, PolyJet, metal materials, polymer materials

## 1. UVOD

### 1.1. Povijesni razvoj aditivne proizvodnje

Brza proizvodnja prototipova (e. *Rapid Prototyping – RP*) počela se razvijati 1980-ih godina i samo se upotrebljavala za izradu prototipova dok su se paralelno razvijali postupci brze proizvodnje kalupa (e. *Rapid Tooling – RT*) što su zajedno činili brzu proizvodnju (e. *Rapid Manufacturing - RM*). Prema normi ASTM F42 koja je donesena 2009. rabi se izraz aditivna proizvodnja (e. *Additive Manufacturing – AM*). [1]

Razvoj postupaka aditivne proizvodnje (AM) je započeo 1987. godine razvojem stereolitografije (e. *Stereolithography – SL/SLA*) u tvrtki *3D Systems* u SAD-u. Stereolitografija je omogućivala očvršćivanje kapljevitoeg fotopolimera osjetljivog na djelovanje UV zračenja u tankim slojevima s pomoću lasera. Tvrtke *3D Systems* i *Ciba-Geigy* su 1988. godine komercijalizirale prvu generaciju fotopolimera na osnovi akrila. [2, 3]

U SAD-u na *MIT* sveučilištu je 1989. godine razvijen postupak 3D tiskanja. Tvrtka *3D Systems* je nakon osam godina od izrade prvih strojeva za stereolitografiju načinila stroj za 3D tiskanje koji se zasnivao na nanošenju voska sloj po sloj primjenom principa inkjet postupka. Iste godine je tvrtka *Z Corp* razvila 3D printer *Z402* koji je radio prototipove od škroba, gipsa u obliku praha i kapljevutih veziva. [2]

Tijekom 1991. godine komercijalizirani su novi postupci aditivne proizvodnje, a to su: postupak očvršćivanja taloženjem (e. *Fused Deposition Modeling – FDM*) tvrtke *Stratasys* (SAD) i postupak laminiranja (e. *Laminated Object Manufacturing – LOM*) tvrtke *Helsys* (SAD). [3]

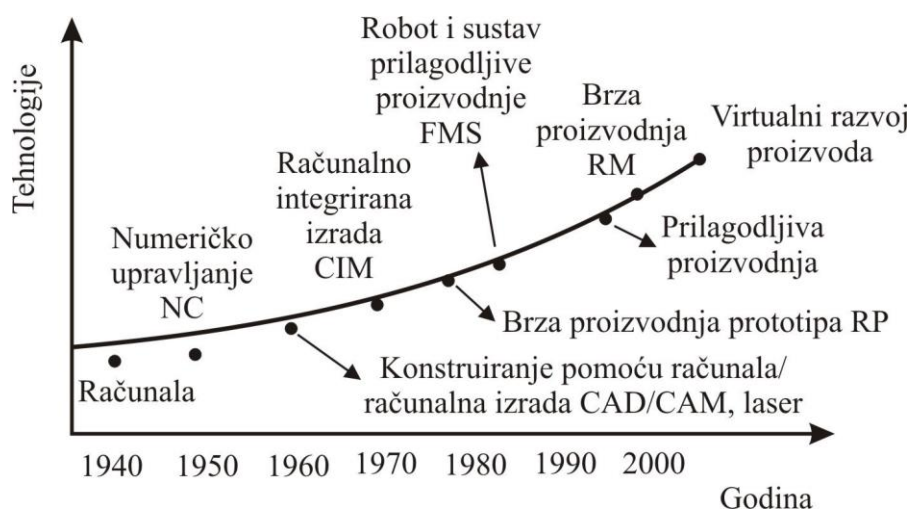
Tvrtka *DTM* (sada je u sastavu tvrtke *3D Systems*) je 1992. godine na tržište izbacila prvi sustav za selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering – SLS*). Bitno je spomenuti 1994. godinu kada je tvrtka *EOS* (Njemačka) komercijalizirala uređaj *EOSINT* za SLS postupak. [3]

Tvrtka *Optomec* (SAD) je 1998. godine komercijalizirala postupak taloženja metalnog praha s pomoću lasera (e. *Laser Engineered Net Shaping – LENS*) koji je razvijen u *Sandia National Labs*. [3]

Tvrtka *Extrude Hone* (SAD) je 1999. godine instalirala prvi *ProMetal* sustav koji se temeljio na inkjet postupku tiskanja metala dok je iste godine tvrtka *Fockele & Schwarze* (Njemačka)

predstavila prvi sustav temeljen na selektivnom laserskom taljenju metalnog praha (e. *Selective Laser Melting – SLM*). [3]

Nakon toga slijedi razvoj i proizvodnja različitih materijala i strojeva raznih tvrtki. Na slici 1.1 prikazan je povijesni razvoj proizvodnih tehnologija.



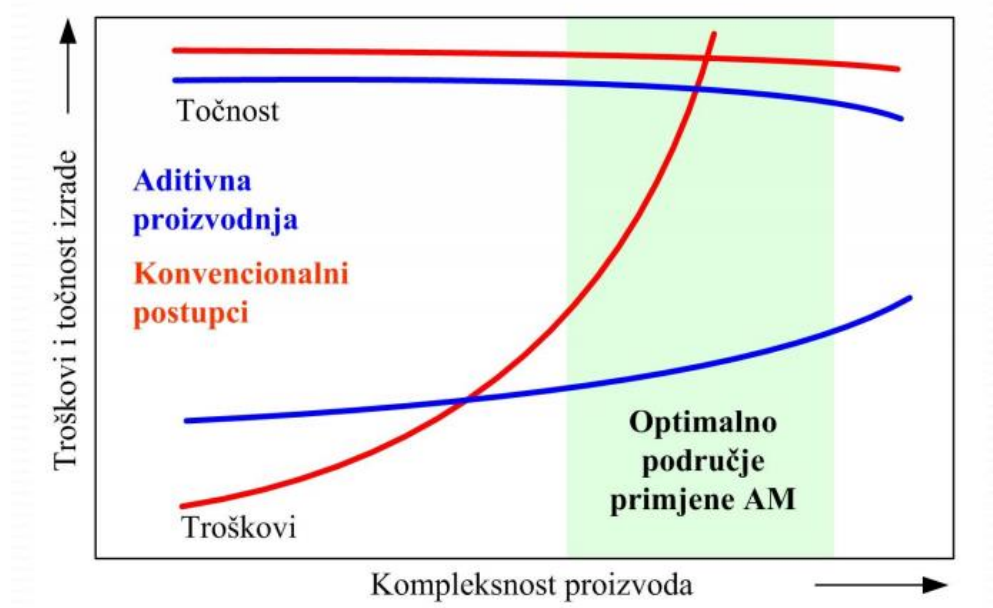
Slika 1.1. Povijesni razvoj tehnologija [2]

## 1.2. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja služi za izradu modela komplicirane geometrije, prototipova, dijelova kalupa i alata. Postoji puno različitih postupaka, ali najčešće se temelje na dodavanju materijala sloj po sloj. Glavna odlika aditivne proizvodnje je direktna proizvodnja izravno iz 3D CAD modela bez planiranja procesa, izrade kalupa itd. [2]

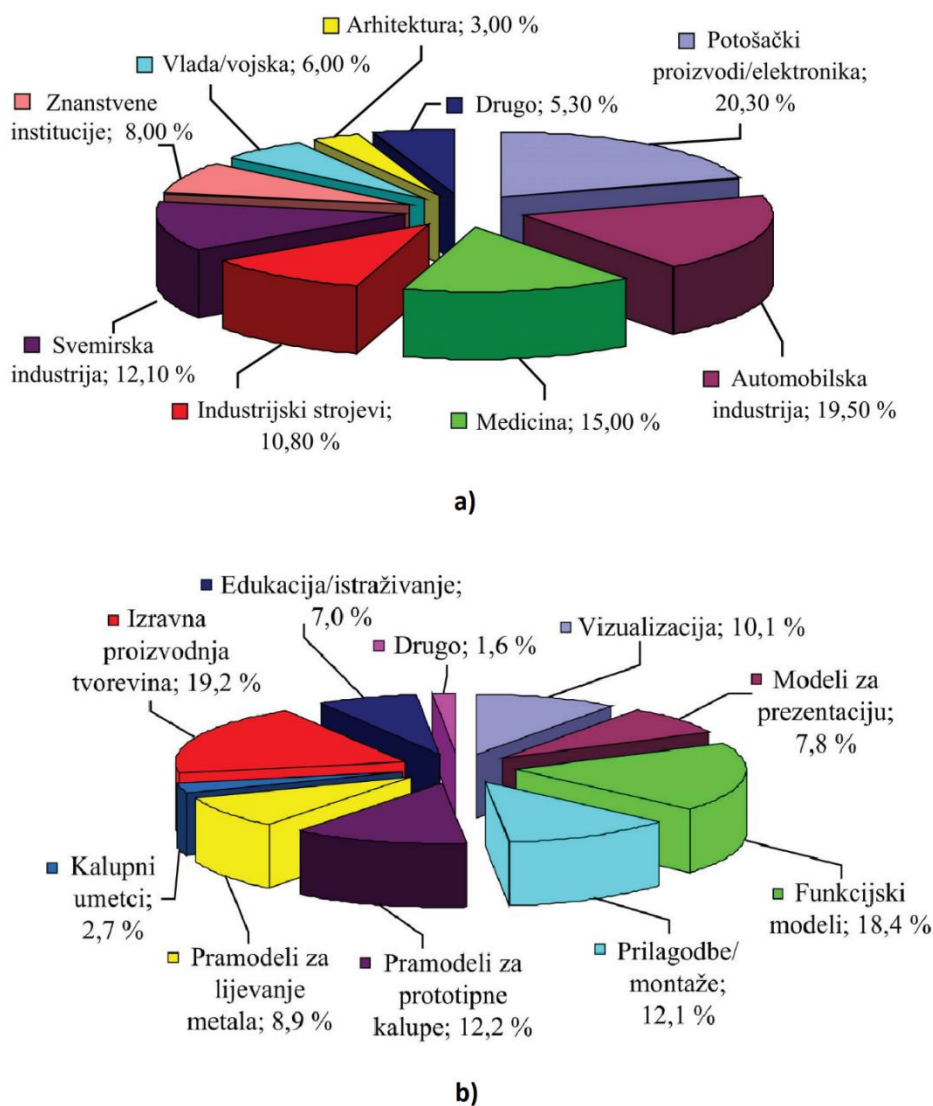
Suvremeni zahtjevi tržišta postavljaju ljestvicu razvoja i proizvodnje na sve višu razinu. Tu aditivna proizvodnja dolazi do izražaja. Kod konvencionalnih postupaka točnost je veća nego kod aditivnih postupaka, ali je velika razlika kod troškova. Stoga dolazimo do optimalnog područja primjene aditivne proizvodnje (slika 1.2). Aditivna proizvodnja se primjenjuje kod kompleksnih proizvoda zato jer tada troškovi konvencionalnih postupaka rastu višestruko. [3]



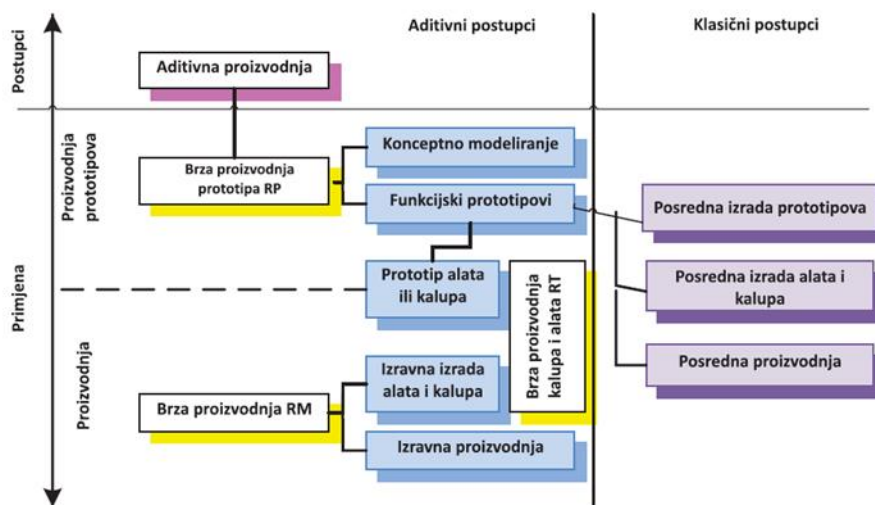


Slika 1.2. Usporedba konvencionalnih postupaka s aditivnim postupcima [3]

Područja primjene aditivne proizvodnje su mnoga (slika 1.3), a to su: automobilska industrija, zrakoplovna industrija, vojna industrija, strojogradnja, medicina, akademske ustanove, arhitektura i ostalo. [4] Mogućnosti primjene aditivne proizvodnje su razni, a prikazani su na slici 1.4.



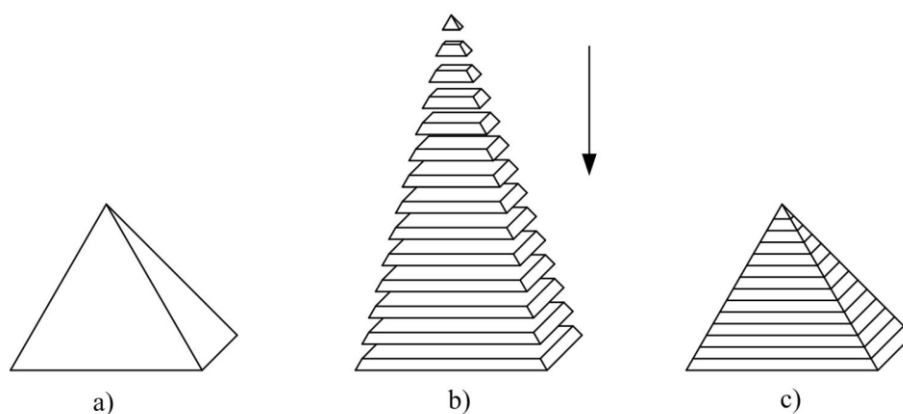
Slika 1.3. Područja primjene u 2015. godini: a) područja primjene, b) primjena aditivnih tvorevina [2]



Slika 1.4. Primjena aditivne proizvodnje [2]

### 1.3. Načela aditivne proizvodnje

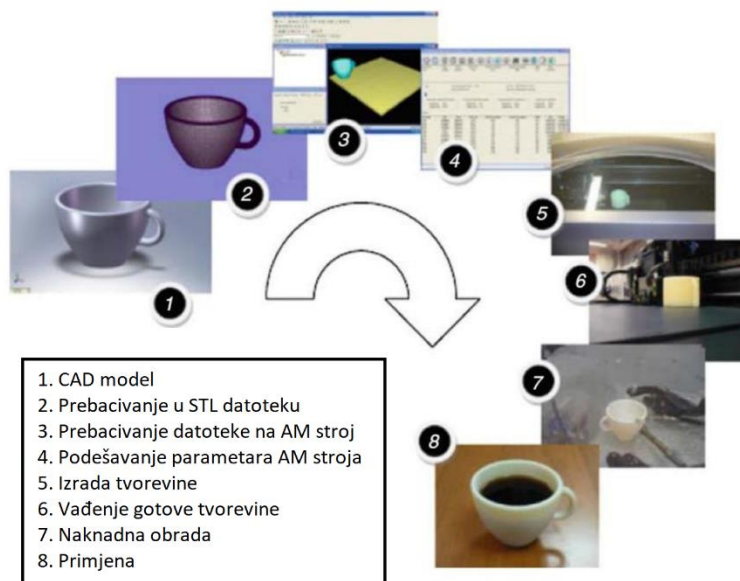
Aditivna proizvodnja se temelji na postupku gradnje sloj po sloj, odnosno slaganjem dvodimenzijskih (2D) slojeva jedan na drugi nastaje trodimenzijski (3D) oblik (slika 1.5).



Slika 1.5. Gradnja sloj po sloj: a) 3D model, b) slaganje 2D slojeva, c) slojeviti proizvod [4]

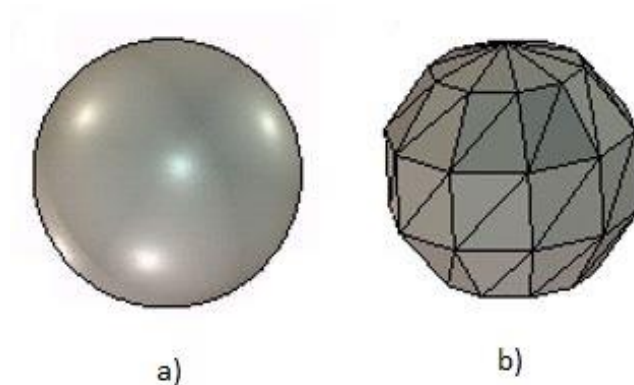
Načelo aditivne proizvodnje je uvijek isto neovisno o postupku, a dijeli se na sljedeće faze (slika 1.6) [2]:

1. Izrada 3D CAD modela
2. Pretvaranje 3D CAD modela u STL datoteku
3. Prebacivanje STL datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju
4. Podešavanje parametara stroja
5. Proizvodnja tvorevine
6. Vađenje gotove tvorevine
7. Naknadna obrada, ako je potrebna
8. Uporaba



Slika 1.6. Faze aditivne proizvodnje [2]

Postupak aditivne proizvodnje počinje izradom 3D CAD model. Takav model se sprema u STL datoteku (e. *Standard Tessellation Language*) koja model prikazuje kao mrežu povezanih trokuta (slika 1.7). STL datoteka ne podržava boje pa je 2009. godine uvedena AMF datoteka (e. *Additive Manufacturing File*) koja objekt opisuje pomoću raspoređenih vektora. Svaki objekt je opisan kao grupa nepreklopljenih volumena koji su opisani kao mreža trokuta koje povezuje grupu točaka. AMF datoteka podržava zadavanje opisa objektu, vrstu materijala i boje pojedinog volumena i trokuta u mreži. [2]

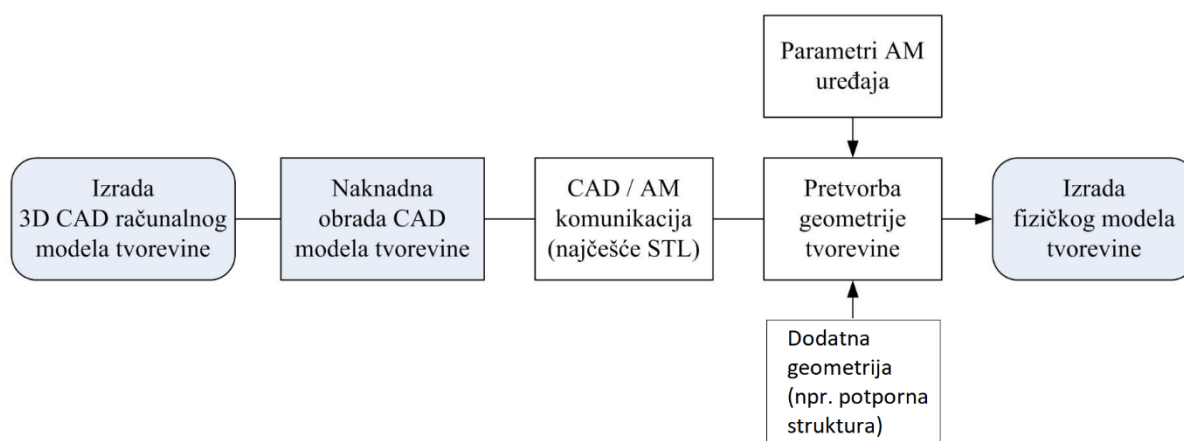


Slika 1.7. Tvorevina: a) 3D model, b) STL datoteka [5]

U nekim postupcima (npr. FDM, SLA, PolyJet) potrebno je izgraditi potpurnu strukturu oko donjeg oboda kako bi spriječili pomicanje tvorevine tijekom izrade. [2]

Nakon podešavanja parametara stroja (snaga, brzina, debljina sloja, itd.) slijedi izrada na aditivnom stroju te po završetku vađenje gotove tvorevine. Slijedi naknadna obrada koja ovisi o vrsti primijenjenog postupka (čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture, bojanje, brušenje, itd.). [2]

Tok podataka u aditivnoj proizvodnji je prikazan na slici 1.8.



Slika 1.8. Tok podataka u aditivnoj proizvodnji [4]

#### 1.4. Postupci aditivne proizvodnje

Postupci aditivne proizvodnje se primjenjuju za izradu raznih tvorevina od metala, keramike i polimera u obliku žica, kapljevine, praha, folija, itd. pa se dolazi do podjele prema vrsti materijala [2]:

1. Kruti materijali (npr. FDM, LOM)
2. Materijali u obliku praha (npr. SLS, 3D tiskanje)
3. Kapljevit materijali (npr. SLA, PolyJet)

Materijali koji se upotrebljavaju prilikom postupaka aditivne proizvodnje navedeni su u tablici 1.1.

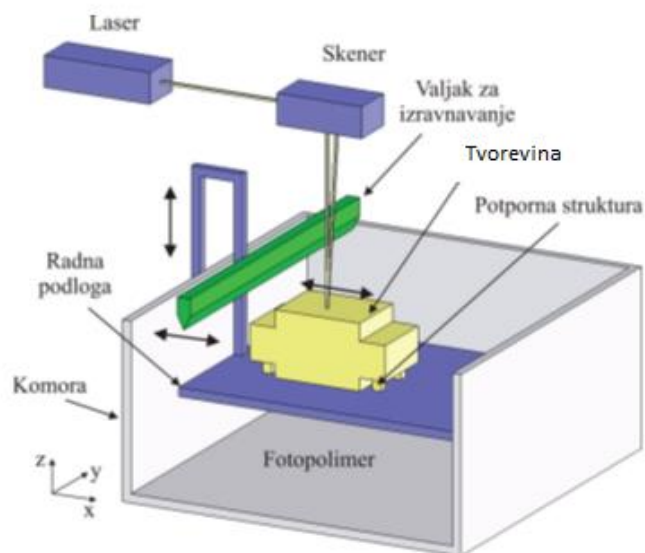
Tablica 1.1. Materijali u aditivnoj proizvodnji za pojedine postupke [2, 3, 7]

| Postupak  | Materijal   |
|---|---|
| Stereolitografija – SLA                                     | Fotoosjetljiva polimerna smola, akrilne i epoksidne smole (npr. PMMA, EP, PE-HD), keramika  |
| PolyJet   | Fotoosjetljiva smola  |
| Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom – DLP | Fotoosjetljiva polimerna smola  |
| Selektivno lasersko srašćivanje – SLS                       | polimeri (ABS, PC, PA, PS, PMMA), ojačani polimeri (npr. staklom), polimeri s raznim punilima, keramika, metali (nehrđajući čelici, legure aluminijske, titana)   |
| Izravno lasersko srašćivanje metala – DMLS                  | Čelici legirani s Ni, Cr, Mo, Si, V, nehrđajući čelici, maraging čelici, kobalt-krom legure (CoCrMo), niklove legure (NiCr22Mo9Nb), titanove legure (Ti6-Al4-V) i aluminijske legure (AlSi10Mg)                         |
| Posredno lasersko srašćivanje metala – IMLS                 | Nehrđajući čelici, bakar i njegove legure, aluminij i njegove legure  |
| Selektivno lasersko taljenje (SLM)                          | Nehrđajući čelici, visokolegirani čelici, legure aluminijske, titanove legure (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, NiTi, TiB) i čisti titan, kobalt-krom legure, Inconel legure, legure bakra, legure nikla i aluminijske (Cu-Ni-Al) |
| 3D tiskanje – 3DP   | Polimeri, keramika, škrob, gips, metali   |
| Taložno očvršćivanje – FDM                                  | Plastomeri (ABS, PE-HD, PE-LD, PP, PC, PPSU, PLA), keramika   |
| Proizvodnja laminiranih objekata – LOM                      | Polimeri u obliku folija (PVC), papir, metalne ploče i folije, kompoziti s epoksidnom matricom i staklenim ojačavalima  |
| Izravno taloženje metala – LENS                             | Nehrđajući čelici, alatni čelik, legure nikla, legure titana  |
| Izravno taloženje metalnog praha – DMD                      | Legure nikla, kobalta, titana, mangana, kroma   |
| Taljene pomoću snopa elektrona – EBM                        | Titan i njegove legure, volfram, niobij, tantal, platina, paladij, cirkonij, iridij, nikal, legure nikla  |

### 1.4.1. Aditivna proizvodnja polimernih proizvoda

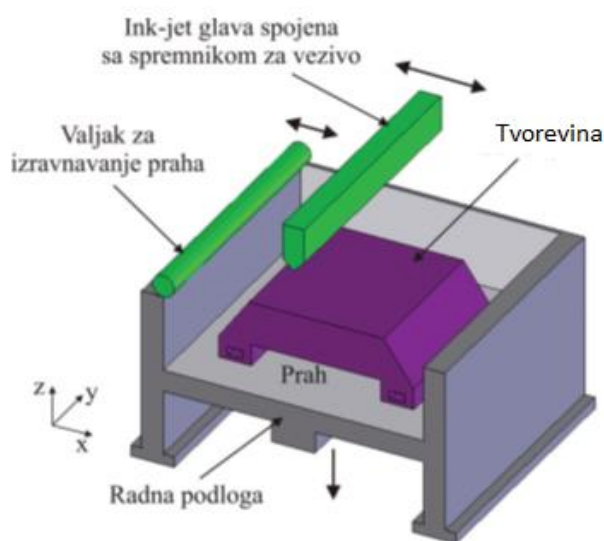
U aditivnoj proizvodnji se najčešće primjenjuju polimerni materijali pa ovisno prema vrsti materijala postoje različiti postupci: [2]

1. Stereolitografija (e. *Stereolithography – SLA*) – temelji se na fotopolimerizaciji. Fotopolimer se skrućuje kada je izložen izvoru elektromagnetske radijacije ( $\gamma$ -zrake, X-zrake, UV i elektronskim zrakama). [2] Najčešći oblik očvršćivanja je pomoću UV zraka. Laser emitira UV zrake i fotopolimer zadanog oblika i presjeka se skrućuje iznad radne podloge. Radna podloga se spušta za debljinu sloja i ponovo laser emitira UV zrake i ispisuje zadani oblik na skrućenom obliku. Tvorevina se vadi iz fotopolimera, a višak polimera se ispire u otapalu. [6] Postupak stereolitografije je prikazan na slici 1.9.



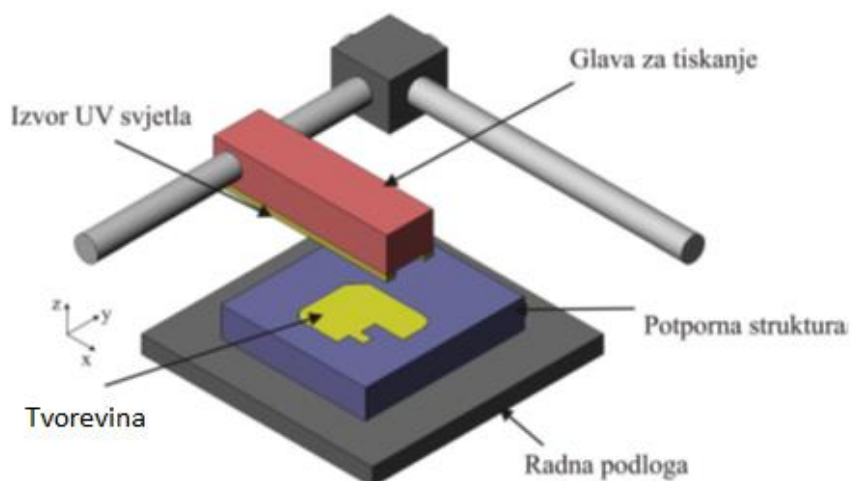
Slika 1.9. Postupak stereolitografije (SLA) [2]

2. 3D tiskanje (e. *3D Printing – 3DP*) – temelji se na tehnologiji ink – jet pisača. U 3D tiskanju se umjesto tinte izbacuje vezivo ili ljepilo. Po sloju definiranog praha glavom pisača se nanosi kapljevito vezivo u obliku zadanog presjeka koji uzrokuje prianjanje slojeva. Radna podloga se spušta za debljinu idućeg sloja te dolazi ponovo do nanošenja i definiranja sloja praha. Nakon izrade tvorevine, tvorevina se ostavlja određeno vrijeme u komori s prahom da postigne potrebnu čvrstoću, a zatim se vadi i pomoću zraka odstranjuje višak praha i dodatno očvršćivanje ljepilima. [2] Postupak 3D tiskanja je prikazan na slici 1.10.



Slika 1.10. Postupak 3D tiskanja (3DP) [2]

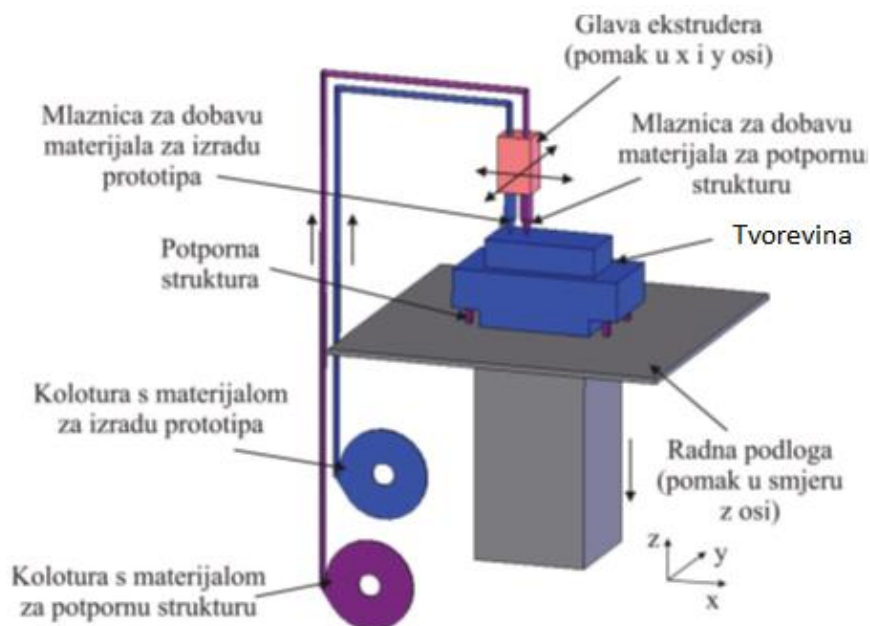
3. Ispisivanje mlazom fotopolimera - PolyJet – je hibridni postupak koji sjedinjuje dobre strane stereolitografije (SLA) i 3D tiskanja. Glava za tiskanje koja se sastoji od mreže mlaznica kliže naprijed – nazad i nanosi sloj fotoosjetljivog polimera na radnu podlogu. Svaki sloj fotopolimera očvršćuje pod djelovanjem UV zraka te odmah tvori potpuno umreženu strukturu bez potrebe za naknadnim umreženjem. Nakon završenog sloja radna podloga se spušta za debljinu sljedećeg sloja i postupak se ponavlja. [2] PolyJet postupak je prikazan na slici 1.11.



Slika 1.11. Postupak ispisivanja mlazom fotopolimera (PolyJet) [2]

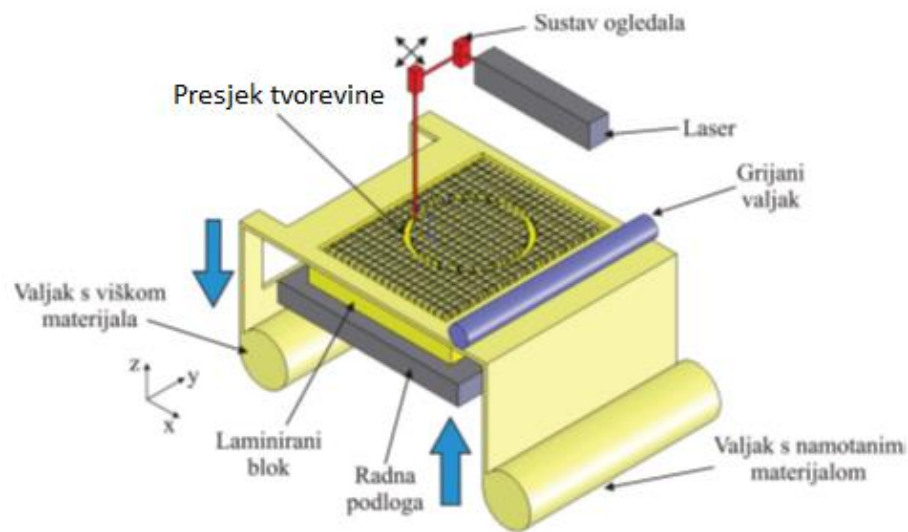


4. Taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling – FDM*) – temelji se na omekšavanju polimernog materijala koji u obliku filameta prolazi kroz mlaznicu smještenu na glavi ekstrudera. Izrađeni slojevi se hlade i skrućuju pri sobnoj temperaturi i tako se vežu za prethodni sloj. Kod složenijih geometrija se izrađuje potporna struktura zbog postizanja bolje završne površine. [6] Postupak taložnog očvršćivanja (FDM) prikazan je na slici 1.12.



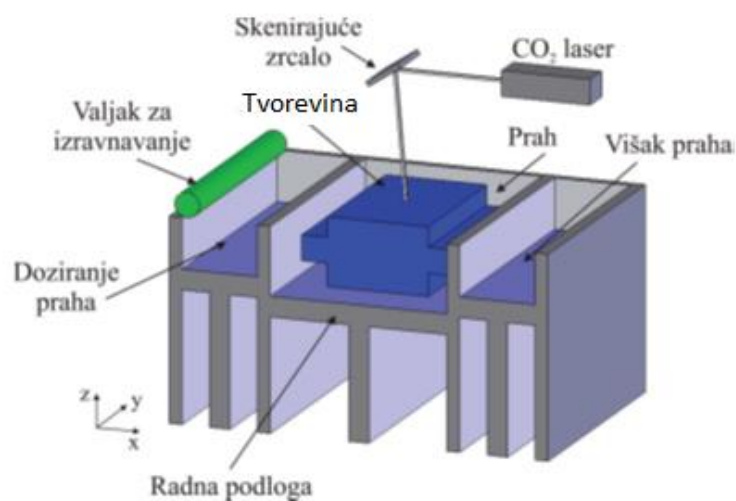
Slika 1.12. Postupak taložnog očvršćivanja (FDM) [2]

5. Proizvodnja laminiranih objekata (e. *Laminated Object Manufacturing – LOM*) – pomoću topline i tlaka svaka se ploča, papir ili folija spaja na blok i formira novi sloj. Materijal se dobavlja pomoću valjka na jednoj strani i odmotava do druge strane. Grijani valjak osigurava da se novi sloj lijepi na već izrađeni dio tvorevine. Nakon što se sloj staložio, laserskom zrakom se izrezuje dio materijala u oblik konačne tvorevine. [7] Postupak proizvodnje laminiranih objekata je prikazan na slici 1.13.



Slika 1.13. Postupak proizvodnje laminiranih objekata (LOM) [2]

6. Selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering – SLS*) – temelji se na srašćivanju praškastog materijala koji se zagrijava pomoću laserske zrake. Radna podloga je smještena na visini koja je potrebna da se položi sloj praškastog materijala i dobije željena debljina sloja. Sloj praha se skenira i grije laserskom zrakom te dolazi do međusobnog srašćivanja čestica materijala. Radna podloga se spušta za debljinu sljedećeg sloja. [2] Postupak selektivnog laserskog srašćivanja je prikazan na slici 1.14.

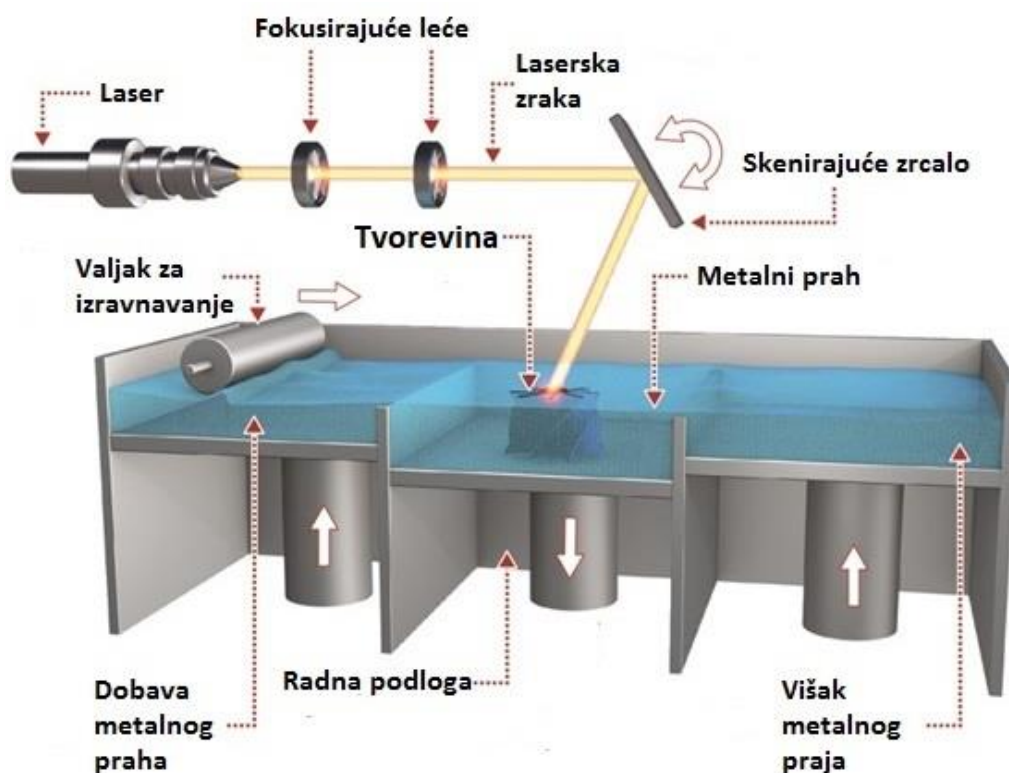


Slika 1.14. Postupak selektivnog laserskog srašćivanja (SLS) [2]

### 1.4.2. Aditivna proizvodnja metalnih proizvoda

Kod aditivne proizvodnje metalnih proizvoda najčešće se primjenjuju materijali u obliku praha ili folija i ploča. Najčešći postupci koji se primjenjuju su:

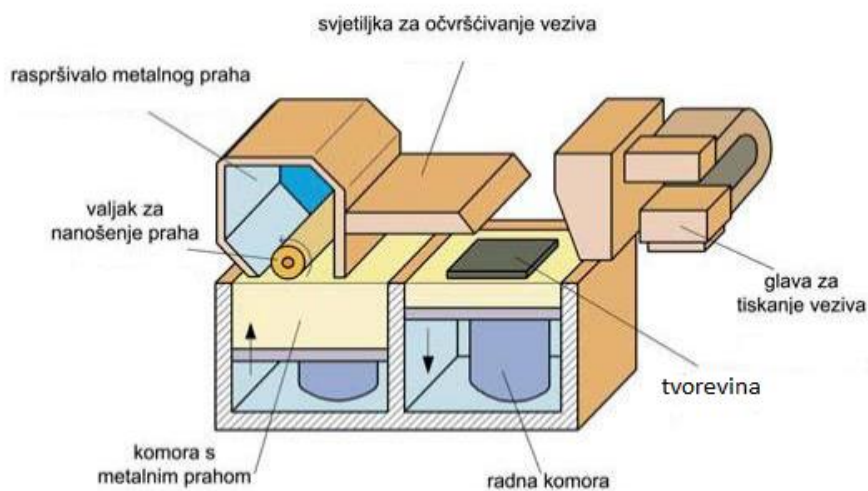
1. Selektivno lasersko srašćivanje metala (SLS) i selektivno lasersko taljenje (e. *Selective Laser Melting – SLM*) – najčešći postupci u aditivnoj proizvodnji metalnih tvorevina. Kod SLS postupka glavni pokretač povezivanja čestica praha je difuzija jedne čestice u drugu. SLM postupak je sličan SLS postupku samo što se pri SLM-u čestice prahova potpuno tale (ne srašćuju), što rezultira visokom gustoćom proizvoda. [3] Postupak SLM-a je prikazan na slici 1.15.



Slika 1.15. Postupak selektivnog laserskog taljenja (SLM) [8]

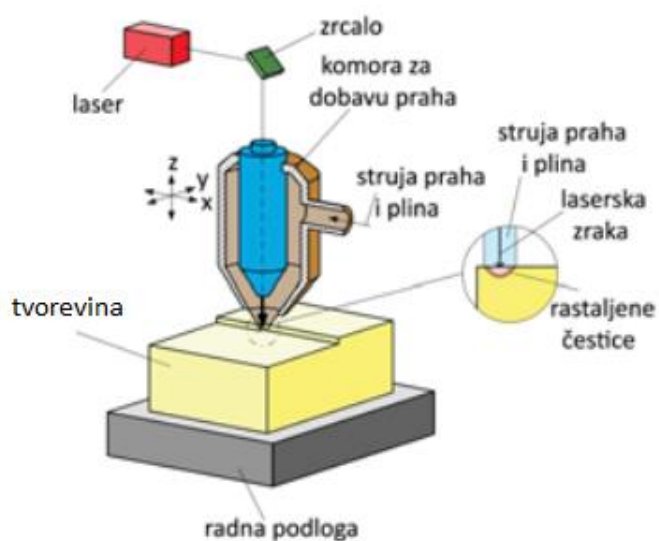
2. Proizvodnja laminiranih objekata (LOM) – postupak je isti kao i kod polimernih materijala samo je razlika u tome što se upotrebljavaju metalne folije i ploče. Postupak je isti kao i na slici 1.13.

3. 3D tiskanje metala (postupak ProMetal) – postupak se temelji na ink-jet tiskanju. Glava s mlaznicom se može gibati u smjeru osi x i y, a spremnik s metalnim prahom ispod kojeg je podloga koja omogućuje gibanje u smjeru osi z.



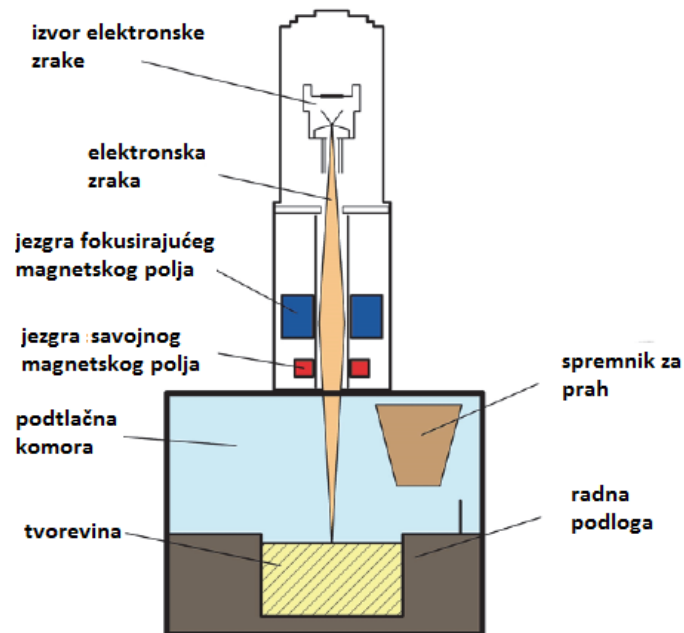
Slika 1.16. Postupak 3D tiskanja metala (postupak ProMetal) [3]

4. Izravno taloženje metala (e. *Laser Engineering Net Shaping – LENS*) – laserska zraka djeluje na vrlo usko područje površine, pri čemu nastaje lokalno rastaljeno područje. S pomoću mlaznice se dodaje točno određena količina novog praškastog materijala pri čemu nastaje novi sloj tvorevine. Postupak se odvija u podtlačnoj komori. [2,7] Postupak je prikazan na slici 1.17.



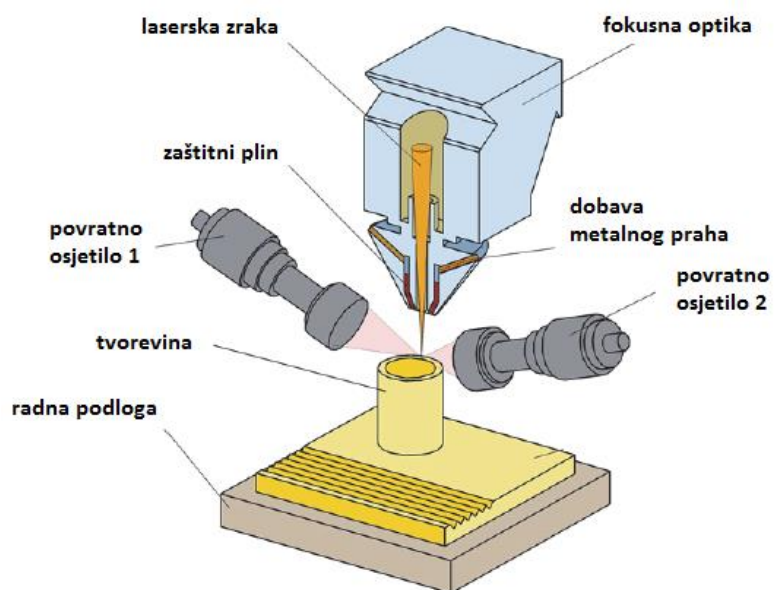
Slika 1.17. Postupak izravnog taloženja metala (LENS) [7]

5. Taljenje pomoću snopa elektrona (e. *Electron Beam Melting – EBM*) – tvorevina nastaje sloj po sloj taljenjem metalnog praha pomoću snopa elektrona koji se proizvodi pomoću posebne mlaznice koja se učvršćuje u komori. Pri sudaru elektrona s metalnim prahom, kinetička energija sudara se pretvara u toplinsku energiju što dovodi do lokalnog taljenja metalnog praha. Postupak se odvija u podtllačnoj komori. [7] Postupak je prikazan na slici 1.18.



Slika 1.18. Postupak taljenja s pomoću snopa elektrona (EBM) [7]

6. Iravno taloženje metalnog praha (e. *Direct Metal Deposition – DMD*) – postupak je sličan LENS postupku gdje je jedina razlika u detaljima oko upravljanja i uporabe uređaja za izradu metalnih tvorevina. Prednost postupka je mogućnost izrade tvorevine od više različitih materijala. [7] Postupak je prikazan na slici 1.19.



Slika 1.19. Postupak izravnog taloženja metalnog praha (DMD) [7]

## 2. ADITIVNA PROIZVODNJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Prema slici 1.4 može se primijetiti da je primjena aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji na visokom drugom mjestu. Iako se aditivna tehnologija uglavnom primjenjuje kod brze izrade prototipova i koncepata automobila, razvojem aditivnih postupaka dolazi do primjene kod izrade funkcionalnih dijelova, a u budućnosti bi se aditivni postupci mogli integrirati u proizvodni proces tj. u serijsku proizvodnju. [11]

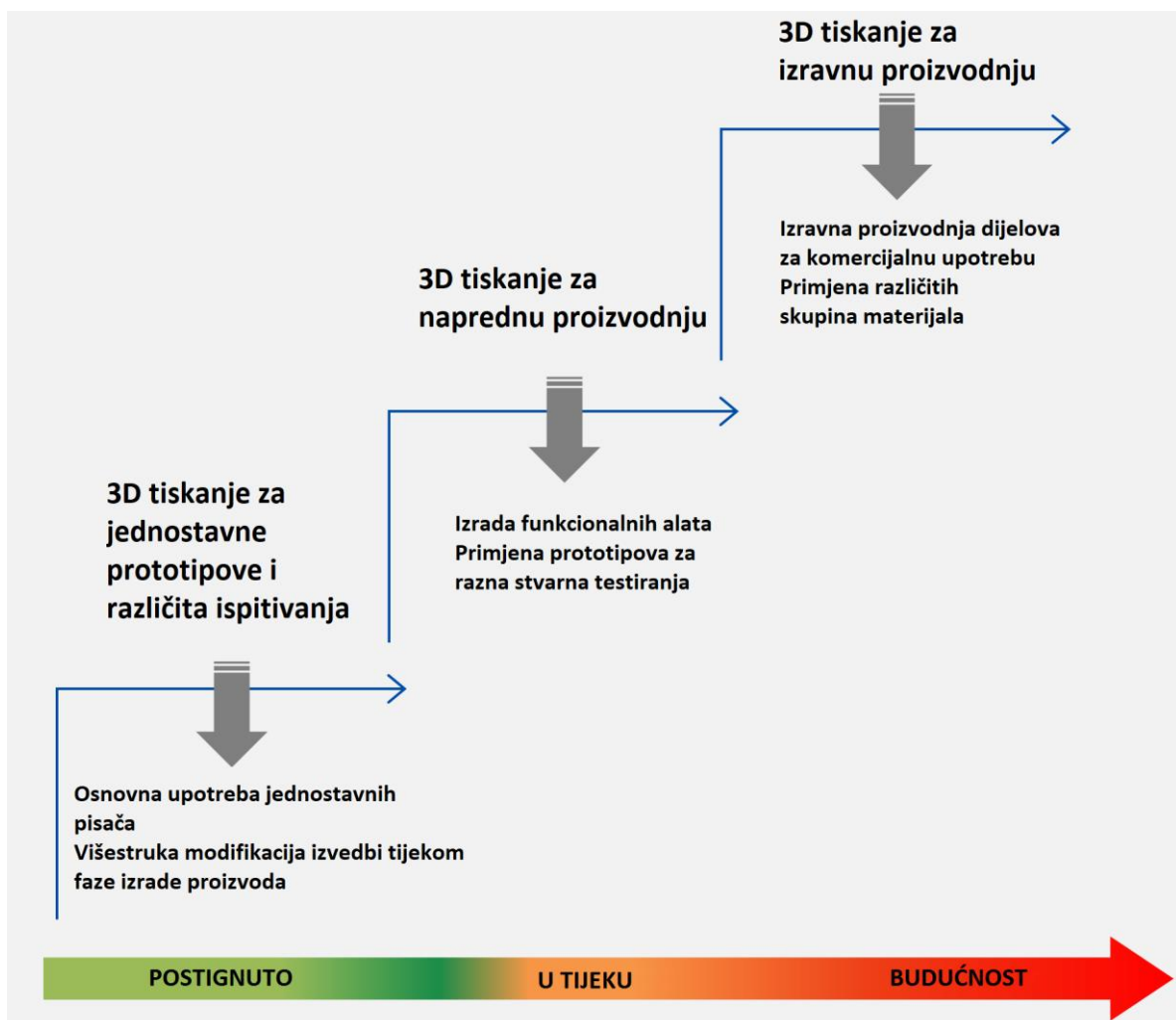
Automobilsko tržište je jedno od najvećih na svijetu, a samim time i tržište s najviše konkurencije. Ostati konkurentan na tržištu je veoma bitno pa aditivna tehnologija tu dolazi do izražaja i može biti faktor diferencijacije između pojedinim proizvođača iz razloga što aditivna proizvodnja omogućuje brži razvoj i izradu prototipova i koncepata, a samim time i brži odaziv na potražnju tržišta. [11]

Automobilaska industrija je među prvima počela primjenjivati aditivne postupke. [11]

Sve je krenulo 1990. godine kada je engleski proizvođač automobila *Rover* (sada u sastavu *Jaguar Land Rover* grupacije u vlasništvu *Tata Motors* iz Indije) počeo upotrebljavati u svojoj proizvodnji postupke brze proizvodnje (RP). Iste su godine implementirali uređaj SLA 500, prvi takav stereolitografski stroj za brzu proizvodnju u Velikoj Britaniji s vrijednošću od oko 700 tisuća funti. Paralelno su se aditivni postupci počeli primjenjivati u *Formuli 1*, a u to vrijeme je prednjačio *Lotus F1 Team* te *Williams F1 Team* koji je upotrebljavao SLA 5000 stroj. Također treba spomenuti američkog proizvođača automobila *Ford* koji upotrebljava aditivne postupke od samih početaka i jedan je od vodećih proizvođača današnjice u vidu implementiranja aditivnih postupaka u svoje proizvodne postupke. [11]

Ubrzo nakon *Rovera* i *Forda* ostali proizvođači automobila počinju uvoditi aditivne postupke u svoje proizvodne postupke, a posebno do izražaja dolaze u automoto natjecanjima (*Formula 1*, *Moto GP* itd.) . Tako u današnje vrijeme aditivne postupke u svojim proizvodnim postupcima koriste sljedeće grupacije koje posjeduju najveće automobilske brandove: *General Motors*, *Ford*, *Toyota*, *Peugeot SA*, *Fiat*, *Honda*, *Hyundai*, *Daimler AG*, *BMW*, *Tata*, *Volkswagen*. [12]

U početku razvoja aditivne proizvodnje bila su prisutna ograničenja u vidu postupaka i materijala, ali se to s vremenom svelo na prihvatljive razine kako su se pojavljivali novi postupci i materijali i svakim danom napreduju u svim pogledima. [13] Tijek razvoja aditivnih postupaka u automobilskoj industriji je prikazan na slici 2.1.

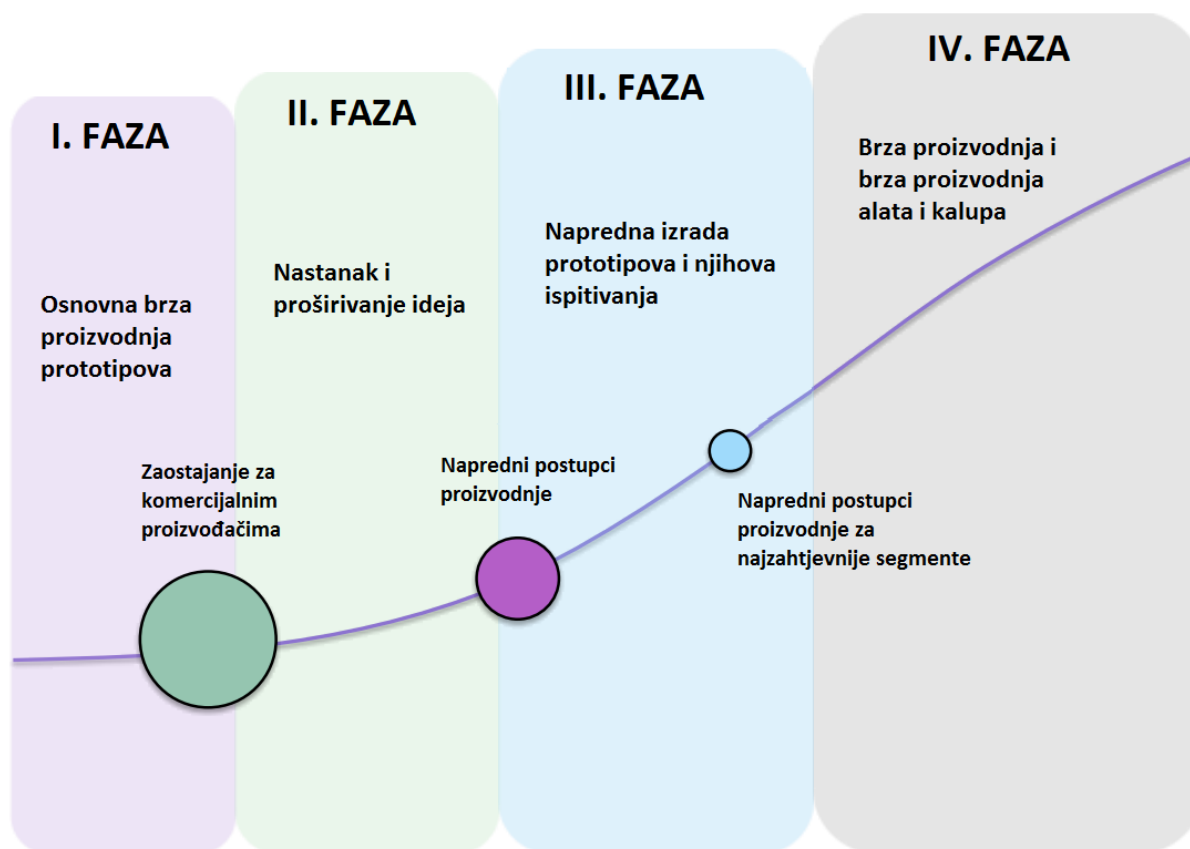


Slika 2.1. Tijek razvoja aditivnih postupaka u automobilskoj industriji [14]

Aditivni postupci su potpuno integrirani u najsuvremenije procese automobilske proizvodnje i sada se proširuju na nova i uzbudljiva područja unutar same industrije. Automobilska industrija već posjeduje široku lepezu aditivnih postupaka pomoću kojih mogu tiskati od malih do velikih funkcionalnih dijelova. [13]



## 2.1. Model prilagodbe aditivnih postupaka u automobilsku industriju [15]



Slika 2.2. Model prilagodbe aditivnih postupaka u automobilskoj industriji [15]

U prvoj fazi modela prilagodbe, „osnovna brza proizvodnja prototipa“ (e. *Basic Rapid Prototyping*) korisnik obično posjeduje jedan 3D pisac koji primjenjuje za izradu određenog prototipa. Mnogi proizvođači u automobilskoj industriji su počeli uvoditi aditivne postupke na ovaj način. Alternativno, korisnici u ovoj fazi su se mogli osloniti na pružanje usluga za izradu prototipova (vanjski pružatelji usluga). Prelazak iz ove faze u razvijenije faze brze izrade prototipova postaje sve lakši kada se svijest o prednostima aditivnih postupaka ubrzano povećava.

U drugoj fazi, „nastanak i proširivanje ideja“ (e. *Distributed Idea Generation*) korisnici mogu posjedovati više 3D pisaca, često za različite postupke, kako bi proširili aktivnosti brze izrade prototipova izvan dosega mogućnosti koje nisu bile izvedive upotrebom konvencionalnih postupaka ili s jednim piscem. Korisnici u ovoj fazi prilagodbe mogu iskoristiti veći kapacitet ispisa prilikom dizajniranja novih dijelova kako bi se povećala kreativnost i vidjelo

što više različitih verzija ideja sve do funkcionalnog prototipa. Alternativni dio ove faze ponekad je obilježen kupnjom brojnih stolnih 3D pisaa koji se daju razvojnim timovima inženjera i dizajnera kako bi lakše svoje ideje pretvorili u fizičke modele prije nego li je potrebno izraditi precizniji proizvod.

U trećoj fazi, „napredna izrada i istraživanja prototipova“ (e. *Advanced Prototyping and Exploration*) korisnici su počeli upotrebljavati vlastite 3D pisaa ili usluge 3D tiskanja kako bi proizveli funkcionalne prototipove koji će biti upotrebljeni u konceptnim ili testnim projektima ili vozilima. Ovi dijelovi su imali slične ili iste karakteristike kao i konačni proizvod, ali se nisu smatrali krajnjim proizvodom. Metalni prototipovi su u ovoj fazi postajali sve popularniji korisnicima. Korisnici su u ovoj fazi počeli upotrebljavati 3D tiskanje i na druga područja poslovanja kako bi što bolje iskoristili tehnologiju u svrhe razvoja i dizajniranja proizvoda. Dolazi do razmatranja primjene 3D pisaa za proizvodnju skupih zamjenskih dijelova ili dijelova koji se teže nabavljaju. Dolazi do napredne brze proizvodnje prototipova i istraživanja iskoristivosti.

U zadnjoj, četvrtoj fazi, „brza proizvodnja i brza proizvodnja alata“ (e. *Rapid Manufacturing and Rapid Tooling*) dolazi do upotrebe 3D pisaa za nadopunu konvencionalnih postupaka u proizvodnji dijelova kalupa, alata i sl. koji izravno doprinose proizvodnji. Napredni korisnici u ovoj fazi mogu aditivnim postupcima proizvoditi dijelove za upotrebu. Sve glavne značajke aditivne proizvodnje su se počele razmatrati u ovoj fazi, uključujući optimizaciju opskrbnog lanca, smanjenje vremena razvoja i dizajniranja i redizajniranja postojećih i novih komponenti.

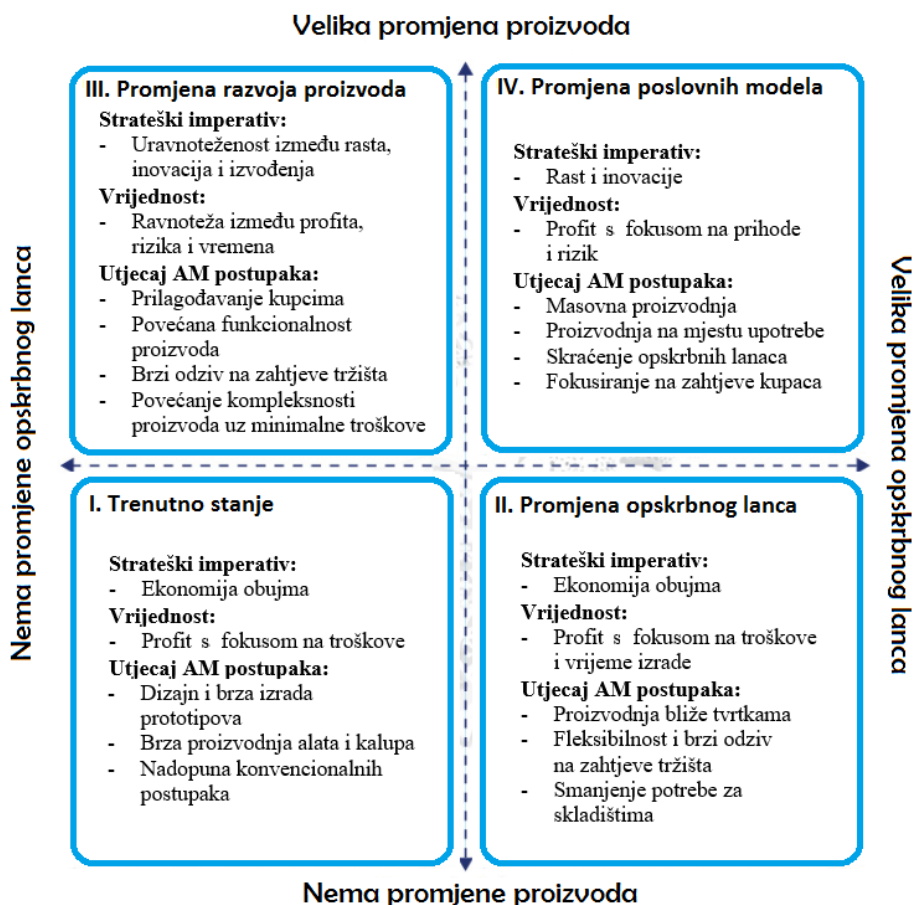
Različiti proizvođači u automobilskoj industriji mogu se nalaziti u različitim fazama prilagodbe aditivnih postupaka, no općenito se mogu podijeliti na napredne ili manje napredne korisnike.

## 2.2. Utjecaj aditivne proizvodnje na opskrbeni lanac i varijante proizvoda [16]

Aditivna proizvodnja na dva načina ima utjecaja na automobilsku industriju:

1. AM je izvor inovacije proizvoda – brži razvoj novih ili poboljšanih proizvoda u odnosu na konvencionalne postupke što je često i glavna prednost primjene aditivne proizvodnje pri proizvodnji s posebnim zahtjevima. Također aditivnim je postupcima moguće proizvesti istovremeno proizvod načinjen od više različitih materijala.
2. AM je pokretač promjena u opskrbnom lancu – aditivni postupci eliminiraju potrebu za novim alatima i omogućuju izravnu proizvodnju dijelova. Zbog toga kada se radi o malim ili srednjim serijama proizvoda moguća je decentralizirana proizvodnja, a to dovodi do promjena unutar opskrbnih lanaca koje omogućuju smanjenje troškova prije svega transporta zbog proizvodnje bliže kupcima.

Inovacije i promjena opskrbnog lanca imaju potencijal mijenjanja poslovnih modela automobilskih proizvođača. Promjene koje uzrokuju primjena AM moguće su u četiri smjera (slika 2.3).



Slika 2.3. Četiri smjera promjene u poslovnom modelu proizvođača automobila [16]

Postoje dvije proizvodne strategije na koje aditivna proizvodnja utječe, a to su ekonomija obujma i ekonomija opsega.

Kod ekonomije obujma se teži povećanju obujma proizvodnje (veća proizvodnja – niži troškovi – veći profit), a aditivna proizvodnja omogućuje brži razvoj proizvoda i proizvodnje pa time prije dovodi do povećanja obujma proizvodnje, snižavanja prosječnih proizvodnih troškova, te na kraju do većeg profita.

Kod ekonomije opsega se povećava broj mogućih proizvoda ili usluga te proizvođači aditivne opreme osim strojeva šire svoje poslovanje i na pružanje usluga razvoja proizvoda i proizvodnje, te same izrade pa dolazi do suradnje između pojedinih proizvođača automobila i proizvođača aditivnih postupaka.

Na slici 2.3 prikazana su četiri smjera u kojima mogu ići promjene koje izaziva primjena AM postupaka:

**I. Trenutno stanje** – tvrtke ne traže radikalne promjene u opskrbnim lancima, a ni u proizvodima, ali primjena aditivnih postupaka vodi ka poboljšanju isporuke i prilagodbe postojećih proizvoda unutar postojećih opskrbnih lanaca.

**II. Promjena opskrbnog lanca** – tvrtke žele iskoristiti ekonomiju obujma tako da im aditivni postupci budu nadopuna konvencionalnih postupaka (brži razvoj) kako bi imali što veću proizvodnju.

**III. Promjena razvoja proizvoda (promjena pri razvoju i proizvodnji proizvoda)** – tvrtke primjenjuju ekonomiju opsega koju mogu unaprijediti primjenom aditivnih postupaka koji omogućuju prilagodbu različitim zahtjevima tržišta (personalizirana proizvodnja, povećanje funkcionalnosti dijelova, kompleksnost dijelova).

**IV. Promjena poslovnih modela** – tvrtke mijenjaju proizvode i lanac opskrbe u potrazi za novim poslovnim modelima (decentralizirana proizvodnja, konstruiranje i proizvodnja dijelova po zahtjevima kupaca – brza isporuka).

### **2.3. Upotreba aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji**

Proizvođači u automobilskoj industriji koriste prednosti aditivne proizvodnje koja se proširila iz jednostavne izrade prototipova na sva područja, od razvoja do proizvodnje. Proizvođači mogu proizvesti dijelove složene geometrije koju je bilo veoma teško ili skupo proizvesti pomoću konvencionalnih postupaka te povećati efikasnost proizvodnje. [17]

Aditivna proizvodnja može poboljšati proizvodnju te uštedjeti novac i vrijeme na nekoliko načina: [17]

#### **Dizajniranje i ispitivanje funkcionalnih prototipova [17]**

AM se primjenjuje od početne faze proizvodnje različitih dijelova. Omogućuju potpunu slobodu konstruiranja jer se primjenjuju različiti 3D CAD programi. AM postupci omogućuju brzu izravnu proizvodnju iz 3D CAD programa te se zbog toga mogu ispitivati različito konstruiranih prototipova, te se dolazi do rezultata puno brže nego kod konvencionalnih postupaka što može uštedjeti puno novaca i vremena.

#### **Eksterijer i interijer automobila [17]**

Proizvođači automobila pomoću AM postupaka proizvode sve više i više dijelova eksterijera i interijera zamjenjujući tako konvencionalne postupke koji su sporiji i imaju ograničenja kod proizvodnje dijelova složene geometrije. Upotrebom AM postupaka se dobiva na brzini i fleksibilnosti proizvodnje dijelova eksterijera i interijera što u konačnici dovodi do ušteda.

#### **Motor i njegovi dijelovi [17]**

Veliki raspon materijala i postupaka koji se primjenjuju u aditivnoj proizvodnji omogućuje inženjerima lakši razvoj i poboljšanja različitih modela motora i njegovih dijelova. Dijelovi kompleksne geometrije se mogu ponekad izraditi kao jedna cjelina što dovodi do smanjenja dijelova u sklopu te smanjivanja nedostataka spojeva i pojednostavljenje montaže što omogućuje proizvođačima lakšu optimizaciju performansi i proizvodnje.

#### **Alati [17]**

Aditivna proizvodnja ne primjenjuje alat tijekom izrade dijelova. Međutim za različite među procese je potreban alat. Aditivnim postupcima može se izraditi posebno prilagođen alat koji se primjenjuje za ispitivanja i montažu te se na taj način poboljšava produktivnost i smanjuju troškovi.

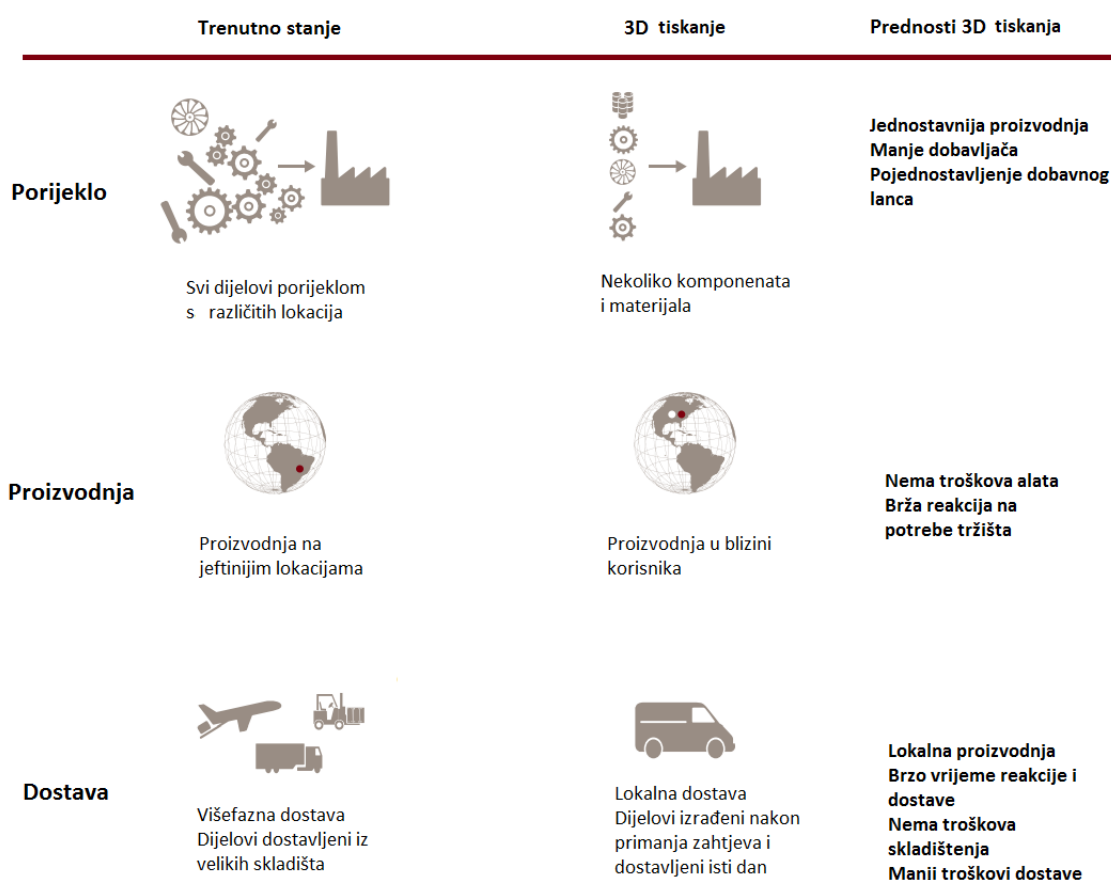
#### **Inovacija proizvoda i poboljšanje performansi [17]**

Aditivna proizvodnja je omogućila automobilskoj industriji produktivnije inovacije novih dijelova te primjenu alata pomoću kojih se mogu ostvariti bitna poboljšanja. S manje

ograničenja u dizajnu i proizvodnji, inženjeri i konstruktori automobila mogu ostvariti prilagođene značajke koje poboljšavaju estetiku, ergonomiju i performanse. Aditivnim postupcima se mogu proizvesti lakše, jednodijelne, šuplje ili rešetkaste strukture koje imaju za posljedicu smanjenja mase i potrošnje goriva odnosno do povećanja performansi.

### Zamjenski (rezervni) dijelovi (za proizvodnju i prodaju) [18]

Zamjenski (rezervni) dijelovi su veoma bitna tema u aditivnoj proizvodnji. Aditivna proizvodnja želi u budućnosti reorganizirati cijeli opskrbni lanac proizvodnjom zamjenskih dijelova na kraju lanca, prilagođen na zahtjev kupca. Takav način opskrbe klijenata bi znatno smanjio troškove proizvodnje zbog toga jer ne bi imali potrebu za skladištima (slika 2.4.).



Slika 2.4. Usporedba opskrbnih lanaca [19]

### Prezentacijski modeli [20]

Aditivnom proizvodnjom se mogu proizvesti mali prezentacijski modeli koji služe za vizualnu prezentaciju te se na taj način može lakše predočiti kako će izgledati proizvedeni model komponente ili automobila. Prezentacijski model je lako prenosiv što je veoma bitno ako služi za izlaganje izvan same tvrtke (slika 2.5.).



Slika 2.5. Prezencijski modeli izrađeni različitim AM postupcima [20]

### **2.3.1. Prednosti aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji [20, 21]**

Od ranih dana, svjedočimo neviđenom usvajanju aditivne proizvodnje u automobilsku industriju. S gledišta ekonomskih i ekoloških problema, postoji potreba da se počinje mijenjati dosadašnji način proizvodnje automobila.

Automobilska industrija se brzo prilagođava aditivnoj proizvodnji te sad već zauzima bitno mjesto u konstruiranju automobila. Aditivna proizvodnja uvelike pomaže u estetskom dizajnu automobila, ali istovremeno može uvelike olakšati izradu prototipa u rekordnom vremenu te potiče inženjere na inovativnost, kreativnost i neograničene mogućnosti.

Vodeće svjetske tvrtke su počele shvaćati komercijalne prednosti aditivne proizvodnje u automobilskoj proizvodnji izvan područja izrade prototipova. Aditivna proizvodnja je promijenila način konstruiranja automobila, razvoja i proizvodnje. Aditivni postupci mogu ponuditi proizvođačima automobila sljedeće prednosti:

- a) Brza izrada prototipova – jedna od glavnih prednosti aditivne proizvodnje u konstrukciji automobila. Tvrtke imaju mogućnost razvijanja svih dijelova brže nego ikad. Brza izrada prototipova tvrtkama omogućuje kontrolu nad intelektualnim vlasništvom (razni patenti).
- b) Brže vrijeme izlaska na tržište – vrijeme koje se uštedi u fazi brze izrade prototipova drastično smanjuje vrijeme izlaska proizvoda na tržište kao i ostale faze proizvodnje. To doprinosi poslovnoj vrijednosti u smislu nižih troškova.

- c) Niži troškovi – vrijeme i resursi koji se uštede u pojedinim fazama razvoja i proizvodnje primjenom aditivne proizvodnje dovode do optimalnog i učinkovitog načina proizvodnje.
- d) Dodatna sloboda (fleksibilnost) – aditivni postupci omogućuju tvrtkama isprobavanje više mogućnosti u istoj fazi razvoja što dovodi do učinkovitog dizajna automobila. Proizvođači imaju naviku da promjene dizajn u skladu s trenutnim zahtjevima tržišta.

### **2.3.2. Način kako će aditivna proizvodnja promijeniti automobilsku industriju**

- a) Dizajn automobila – dizajn automobila prolazi različite faze u svakoj godini. Tijekom vremena dizajn postaje poput vremenske kapsule za doba kojem pripadaju. Dizajn postaje trend tog vremena. Aditivna proizvodnja omogućuje proizvođačima isprobavanje različitih dizajna automobila, ali i daje slobodu dizajnerima. Aditivna proizvodnja stavlja manji naglasak na tvornice i čine proces puno dostupniji što dovodi do toga da dizajneri imaju više kontrole nad dizajnom automobila. Različite tvrtke su dokazale da aditivna proizvodnja može učiniti automobile jeftinijima, a proizvodnju jeftiniju i učinkovitiju. [22]
- b) Restauriranje automobila – dok projektiranje i dizajn predstavlja mogućnosti u budućnosti, aditivni postupci imaju i drugu stranu upotrebe: oldtimeri. Funkcionalni proizvodi kao što su automobili uvijek će imati problem održavanja. To predstavlja ljubiteljima starih automobila problem jer automobili koji su zastarjeli više nemaju ponudu zamjenskih dijelova. Aditivna proizvodnja ovdje dolazi do izražaja jer se mogu reverzibilnim inženjerstvom dobiti 3D CAD modeli starog dijela, a aditivnim postupkom se izradi novi koji možda nikad ne bi bio izrađen tradicionalnim načinom. Ova vrsta obnove znatno smanjuje troškove i vrijeme povezano s pronalaženjem starih dijelova. [22]
- c) Prilagodba automobila – prilagodba automobila je glavni dio automobilske „kulture“, a aditivna proizvodnja predstavlja nove mogućnosti na tom području. Moguće je da ćemo u budućnosti vidjeti trgovanje AMF datotekama različitih prilagođenih dijelova automobila. Aditivna proizvodnja nudi neograničene mogućnosti proizvodnje personaliziranih dijelova od najjednostavnijih do najkompliciranijih koje je moguće izraditi pomoću 3D CAD programa. [22]
- d) Masa automobila – sve više se teži smanjenju mase automobila jer je popratna pojava i smanjenje emisije štetnih plinova. AM postupcima se može proizvesti posebna



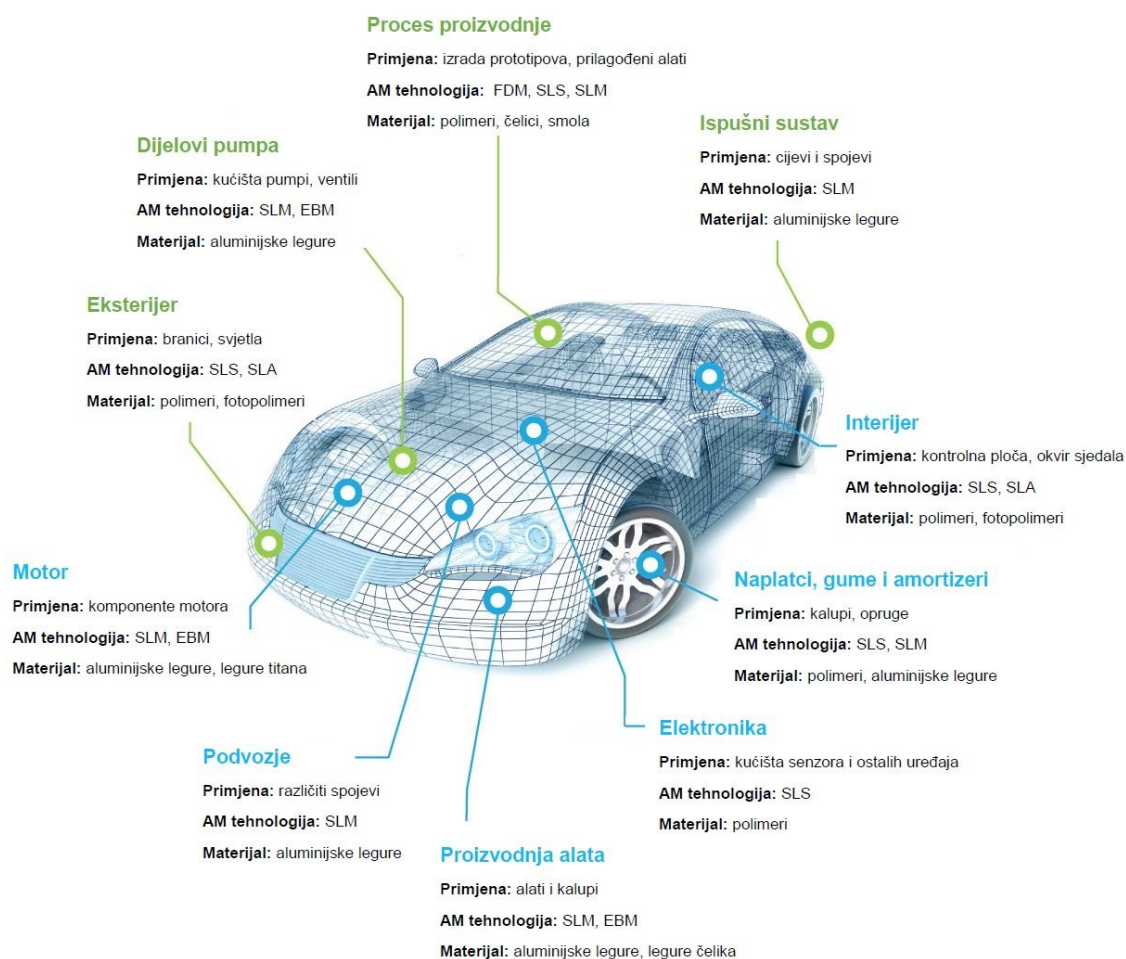
struktura i geometrija koja dovodi do smanjenja mase dijelova, ali istodobno i do smanjenje potrošnje materijala. [23]

## 2.4. Aditivna proizvodnja u automobilskoj industriji [24]

Proizvođači automobila se u velikim serijama proizvoda bore s potrebama energetske učinkovitosti, smanjenjem štetnih emisija i troškova proizvodnje, kontinuiranom potražnjom za inovacijama i prilagodbom proizvoda.

AM postupci nude niz rješenja kao što su maksimalna sloboda dizajna, lagane komponente, prilagođena (personalizirana) proizvodnja i proizvodnja bez alata.

Brza izrada prototipova kao primjena aditivne proizvodnje također povećava učinkovitost istraživanja i razvoja. Time se lako mogu postići inovacije, čime se omogućuju brži razvoj i proizvodnja te na kraju brži izlazak novih verzija na tržište. Fokus AM proizvodnje nisu samo geometrijski prikaz proizvoda, koji je izvorni cilj brze izrade prototipova, nego njihova funkcionalna sposobnost i izravna ugradnja u konačni proizvod – automobil (motocikl, formulu i sl.). Grafički prikaz primjene AM postupaka je prikazan na slici 2.6.



Slika 2.6. Prikaz primjena AM postupaka kod proizvodnje automobila [25]

### 2.4.1. Primjeri automobila izrađenih AM postupcima

U tablici 2.1 su neki primjeri upotrebe AM postupaka u automobilskoj industriji koje su popraćene sa slikama od 2.7 do 2.19.

Tablica 2.1. Modeli i proizvođači motornih vozila proizvedenih AM postupcima [26,27]

| Model                     | Proizvođač                                    | Tehnologija   | Udio aditivnih dijelova | Namjena                                       |
|---------------------------|---|---------------|-------------------------|---|
| <i>Shelby Cobra 56</i>    | <i>Oak Ridge National Laboratories (ORNL)</i> | FDM           | 75 %                    | Funkcionalni koncept                          |
| <i>Strati</i>             | <i>Local Motors</i>                           | FDM           | 85 %                    | Funkcionalni koncept                          |
| <i>Blade</i>              | <i>Divergent 3D</i>                           | DMLS          | 25 %                    | Funkcionalni koncept                          |
| <i>Light Cocoon</i>       | <i>EDAG</i>                                   | FDM, SLM      | 60 %                    | Fizički koncept                               |
| <i>Lotus 340R</i>         | <i>CIDEAS</i>                                 | SLA, SLS, FDM | 60 %                    | Funkcionalni koncept                          |
| <i>Light Rider</i>        | <i>APWorks</i>                                | SLM           | 75 %                    | Funkcionalni koncept                          |
| <i>LM3D</i>               | <i>Local Motors</i>                           | FDM           | 75 %                    | Multifunkcionalni model za fizička testiranja |
| <i>Dagger</i>             | <i>Divergent 3D</i>                           | SLM, SLS, FDM | 50 %                    | Funkcionalni koncept                          |
| <i>StreetScooter C-16</i> | <i>Aachen University</i>                      | Polyjet       | 75 %                    | Funkcionalni prototip                         |
| <i>PUV</i>                | <i>Oak Ridge National Laboratories (ORNL)</i> | FDM           | 60 %                    | Funkcionalni prototip                         |
| <i>Olli</i>               | <i>Local Motors</i>                           | FDM           | 70 %                    | Prototip u upotrebi                           |
| <i>Urbee</i>              | <i>KOR Ecologic</i>                           | FDM           | 75 %                    | Funkcionalni prototip                         |
| <i>NTU Venture 8</i>      | <i>NTU Singapore</i>                          | FDM           | 75 %                    | Funkcionalni prototip                         |

### 1. *Shelby Cobra 56* (slika 2.7) [26]

AM postupak: FDM

Komponente izrađene pomoću AM postupaka: svi nemehanički dijelovi (interijer, eksterijer i karoserija)



Slika 2.7. *Shelby Cobra 56* [26]

### 2. *Strati* (slika 2.8) [28]

AM postupak: FDM

Komponente izrađene pomoću AM postupaka: svi nemehanički dijelovi (interijer i eksterijer)



Slika 2.8. *Strati* [28]

### 3. *Blade* (slika 2.9) [26]

AM postupak: DMLS

Komponente izrađene AM postupkom: aluminijski spojevi (čvorovi podvozja)



Slika 2.9. *Blade* [26]

### 4. *Light Cocoon* (slika 2.10) [26]

AM postupak: FDM, SLM

Komponente izrađene pomoću AM postupaka: podvozje, dijelovi interijera



Slika 2.10. *Light Cocoon* [26]

### 5. Lotus 340R (slika 2.11) [26]

AM postupak: SLS, SLA, FDM

Komponente izrađene AM postupkom: eksterijer (branici, svjetla), interijer (kontrolna ploča), podvozje



Slika 2.11. Lotus 340R [26]

### 6. Light Rider (slika 2.12) [29]

AM postupak: SLM

Komponente izrađene AM postupkom: okvir električnog motocikla



Slika 2.12. Light Rider [29]

## 7. *LM3D* (slika 2.13) [30]

AM postupak: FDM

Komponente izrađene AM postupkom: podvozje, eksterijer (branici, vrata i ostalo), interijer



Slika 2.13. *LM3D* [30]

## 8. *Dagger* (slika 2.14) [31]

AM postupak: SLM, FDM

Komponente izrađene AM postupkom: okvir motocikla, spremnik goriva i prednja vilica, okvir svjetla



Slika 2.14. *Dagger* [31]

**9. StreetScooter C-16 (slika 2.15) [32]**

AM postupak: FDM

Komponente izrađene AM postupkom: eksterijer (branici i ostalo), interijer (upravljačka ploča)



Slika 2.15. StreetScooter C-16 [32]

**10. PUV (slika 2.16) [33]**

AM postupak: FDM

Komponente izrađene AM postupkom: eksterijer i dijelovi interijera



Slika 2.16. PUV (Printed Utility Vehicle) [33]

**11. Olli (slika 2.17) [26]**

AM postupak: FDM

Komponente izrađene AM postupkom: podvozje, dijelovi interijera



Slika 2.17. Olli [26]

**12. Urbee (slika 2.18) [27]**

AM postupak: FDM

Komponente izrađene AM postupkom: eksterijer, podvozje i dijelovi interijera



Slika 2.18. Urbee [27]



### 13. NTU Venture 8 (slika 2.19) [27]

AM postupak: FDM

Komponente izrađene pomoću AM postupaka: Eksterijer i dijelovi interijera



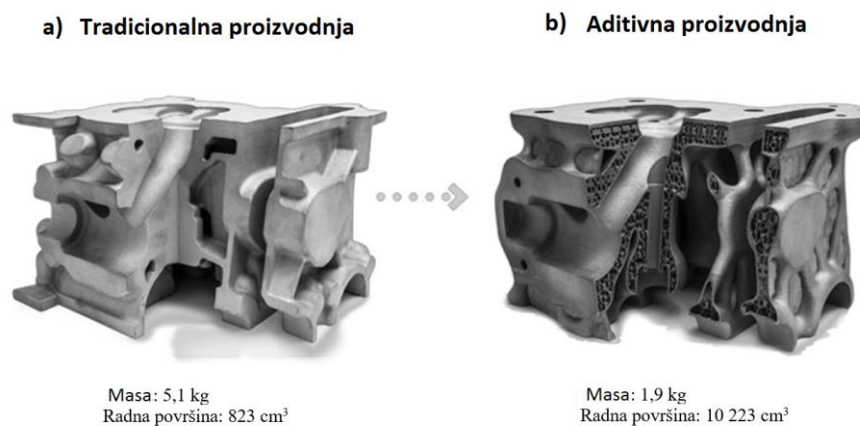
Slika 2.19. NTU Venture 8 [27]

## 2.5. Materijali i postupci aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji

Svojstva i zahtjevi na proizvode u automobilskoj industriji [20]:

### 1. Masa dijelova

Jedan od najvažnijih zahtjeva u automobilskoj industriji je smanjenje mase komponenti. Automobilska industrija stoga znatna sredstva ulaže u razvoj novih materijala, postupaka i računalnih programa kako bi bili sposobni proizvoditi što lakše komponente. Aditivnim postupcima se mogu proizvoditi komponente posebne geometrije koja omogućuje znatno smanjenje mase (slika 2.20). [20]



Slika 2.20. Usporedba: a) tradicionalne proizvodnje i b) aditivne proizvodnje [34]

## 2. Složenost geometrije

Složenost geometrije ima utjecaj na masu i aerodinamiku, a time i na performanse vozila. Automobilske komponente često zahtijevaju posebne unutarnje kanale za hlađenje, skrivene značajke, tanke stjenke, fine mreže i složene zakrivljene površine. Aditivna proizvodnja omogućuje proizvodnju tih složenih geometrija uz moguće smanjenje mase. Najbitnije od svega, aditivna proizvodnja omogućuje visoki stupanj slobode konstruiranja, optimizaciju i integraciju zahtjevnih funkcionalnih značajki, proizvodnju malih serija uz razumne troškove i visoki stupanj prilagodbe čak i u serijskoj proizvodnji. [20]

## 3. Visoki detalji

Za razliku od tradicionalnih postupaka neki AM postupci su u mogućnosti proizvesti višebojne površine koja je usporediva s injekcijskim prešanjem. Ovi modeli omogućuju dizajnerima bolje razumijevanje oblika i prilagodbu dijela. Ovaj postupak je također pogodan za aerodinamičko ispitivanje i analizu, jer površina predstavlja konačno stanje. AM postupci se često primjenjuju za proizvodnju komponenti koji se oslanjaju na estetsku vrijednost. [20]

## 4. Radna temperatura

Mnoge komponente u automobilskoj industriji ponekad zahtijevaju velika odstupanja radnih temperatura. To su ponekad veliki temperaturni rasponi (-20 °C do 120 °C) pa treba obratiti pozornost na aditivne postupke i materijale koji se mogu primijeniti u takvim uvjetima. [20]

## 5. Utjecaj vlage

Većina sastavnih dijelova automobila moraju biti postojani ili potpuno postojani na vlagu zbog različitih prirodnih uvjeta tijekom eksploatacije. Jedna bitna prednost aditivne

proizvodnje je ta da se dijelovi mogu naknadno obraditi kako bi se postigla vodonepropusnost. [20]

#### 6. Integriranje dijelova (e. *Part consolidation*)

Uvijek se teži smanjenju broja komponenti. Integriranje dijelova ima značajan utjecaj na količinu utrošenog materijala, čime se smanjuje masa ali i troškovi izrade. Međusobno integriranje dijelova smanjuje inventar u skladištima te se kompleksnost popravaka automobila može pojednostaviti. [20]

Tablica 2.1 prikazuje popis najčešćih primjena, postupaka, materijala, značajki i primjene u automobilske industriji.

Tablica 2.2. Primjeri najčešće AM primjene u automobilskoj industriji [20]

| <b>Primjena</b>               | <b>Postupak</b>   | <b>Materijal</b>       | <b>Značajke</b>                               | <b>Primjer komponente</b>                 |
|-------------------------------|-------------------|------------------------|---|---|
| Zaštita komponenata           | SLS               | Poliamid               | Postojanost visokim temperaturama             | Kućište baterije (slika 2.21)             |
| Interijer                     | PolyJet, SLA, SLS | Fotopolimeri, polimeri | Prilagođeni detalji                           | Upravljačka konzola (slika 2.22)          |
| Kanali za zrak                | SLS               | Polimeri               | Kanali komplicirane putanje                   | Kanali za klimatizaciju (slika 2.23)      |
| Eksterijer                    | SLA               | Fotopolimeri, Smola    | Komplicirana geometrija i prilagođeni detalji | Prednji branik (slika 2.24)               |
| Nosači i ručke                | SLS               | Polimeri               | Prilagođeni oblik                             | Nosač alternatora (slika 2.25)            |
| Kompleksne metalne komponente | DMLS              | Metali i legure        | Integrirani, lagani, funkcionalni dijelovi    | Dijelovi amortizera i ovjesa (slika 2.26) |
| Različiti okviri              | PolyJet           | Fotopolimeri           | Prilagođeni oblici                            | Okvir upravljačke ploče (slika 2.27)      |
| Svijetla                      | SLA, SLS          | Fotopolimeri, polimeri | Transparentni i kompleksni oblici             | Prednja i stražnja svjetla (slika 2.28)   |



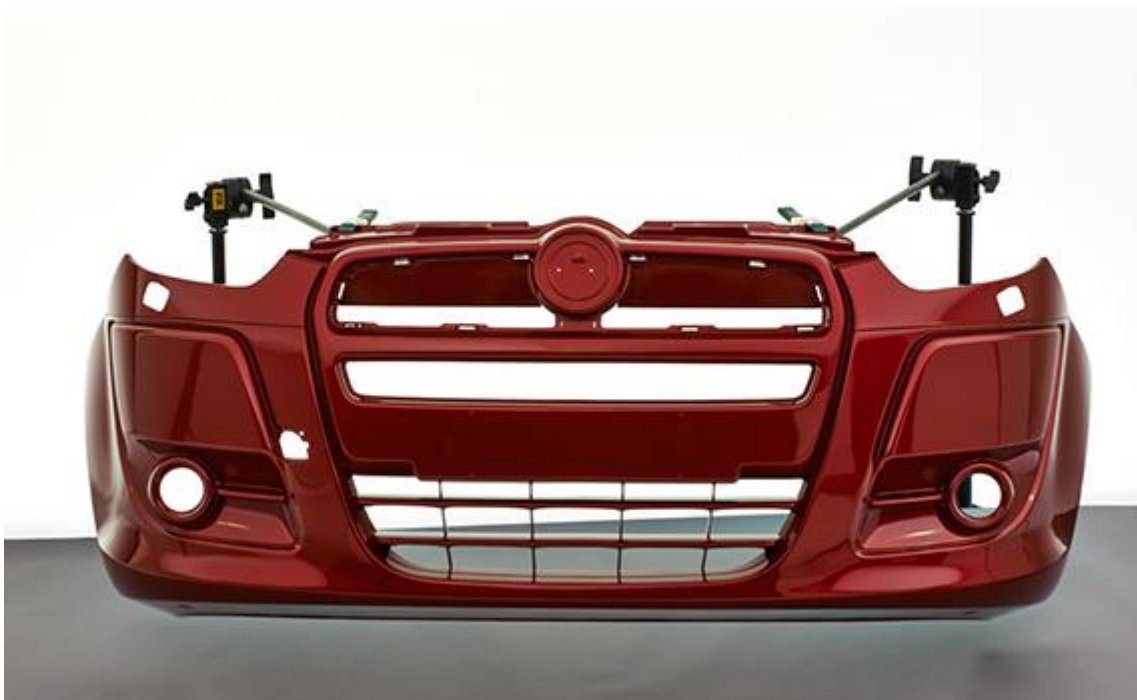
Slika 2.21. Zaštitno kućište baterije električne formule iz PA12 materijala (postupak SLS) [35]



Slika 2.22. Upravljačka konzola automobila (postupak PolyJet) [36]



Slika 2.23. Kanali klimatizacije automobila (postupak SLS) [36]



Slika 2.24. Prednji branik automobila (postupak SLA) [37]



Slika 2.25. Nosač alternatora (postupak SLS) [20]



Slika 2.26. Ovjes kotača (postupak DMLS) [38]



Slika 2.27. Okvir upravljačke ploče (postupak PolyJet) [20]



Slika 2.28. Posebno dizajnirano prednje svjetlo motocikla (postupak SLS) [39]



## 2.6. Uobičajena primjena AM u automobilskoj industriji

U tablici 2.3 prikazane su ostale primjene u automobilskoj industriji.

Tablica 2.3. Ostali primjeri upotrebe AM u automobilskoj industriji [40]

| <b>Primjena</b>                 | <b>Postupak</b>  | <b>Materijal</b>                | <b>Značajke</b>  | <b>Primjer<br/>komponente</b> |
|---------------------------------|------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|
| Dijelovi<br>ispušnog sustava    | SLS, SLM         | Polimeri, metali                | Komplicirana<br>geometrija   | Slika 2.29                    |
| Dijelovi<br>aerodinamike        | FDM, SLA, SLS    | Polimeri                        | Prilagođeni<br>oblik   | Slika 2.30                    |
| Sustavi pumpe                   | SLA, SLM         | Polimeri, metali                | Kompleksna i<br>prilagođena<br>geometrija                          | Slika 2.31                    |
| Konzole i<br>sjedala            | SLM, SLS, SLA    | Aluminijske<br>legure, polimeri | Smanjenje mase,<br>prilagođeni<br>detalji                          | Slika 2.32                    |
| Dijelovi<br>kočionog<br>sustava | SLM              | Metali                          | Smanjenje mase,<br>kompleksna<br>geometrija                        | Slika 2.33                    |
| Dijelovi<br>karoserije          | SLM, SLS         | Metali, polimeri                | Prilagođeni<br>spojevi i dijelovi<br>smanjenje mase                | Slika 2.34                    |
| Alati i kalupi                  | 3DP, SLM,<br>FDM | Pijesak, metali,<br>polimeri    | Ujednačeno<br>temperiranje<br>kalupa,<br>prilagođena<br>geometrija | Slika 2.35                    |
| Dijelovi usisnih<br>sustava     | FDM, SLS,<br>SLM | Polimeri, metali                | Kompleksna i<br>prilagođena<br>geometrija                          | Slika 2.36                    |
| Gume i naplatci                 | PolyJet          | Fotopolimeri                    | Visoki detalji   | Slika 2.37                    |

Tablica 2.3. Ostali primjeri upotrebe AM u automobilskoj industriji (nastavak) [40]

| Primjena        | Postupak      | Materijal              | Značajke                              | Primjer komponente      |
|-----------------|---------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Nosači svjetla  | PolyJet, SLS  | Fotopolimeri, polimeri | Prilagođena geometrija                | Slika 2.38              |
| Prototipovi     | FDM           | Polimeri               | Kompleksna geometrija, visoki detalji | Slika 2.39 i Slika 2.40 |
| Dijelovi motora | SLM, DMD      | Metali                 | Prilagođena geometrija, manja masa    | Slika 2.41              |
| Ostalo          | SLS, SLA, SLM | Polimeri, metali       | Kompleksna geometrija                 | Slika 2.42              |



a.)



b.)

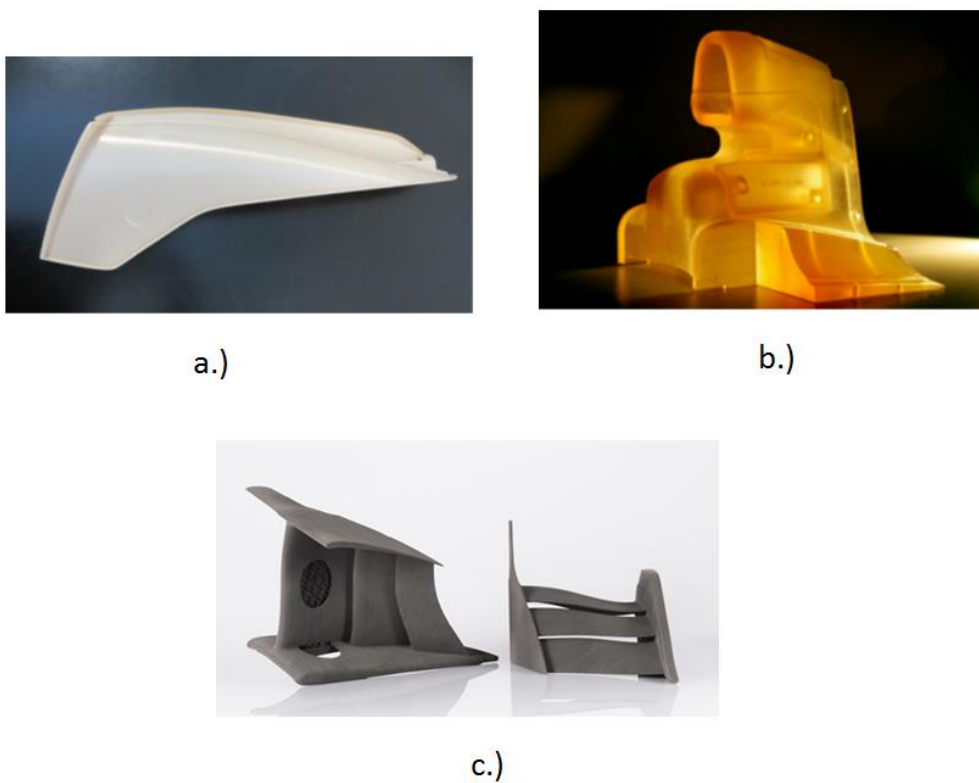


c.)

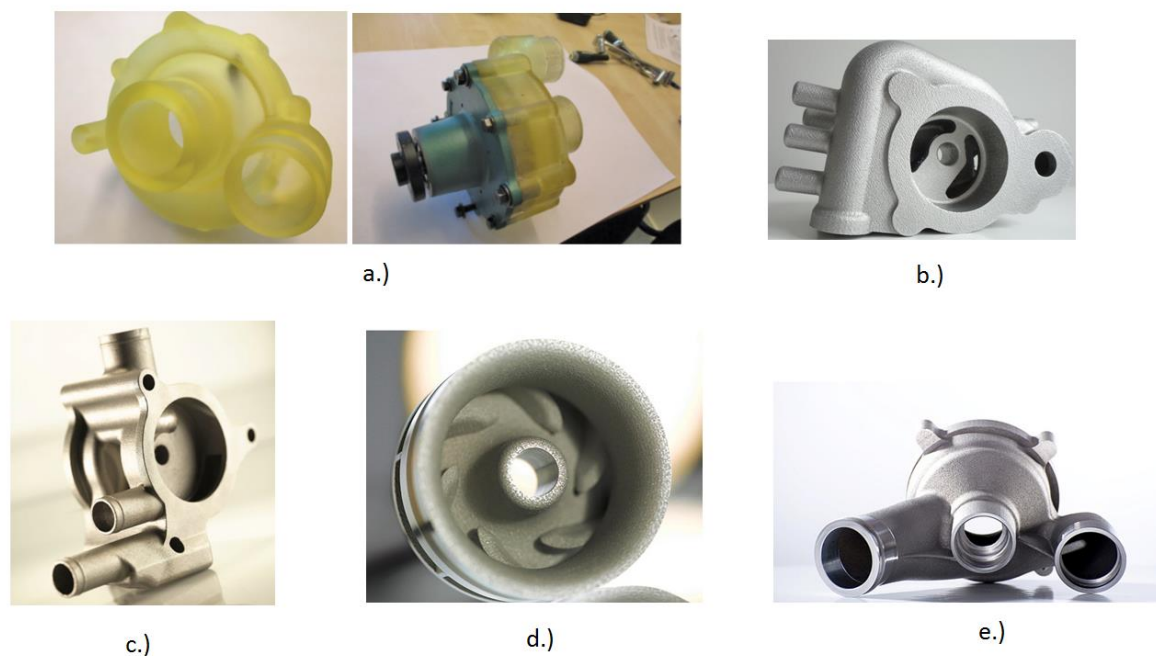


d.)

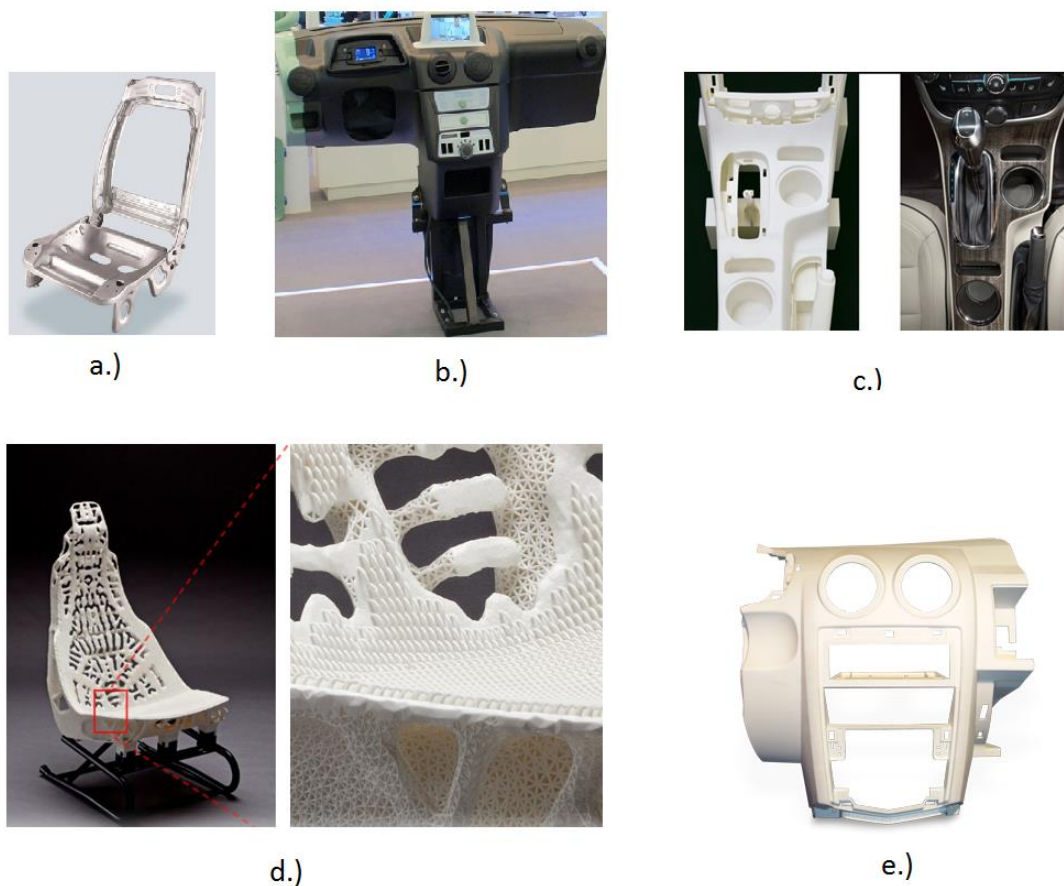
Slika 2.29. Dijelovi ispušnog sustava: a.) nastavak ispušne cijevi [34], b.) ispušni sustav formule [41], c.) ispušni sustav komplicirane geometrije [42], d.) ispušni sustav prilagođenog oblika [43]



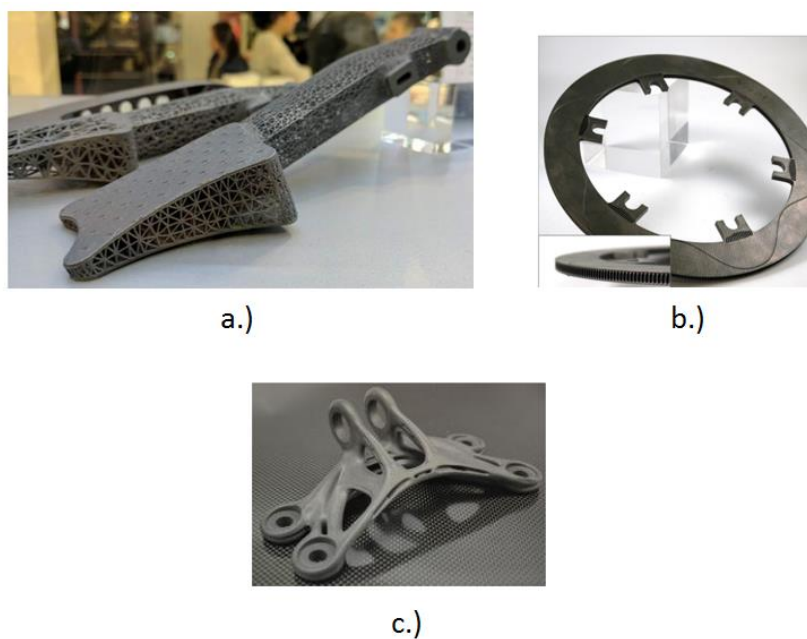
Slika 2.30. Dijelovi aerodinamike: a.) krilce (FDM – ULTEM 9085) [44], b.) aerodinamički tunel formule (SLA) [44], c.) prednje krilo formule (SLS) [45]



Slika 2.31. Pumpni sustavi: a.) kućište vodene pumpe (PolyJet) uz kombinaciju s dijelom izrađenim klasičnim postupkom [44], b.) pumpa vode (SLM) [34], c.) kućište pumpe za ulje [46], d.) rotor vodene pumpe [47], e.) kućište pumpe [47]



Slika 2.32. Konzole i sjedala: a.) aluminijski okvir sjedala [46], b.) potpuna kontrolna konzola [48], c.) upravljačka konzola (SLA) [49], d.) polimerno sjedalo automobila i struktura (SLS) [50], e.) središnja konzola (SLA) [51]



Slika 2.33. Dijelovi kočionog sustava: a.) pedale formule smanjene mase (SLM – Ti64) [52], b.) disk kočnice (SLM) [53], c.) držač kočnice [54]



a.)



b.)



c.)

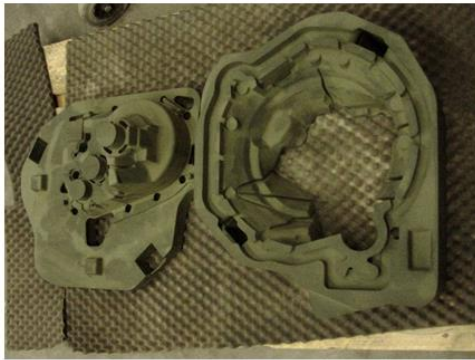


d.)



e.)

Slika 2.34. Dijelovi podvozja: a.) čvorište karoserije (SLM) [46], b.) cijela karoserija [55], c.) spojnica podvozja [56], d.) razdjelnik (SLS) [57], e.) prednja vilica motora [58]



a.)



b.)

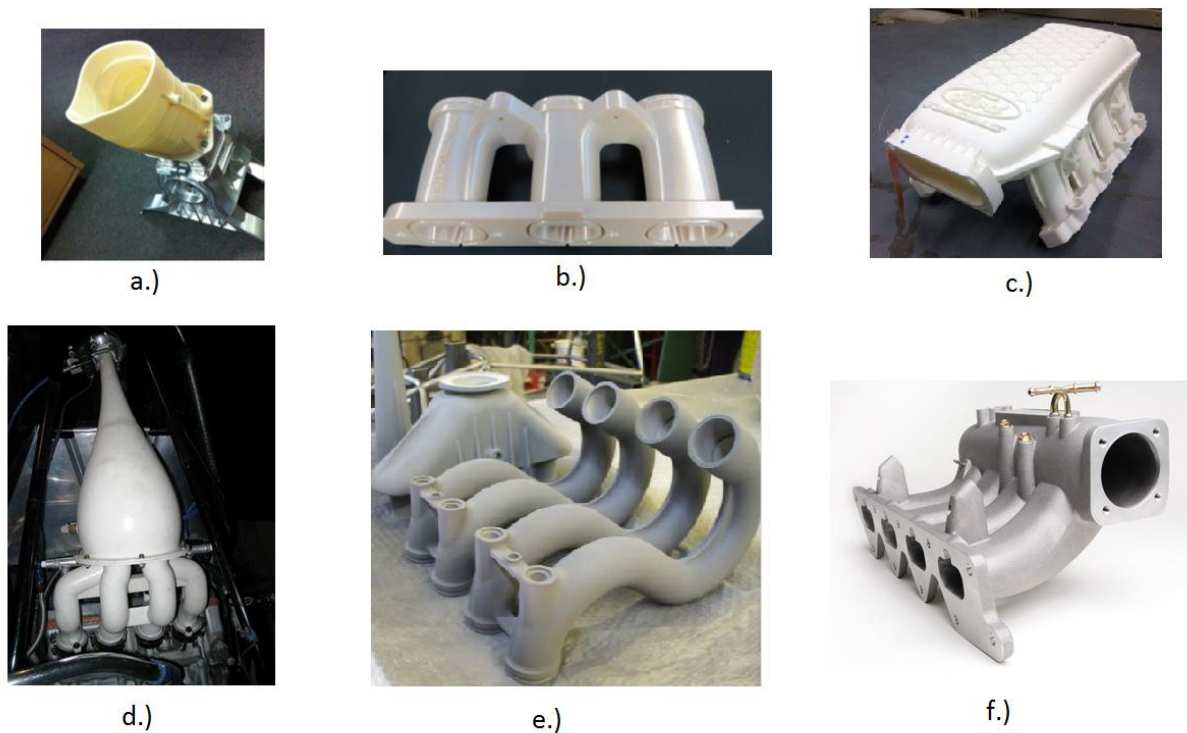


c.)

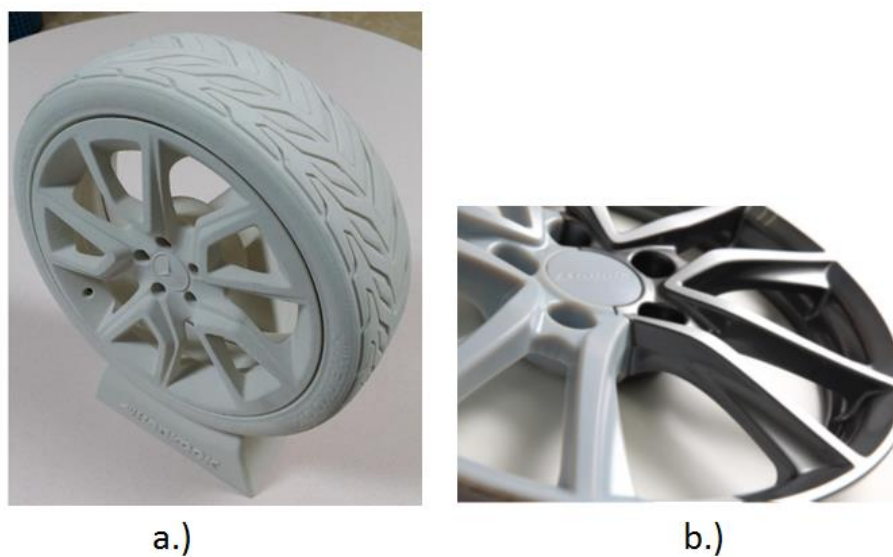


e.)

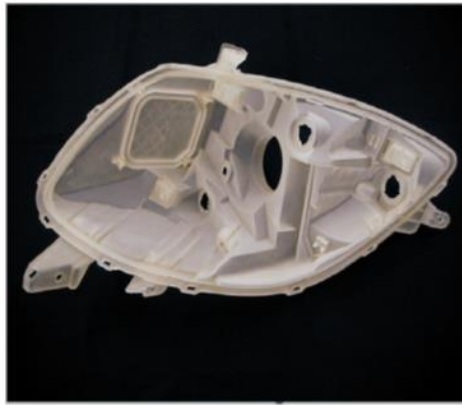
Slika 2.35. Alati i kalupi: a.) kalup za kućište spojke [59], b.) kalup za gume [60], c.) prilagođeni alat [61], d.) alat za montažu (FDM) [36]



Slika 2.36. Dijelovi usisnih sustava: a.) usisnik zraka motora [44], b.) usisnik zraka automobila (FDM – ULTEM 9085) [44], c.) vanjski usisnik zraka [62], d.) prilagođeni usisni razvodnik (SLS) [63], e.) usisnik zraka formule (SLS) [64], f.) usisni razvodnik [65]



Slika 2.37. Gume i naplatci: a.) model gume (PolyJet) [66], b.) automobilski naplatak (PolyJet) [44]



a.)



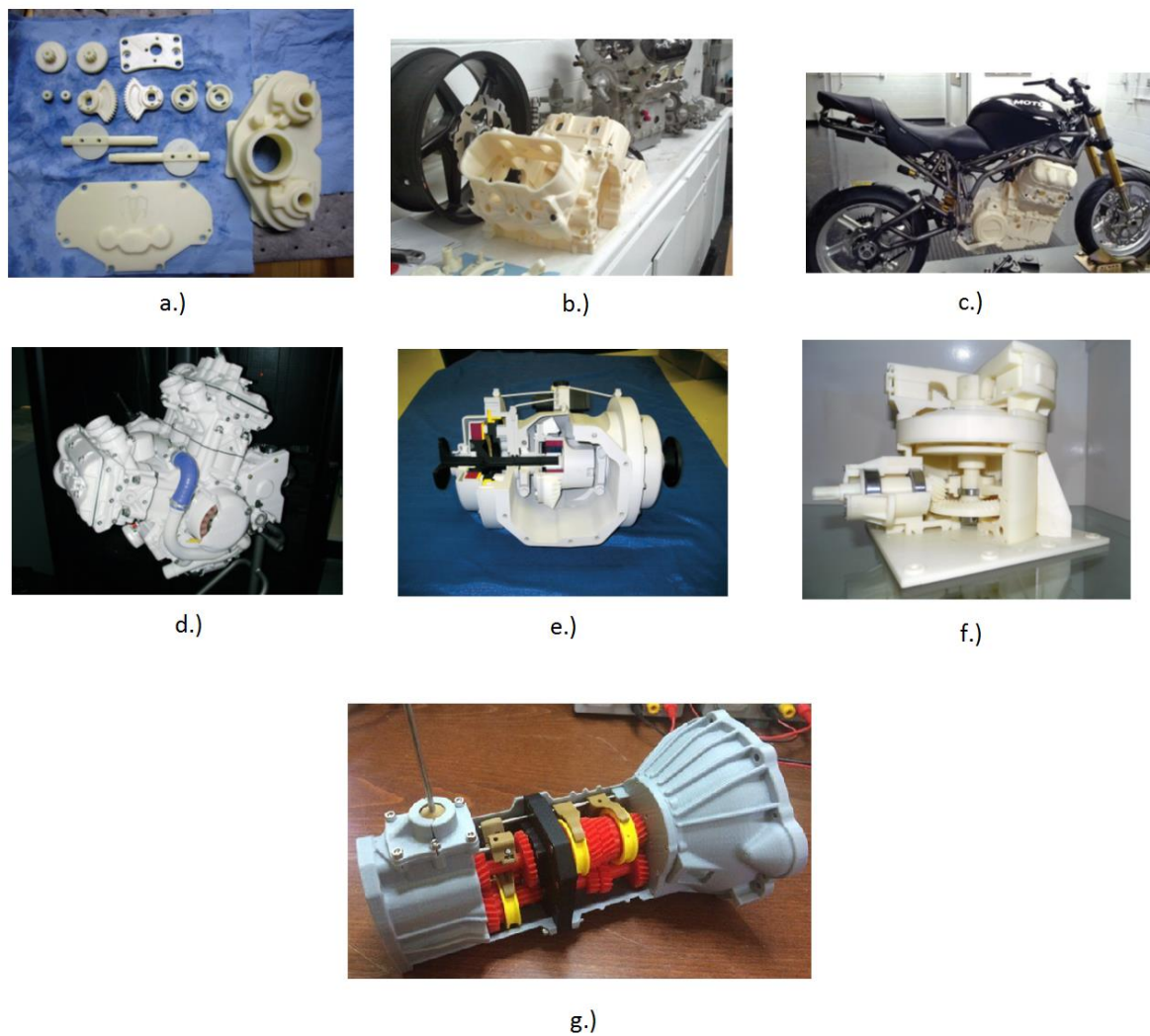
b.)



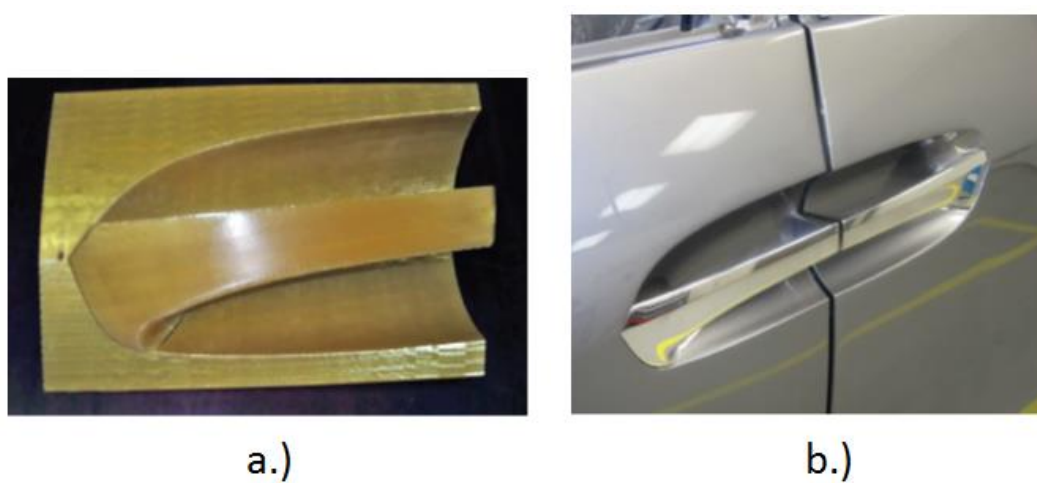
c.)

Slika 2.38. Nosači svjetla: a.) nosač prednjeg svjetla (PolyJet) [44], b.) Nosač svjetla protiv magle (PolyJet) [44], c.) nosač prednjeg svjetla (SLS) [63]





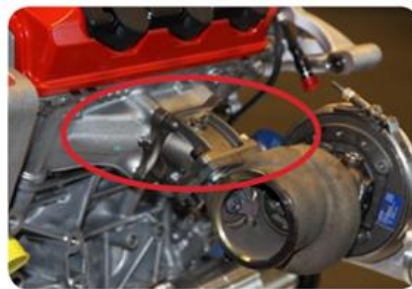
Slika 2.39. Različiti prototipovi: a.) dijelovi motora (FDM - PC) [44], b.) blok motora (FDM) [44], c.) ugrađeni prototip motora (FDM) [44], d.) kompletan prototip motora motocikla (FDM) [44], e.) prototip kvačila (FDM) [44], f.) prototip prijenosa [44], g.) prototip prijenosa [67]



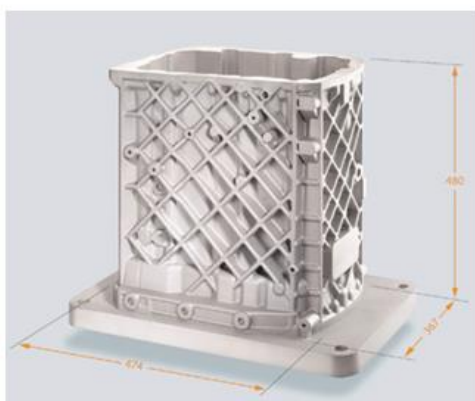
Slika 2.40. Prototip kvake automobila : a.) prototip (FDM), b.) konačan proizvod [44]



a.)



b.)



c.)

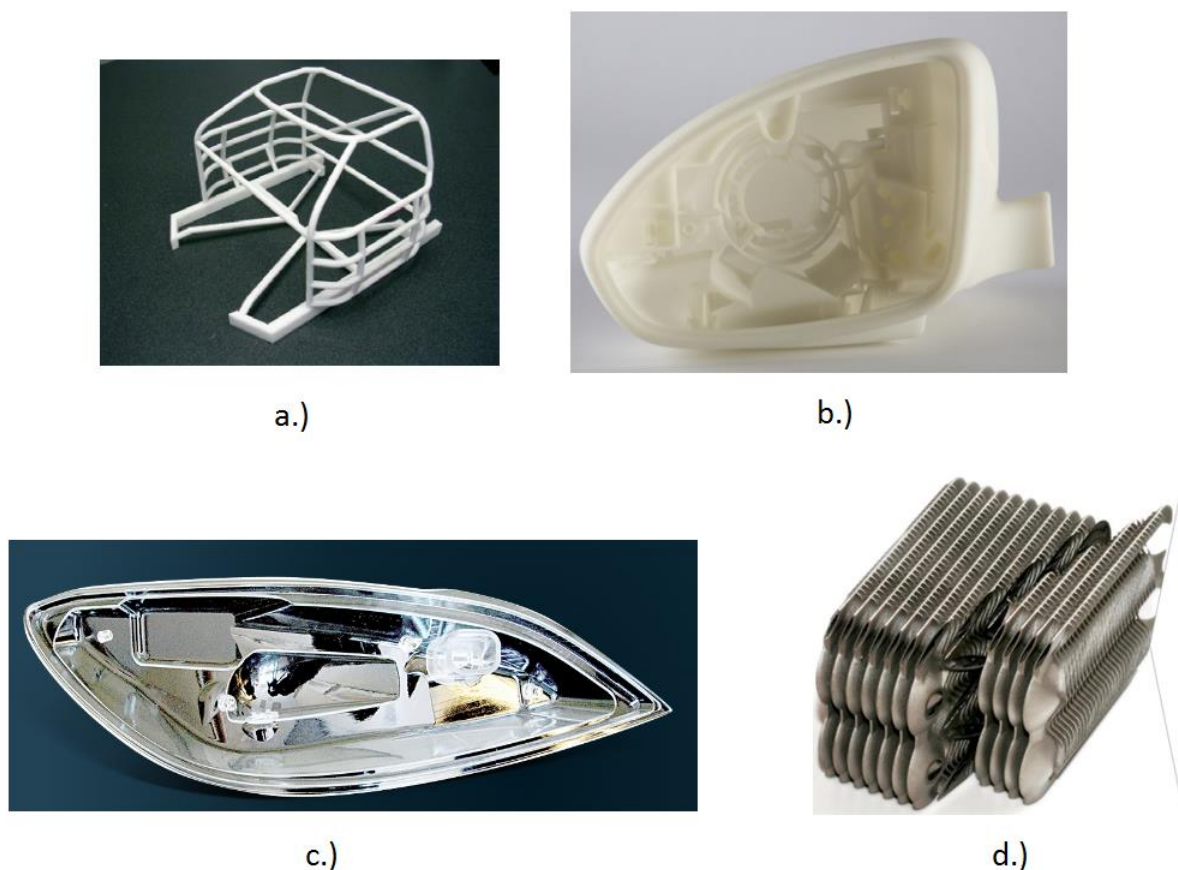


d.)



e.)

Slika 2.41. Dijelovi motora: a.) kućište uljnog filtera [68], b.) ispušni razvodnik [68], c.) kućište mjenjača [46], d.) klip motora [69], e.) turbo punjač motora [70]



Slika 2.42. Ostalo: a.) zaštita vozača u sportskim automobilima (FDM – PC) [44], b.) retrovizor (SLS) [71], c.) prednje svjetlo automobila (SLA) [72], d.) izmjenjivač topline (SLM) [53]

### 2.6.1. Primjeri suradnje u automobilskoj industriji

Aditivna proizvodnja nalazi sve češću primjenu u automobilskoj industriji. U nastavku će biti navedeno nekoliko zanimljivih suradnji između proizvođača automobila i poduzeća koje pružaju usluge proizvodnje ili razvijaju AM industriju.

#### 1. McLaren i Stratasys

Velika imena su uvijek primjenjivala AM postupke za izradu prototipova i alata, ali sve češće primjenjuju postupke za proizvodnju funkcionalnih dijelova. *McLaren* i *Stratasys* su potpisali ugovor o suradnji te će *Stratasys* biti službeni pružatelj AM usluga za različita rješenja u *Formuli 1*. *Stratasys* će raditi s *Grand Prix* timom *McLaren Tehnology* u centru Wokinga u Velikoj Britaniji. Partneri će raditi 3D ispis vizualnih i funkcionalnih prototipova, ali i proizvodnju alata i prilagođenih dijelova. Dijelovi i alati će se posebno konstruirati kako bi se povećala učinkovitost F1 bolida, a istodobno osiguravajući brzu isporuku. [73]

## 2. Audi i EOS

Dvije njemačke tvrtke se udružuju zajedno kako bi razvijali AM postupke za automobilsku industriju. *EOS*, proizvođač SLS i DMLS strojeva će raditi posebne dijelove za luksuzne automobile. *EOS* će također pomoći i omogućiti Audiju razvoj 3D centara u Ingolstadtu. *EOS* će, dakle, ne samo opskrbljivati *Audi* s AM strojevima, nego će i pomoći *Audiju* razvoj i projektiranje odgovarajućih postupaka. Osim toga, *EOS* će školovati stručnjake i tehnologe koji će nakon obuke raditi u AM odjelu *Audija*. [73]

## 3. PSA Group i Divergent

*Divergent* ima cilj pomoći *PSA Groupi* razviti efikasniji proces proizvodnje pomoću AM postupaka. *Divergent* bi razvijao različite prototipove za *PSA Groupu* i pokušao implementirati modularni proces proizvodnje, pomoću AM postupaka, nazvan *Divergent proizvodna platforma*. *Divergent* će s *PSA Groupom* raditi konstruiranje, razvoj i proizvodnju funkcionalnih prototipova automobila koji će biti temeljito testirani prije puštanja konačnog modela u prodaju, a to će biti objedinjeno u jednu testnu fazu u trajanju od 3 godine. Na kraju će *PSA Groupa* biti u stanju pomoću *Divergent proizvodne platforme* proizvesti oko 15 000 vozila godišnje. [74]

## 4. BMW Group

*BMW Groupa* je rano usvojila AM postupke te ih primjenila za izradu prototipova, alata i različita testiranja. U 2010. godine, *BMW* pokreće svoj AM odjel te su proizvodili dijelove pumpe za vodu koja se ugrađivala u trkaće automobile. Također *Rolls-Royce* primjenjuje AM postupke za izradu posebnih dijelova luksuznih automobila. *Rolls-Royce Phantom* ima oko 10 000 dijelova izrađenih AM postupcima. *BMW Groupa* je sklopila ugovor s *HP-om* za razvoj i dobavu AM strojeva. [73]

## 5. Michelin i Fives

Nakon dugotrajnih istraživanja na području AM postupaka *Michelin* i inženjerska tvrtka *Fives* osnivaju tvrtku *AddUp* jer je *Michelin* utvrdio da AM strojevi na tržištu nisu zadovoljavali njihove kriterije. *AddUp* je tvrtka koja se bavi razvojem AM postupka jer ih *Michelin* želi primjeniti za izradu novih kalupa za proizvodnju gume. Uz daljnji razvoj i poboljšanje postupaka, *AddUp* će omogućiti *Michelinu* sposobnost proizvodnje novih kalupa koji će omogućiti proizvodnju guma posebnog dizajna. [74]

### 3. ADITIVNA PROIZVODNJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI U HRVATSKOJ

U Hrvatskoj ne postoji tipična automobilska industrija, ali se dvije tvrtke bave razvojem električnih automobila (*DOK-ING* i *Rimac Automobili*). Tvrtke pokušavaju održati korak sa svjetski poznatim proizvođačima automobila te su iz tog razloga počeli upotrebljavati aditivne postupke. Sve je to u fazi testiranja i upotrebe za male serije, izrada jednostavnijih prototipova dijelova automobila dok za zahtjevnije dijelove imaju uslugu vanjskih suradnika. Aditivni postupci zahtijevaju velika početna ulaganja što veoma teško pada navedenim tvrtkama jer one nisu u fazi serijske proizvodnje. U sljedećim odlomcima bit će opisani postupci i način primjene aditivnih postupaka u te dvije HR tvrtke.

#### 3.1. *DOK-ING*

*DOK-ING* je hrvatska tvrtka osnovana 1991. godine i registrirana za razvoj i proizvodnju robotiziranih posebnih uređaja i opreme (sustavi posebne namjene za zaštitu ljudskih života u najopasnijim okruženjima, prvenstveno za razminiranje, rudarstvo i vatrogastvo). Primarna proizvodnja je u Zagrebu, dok se sekundarni pogoni nalaze u Slunju. *DOK-ING* posjeduje poslovnice u SAD-u i južnoj Africi.

Uz navedenu proizvodnju *DOK-ING* posjeduje odjel zadužen za razvoj i proizvodnju električnih automobila. *DOK-ING* je dizajnirao i proizveo prvi hrvatski električni automobil (*DOK-ING XD*).

##### 3.1.1. Aditivna proizvodnja u *DOK-ING*

*DOK-ING* primjenjuje postupak selektivnog laserskog srašćivanja (SLS). Posjeduju *EOS*-ov stroj *EOSINT P385* (slika 3.1). *DOK-ING* upotrebljava stroj za izradu funkcionalnih prototipova za svoj električni automobil ili za izradu prezentacijskih modela svojih proizvoda (slika 3.2). Tvrtka se odlučila za postupak SLS zbog toga jer njihov svaki model je različit i nikad ne zaživi u serijskoj proizvodnji te si zbog toga izrađuju prilagođene dijelove i jer su im troškovi manji ako si sami izrade pojedine dijelove nego da naručuju od vanjskih dobavljača. Ovakvim načinom proizvodnje lako prilagode dijelove (fleksibilni su).



Slika 3.1. DOK-ING – EOSINT P385 [76]



Slika 3.2. Prezentacijski modeli izrađeni SLS-om

Najčešće aditivnu proizvodnju koriste za izradu prezentacijskih modela (slika 3.2) i za izradu funkcionalnih prototipova, kao npr. različite kutije za elektroniku (slika 3.7), nosači za prednja i stražnja svjetla (slika 3.4, slika 3.5 i slika 3.6), neke dijelove unutrašnjosti (utor za autoradio i kvaka za otvaranje) i dijelove podvozja (slika 3.3).

Kao materijal upotrebljavaju poliamid (PA).

Izrađeni dijelovi imaju sljedeće karakteristike: gruba površina zbog koje je potrebna naknadna obrada (najčešće bojanje), dobra žilavost dijelova.

Neupotrebjen poliamid se može ponovno upotrijebiti, ali se tada dobiva veoma slaba površina (reljefna) pa se najčešće miješa s novim prahom kako bi se efekt smanjio. Najčešće se tako reciklirani materijal upotrebljava za izradu prezentacijskih modela jer se kod njih ne zahtjeva visoka kvaliteta površine.



Slika 3.3. Dijelovi podvozja



Slika 3.4. Prednji i zadnji nosači za svjetla (neobrađeni)

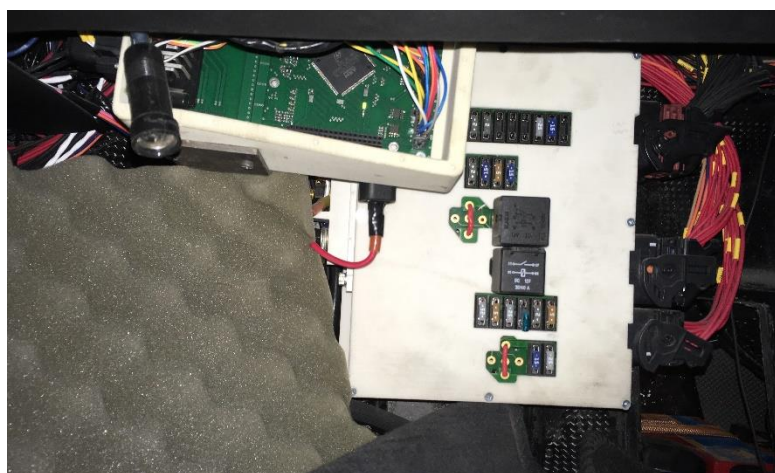


Slika 3.5. Ugrađena prednja svjetla (nosači) kod različitih modela





Slika 3.6. Ugrađeno stražnje svjetlo



Slika 3.7. Kutije elektronike

*DOK-ING LOOX* (slika 3.8) je posljednji proizvedeni njihov model. To je luksuzni gradski automobil pogonjen s 2 ili 4 elektromotora simetrično integrirana u prednji i stražnji dio automobila. Domet automobila je preko 200 km, a pogonjen je električnim motorima snage 45 ili 90 kW. Podvozje električnog automobila je izrađeno od aluminija dok je eksterijer (branici i vrata) izrađen od kompozita s ugljičnim vlaknima.



Slika 3.8. *DOK-ING LOOX*

### 3.2. Rimac Automobili

*Rimac Automobili* je hrvatska tvrtka za proizvodnju sportskih električnih automobila osnovana 2009. godine u Svetoj Nedelji nedaleko od Zagreba. Tvrtka se bavi razvojem i proizvodnjom sportskih električnih automobila i baterijskih paketa. Njihov najpoznatiji proizvod je *Concept\_One* s kojim su stekli svjetsku popularnost. Nakon *Concept\_One*-a su proizveli model *Concept S*. *Rimac Automobili* nisu tipična automobilska industrija, ali su jedan od predstavnika Hrvatske u tom području u svijetu.

*Rimac Automobili* također prate i trend razvoja aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji te su počeli proizvoditi neke dijelove električnog automobila tim postupcima. Neke dijelove proizvode u vlastitom pogonu, a za neke dijelove koriste usluge izrade.

Trenutno su u *Concept\_One*-u aditivnih postupcima izrađena: kućišta za prednja (slika 3.9) i zadnja svjetla (slika 3.10), display cluster (nosač za 2 ekrana i elektroniku), neki dijelovi u baterijskim paketima (distanceri, izolatori konektora), kućišta za senzore i elektroniku (slika 3.12) te još neke sitnice u retrovizoru.

U vlastitom pogonu primjenjuju uređaje *Zortax M200* i *Ultimaker 2* (postupak FDM) koji služe za izradu prototipova, a za ostale dijelove imaju vanjske usluge.

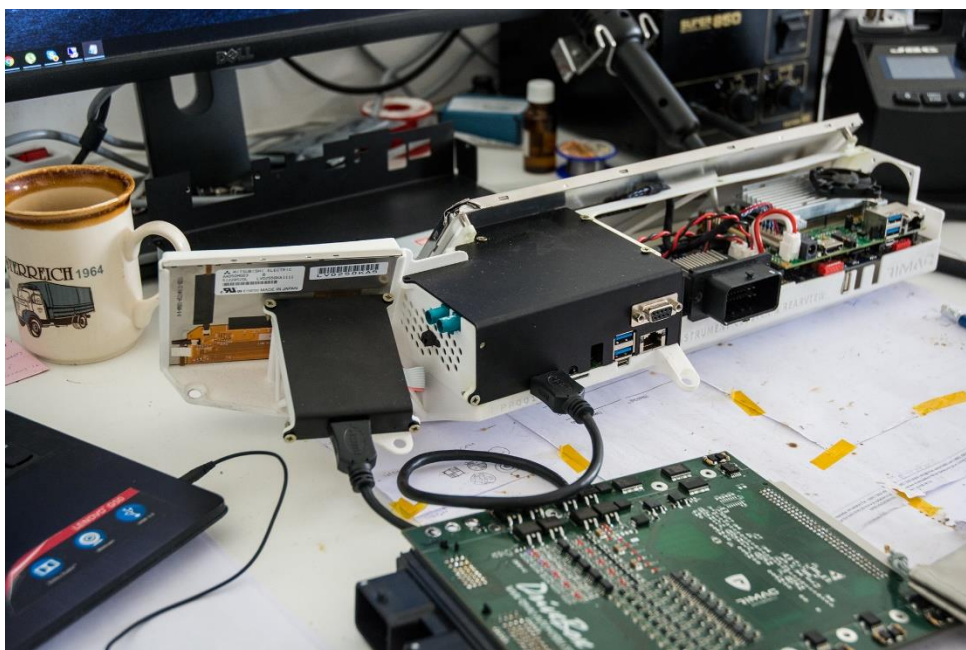
*Rimac Automobili* najviše primjenjuje SLS za funkcionalne i tehničke prototipove, FDM za geometrijske i konceptne prototipove i SLA uglavnom za tehničke prototipove u unutrašnjosti vozila.



Slika 3.9. Nosač prednjeg svjetla



Slika 3.10. Nosač zadnjeg svjetla



Slika 3.11. Dijelovi kućišta elektronike

#### 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Poanta u modelarstvu, u ovom slučaju kod izrade automobila, da je u današnje vrijeme sve personalizirano i da krajnji kupac želi sam izabrati ili modelirati proizvod koji odgovara njegovim zahtjevima.

Cilj eksperimentalnog dijela je proizvesti više različitih modela dijelova automobila koji se mogu modelirati i naknadno montirati na model automobila kako bi se što vjernije prikazale mogućnosti aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji.

Za primjer će biti korišteni modeli automobila u mjerilu 1:27, *Ferrari 250 LM* (slika 4.1) i *Ferrari 456 GT* (slika 4.2 ).



Slika 4.1. *Ferrari 250 LM*



Slika 4.2. *Ferrari 456 GT*

#### 4.1. Izrada dijelova

Izgled i stanje modela automobila prije preuređenja prikazane su na slikama 4.3 i 4.4.



Slika 4.3. *Ferrari 250 GT* – početno stanje



Slika 4.4. *Ferrari 456 GT* – početno stanje

Načela aditivne proizvodnje su opisana u poglavlju 1.3., a faze aditivne proizvodnje su prikazane na slici 1.6.

Najbitniji dio kod izrade dijelova automobila je izrada 3D CAD modela. Modeli automobila su imali neke veoma složene dijelove koje je trebalo što točnije preslikati u 3D CAD model i dodati željene preinake.

Popis dijelova za izradu:

*Ferrari 250 LM:*

- Naplatak + guma – 4 komada
- Prednje svjetlo – 2 komada
- Prednja maska – 1 komad
- Retrovizor – 2 komada
- Spojler krovni – 1 komad
- Zadnja maska – 2 komada
- Zadnje svjetlo – 2 komada
- Zadnji spojler – 1 komad

Na postojećem modelu nije postojao retrovizor i zadnji spojler pa je odlučeno da će se oni dodatno modelirati i ugraditi na automobil.

3D CAD modeli dijelova za izradu prikazani su na slici 4.5.

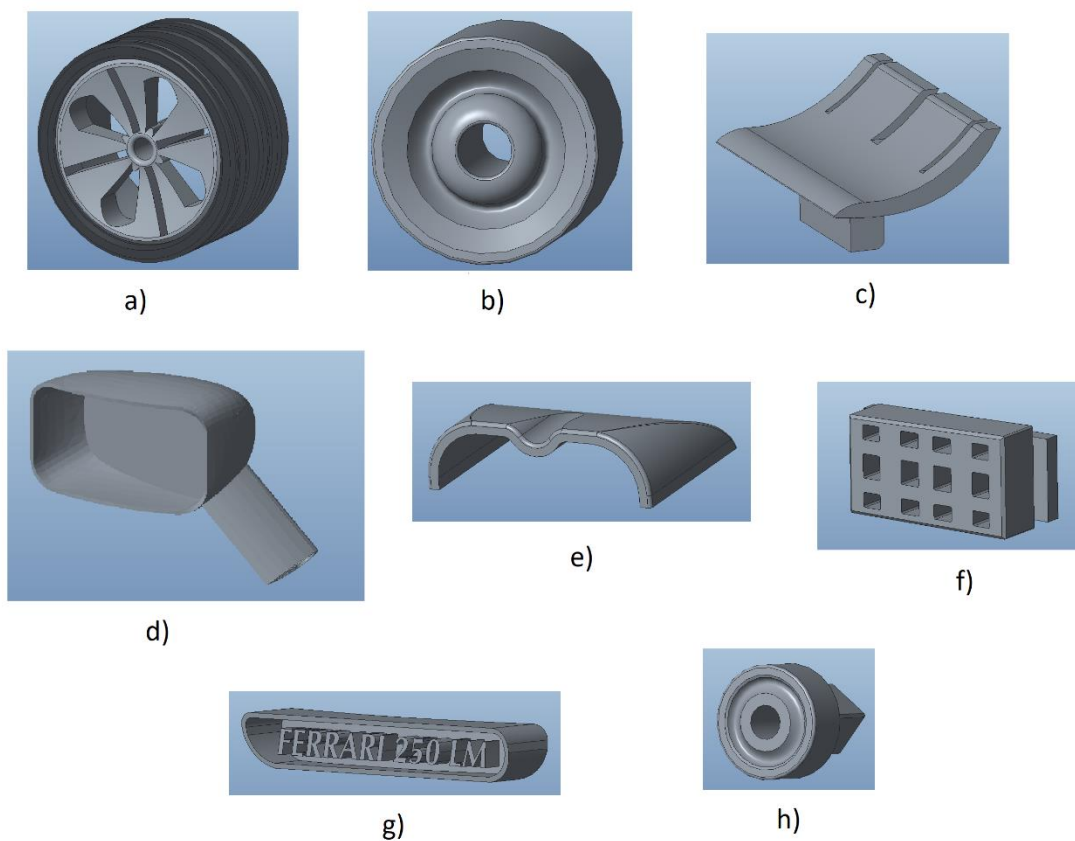
*Ferrari 456 GT:*

- Naplatak + guma – 4 komada
- Auspuh – 2 komada
- Maglenke – 2 komada
- Spojler krovni – 2 komada
- Zadnje svjetlo – 2 komada
- Prednja maska – 1 komad

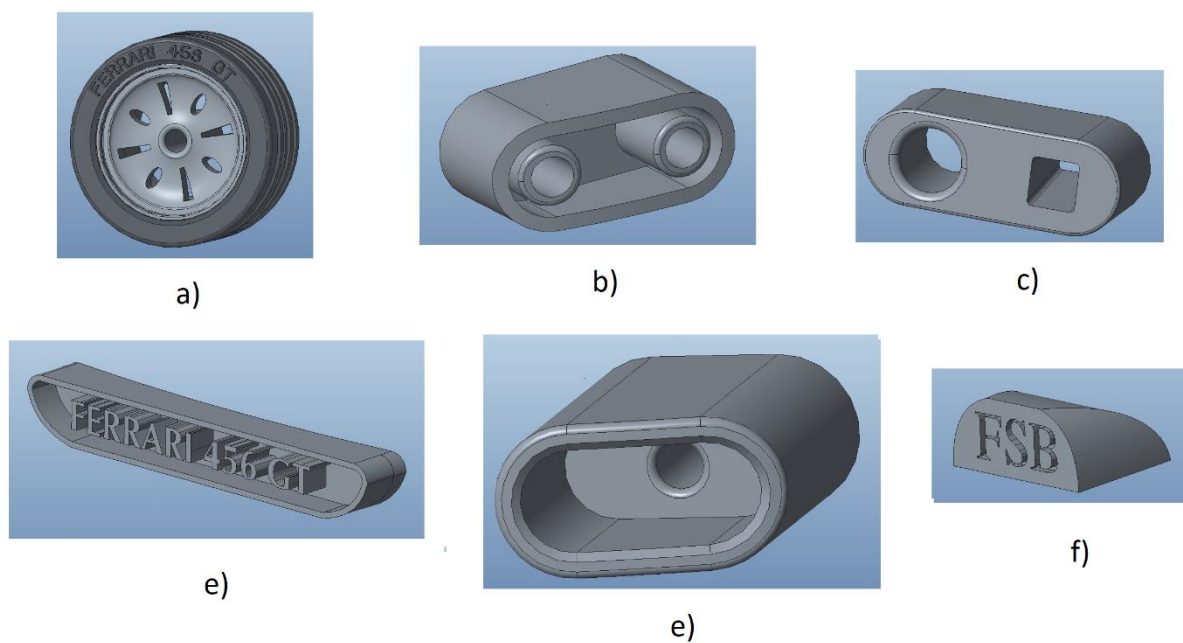
3D CAD modeli dijelova su prikazani na slici 4.6.

Dodatno je izrađen treći model naplatka + gume (4 komada) koji se može montirati na oba tipa automobila, a prikazan je na slici 4.7.

Zbog posebnog oblika i dimenzija za oba tipa automobila bit će izrađen nosač baterija za rasvjetu – 2 komada (slika 4.8).



Slika 4.5. Modeli dijelova za *Ferrari 250 LM* : a) naplatak s gumom, b) prednje svjetlo, c) zadnji spojler, d) retrovizor, e) krovni spojler, f) zadnja maska, g) prednja maska, h) zadnje svjetlo

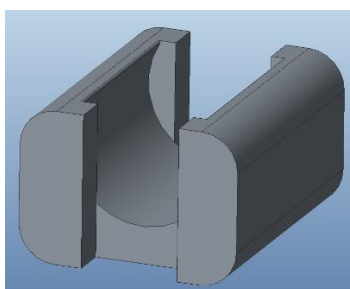


Slika 4.6. Modeli dijelova za *Ferrari 456 GT* : a) naplatak s gumom, b) zadnje svjetlo, c) prednje maglenke, d) prednja maska, e) auspuh, f) krovni spojler



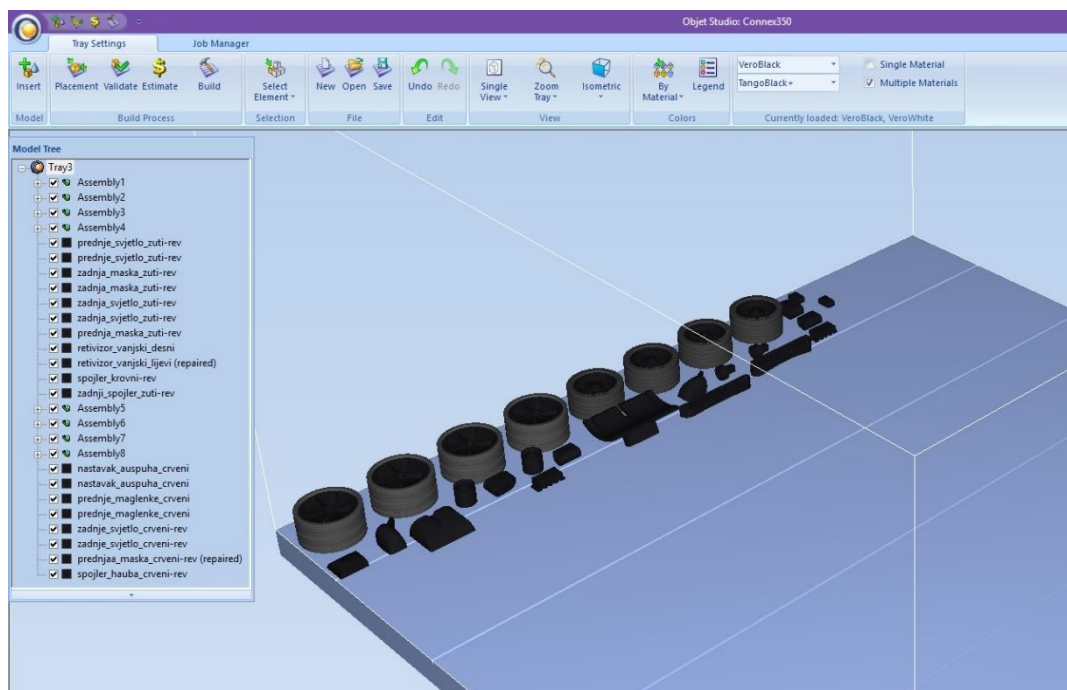


Slika 4.7. Treći model naplatka i gume za oba tipa automobila: a) 3D CAD model, b) 3D tiskani model



Slika 4.8. Držać baterija

Svi dijelovi su izrađeni na stroju *Connex 350* (PolyJet postupak), proizvođač *Stratasys*. Debljina sloja iznosi 0,016 mm, a temperatura glave je iznosila 73 °C. Svi dijelovi su rađeni od materijala *VeroBlack* i to sa sjajnom (e. *Glossy*) gornjom površinom, tj. površinom koja je na nekim dijelovima na automobilu vidljiva pa zbog toga moraju biti orijentirani na način da je vidljiva površina okrenuta prema gore (slika 4.9). Guma je izrađena od materijala *FLX2140-DM* (tvrdoća Shore A 40) za *Ferrari 456 GT*, *FLX2150-DM* (tvrdoća Shore A 50) za *Ferrari 250 LM*. *FLX2140-DM* i *FLX2150-DM* je materijal koji je kombinacija materijala *VeroBlack* i *TangoBlack+*. Bitno je napomenuti da se naplatak i guma izrađuju istovremeno jer su modelirani kao čvrsti dosjed no aditivna proizvodnja omogućuje da se ta dva dijela rade i kao dva odvojena proizvoda, što je još jedan pokazatelj fleksibilnosti kod aditivne proizvodnje.



Slika 4.9. Orijentacija dijelova

Na slici 4.10 su prikazani dijelovi automobila na radnoj podlozi stroja tijekom izrade.



Slika 4.10. Dijelovi tijekom izrade na radnoj podlozi stroja

#### 4.2. Modeli automobila nakon ugradnje izrađenih dijelova

Na slikama 4.11 i 4.12 su prikazani modeli automobila s ugrađenim dijelovima koji su navedeni i opisani u poglavlju 4.1. Dijelovi su na karoseriju pričvršćeni pomoću ljepila na bazi cijanoakrilata.

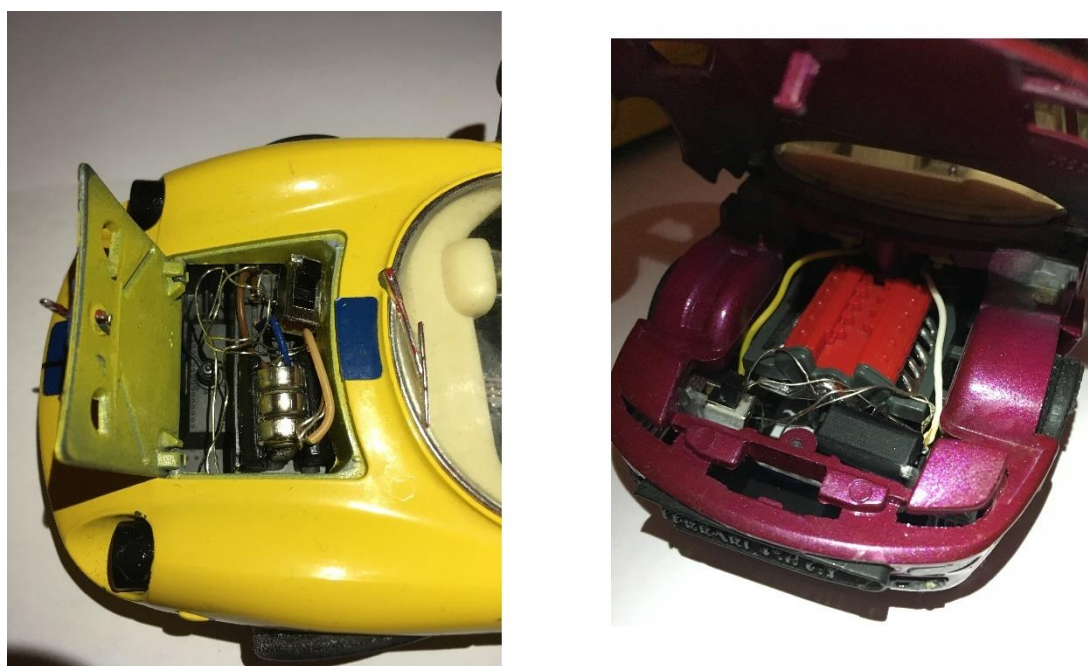


Slika 4.11. *Ferrari 250 LM* – nakon ugradnje dijelova

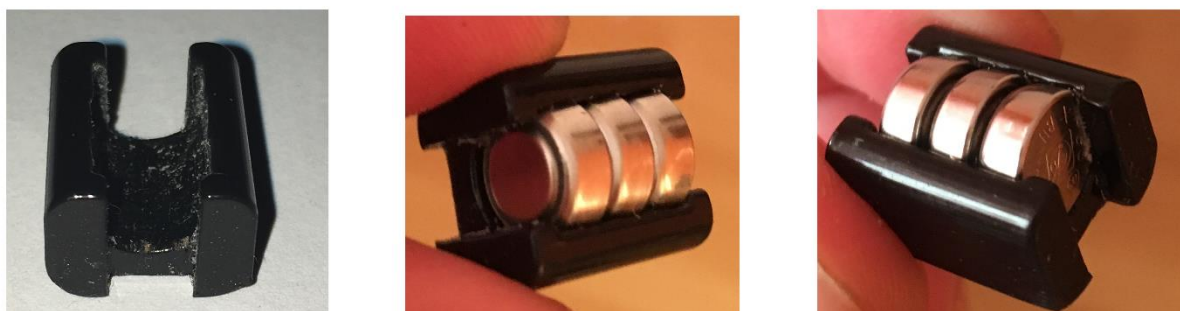


Slika 4.12. *Ferrari 456 GT* – nakon ugradnje dijelova

Kao dodatak kod oba modela automobila bit će ugrađena LED rasvjeta (slika 4.15). LED svjetla će biti ugrađena u prednja i stražnja svjetla kod *Ferrari-a 250 LM* te u prednje maglenke i stražnja svjetla kod *Ferrari-a 456 GT*. LED rasvjeta se napaja pomoću ugrađenih baterija u posebno modeliranom i izrađenom držaču baterija. Na slici 4.13 su prikazane ugrađene baterije u oba modela automobila, a na slici 4.14 je prikazan držač baterija. Ugradnja svjetala pokazuje još jednu modularnost i bolji pristup za personalizaciju dijelova primjenom aditivne proizvodnje (slika 4.15). Kod ovih modela nema prozirnih dijelova, ali je potrebno napomenuti da se mogu izraditi i prozirni dijelovi kao npr. poklopac svjetla (slika 4.16).



Slika 4.13. Ugrađene baterije za rasvjetu



Slika 4.14. Držač baterija



Slika 4.15. Automobili s ugrađenim svjetlima



Slika 4.16. Prozirni poklopac svjetla

### 4.3. Pogreške kod modeliranja i proizvodnje dijelova

Prilikom konstruiranja i proizvodnje došlo je do nekih grešaka, kao npr.: pogrešne dimenzije i oblik (slika 4.17, 4.18, 4.19, ), kriva orijentacija dijelova na radnu podlogu (4.20).



Slika 4.17. Greška: debljina gume – lijeva je pogrešna, desna je smanjena i prilagođena debljina



Slika 4.18. Pogrešan oblik i dimenzije prednje maske – kronološki slijed konstruiranja



Slika 4.19. Nedovoljna duljina nosača zadnjeg spojlera



Slika 4.20. Pogrešna orijentacija na radnoj podlozi stroja

#### 4.4. Troškovi aditivne proizvodnje i injekcijskog prešanja upotrebom 3D tiskanog alata

U ovom poglavlju bit će uspoređeni troškovi aditivne proizvodnje za pojedinačnu proizvodnju dijelova i injekcijskog prešanja s alatom koji je izrađen aditivnom proizvodnjom i to za malu seriju (serija od 200 komada, tj. komplet za 50 automobila) na primjeru naplatka automobila (bez gume).

S obzirom da je riječ o personaliziranoj proizvodnji i malim serijama mogućnosti izrade su: aditivna proizvodnja, injekcijsko prešanje ili kombinacija s kalupom načinjenim aditivnom proizvodnjom. Za daljnju analizu bit će izabran naplatak bez gume jer se na njemu mogu prikazati mogućnosti aditivne proizvodnje (fleksibilnost po pitanju dizajna i veličine za personalizirane zahtjeve). Guma se neće izrađivati jer se naplatak izrađuje standardnih dimenzija pa postoje gume standardnih dimenzija.

Svi dijelovi se izrađuju na stroju *Connex 350*, proizvođač *Stratasys*. Debljina sloja iznosi 0,016 mm, a temperatura glave 73 °C.

#### Troškovi aditivne proizvodnje dijelova automobila

U tablici 4.1 i 4.2 su prikazani troškovi izrade svih dijelova za automobil za pojedini model te oba modela zajedno. U obzir su uzeti materijal, vrijeme izrade i cijena izrade (uračunat PDV). U cijenu je uračunat cjelokupni trošak: cijena materijala, cijena sata stroja, cijena radnika, cijena čišćenja i zarada.

Tablica 4.1. Troškovi aditivne proizvodnje svih dijelova

|                       |                    | <i>Ferrari 250 LM</i> | <i>Ferrari 456 GT</i> | Dijelovi oba modela istovremeno | Dijelovi oba modela istovremeno + treći model naplatka |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|--|
| <b>MATERIJAL</b>      | TangoBlack+        | 15 g                  | 16 g                  | 30 g                            | 39 g   |
|                       | VeroBack           | 21 g                  | 15 g                  | 34 g                            | 46 g   |
|                       | Potporna struktura | 35 g                  | 19 g                  | 51 g                            | 72 g   |
| <b>VRIJEME IZRADE</b> |                    | 1 sat i 17 minuta     | 1 sat i 10 minuta     | 2 sata i 11 minuta              | 2 sata i 30 minuta                                     |
| <b>CIJENA IZRADE</b>  |                    | 861,53 kn             | 762,02 kn             | 1255,00 kn                      | 1468,84 kn   |



Analizirali smo troškove proizvodnje dijelova oba modela istovremeno kako bi pokazali da se aditivnom proizvodnjom mogu istovremeno izrađivati dijelovi za oba modela automobila, a time se smanjuju troškovi proizvodnje za oko 25 %.

Tablica 4.2. Troškovi izrade tri modela naplatka i guma

|                       |                    | <b>Naplatak + gume</b> |
|-----------------------|--------------------|------------------------|
| <b>MATERIJAL</b>      | TangoBlack+        | 15 g                   |
|                       | VeroBack           | 21 g                   |
|                       | Potporna struktura | 35 g                   |
| <b>VRIJEME IZRADE</b> |                    | 1 sat i 17 minuta      |
| <b>CIJENA IZRADE</b>  |                    | 861,53 kn              |

### **Troškovi aditivne proizvodnje kalupa za injekcijsko prešanje sva tri tipa naplatka**

U tablici 4.3 su prikazani troškovi aditivne proizvodnje obje polovice kalupa, pomičnog i nepomičnog dijela koji su prikazani na slici 4.21. Upotrebljava se digitalni materijal RGD515 i RGD535. Na slici 4.22 su prikazana oba dijela kalupa na radnoj podlozi stroja. Gornja površina oba dijela kalupa je sjajna (e. *Glossy*), tj. unutarnja kalupna šupljina.

Tablica 4.3. Troškovi aditivne proizvodnje pomičnog i nepomičnog dijela kalupa

|                       |                    | <b>Kalup</b>       |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| <b>MATERIJAL</b>      | RGD535             | 206 g              |
|                       | RGD515             | 325 g              |
|                       | Potporna struktura | 53 g               |
| <b>VRIJEME IZRADE</b> |                    | 7 sati i 10 minuta |
| <b>CIJENA IZRADE</b>  |                    | 5475,98 kn         |

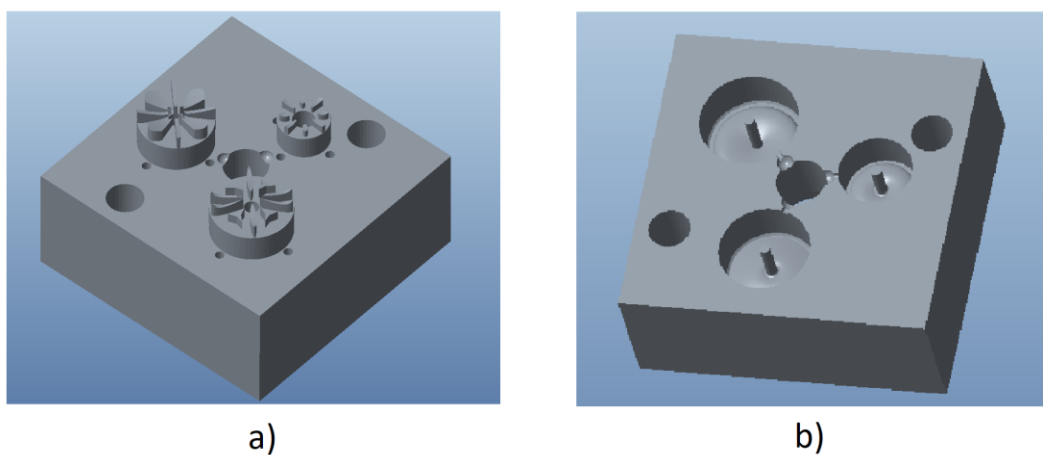
Uz troškove navedene u tablici 4.3 treba predvidjeti dodatnih 1000 kn dodatnih elemenata (uljevni tuljak, zdenac, izbacivala, vodeći stupovi, vodeće vitke, izbacivalo i vijci) koji bi se ugradili kao originalni elementi od čelika. Još se treba dodati 550 kn troškova konstruiranja kalupa.

Ovisno o seriji treba predvidjeti otprilike 17,5 kn/kg materijala, 2 ciklusa u minuti i cijenu ubrizgavalice oko 200 kn/sat.

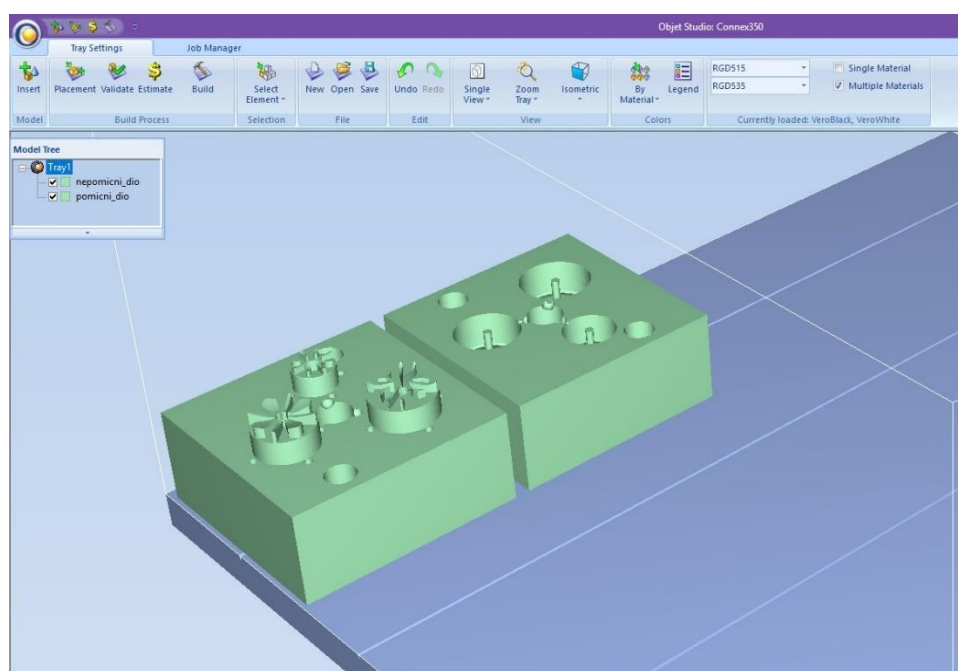
Na sve ove troškove treba još dodati trošak montaže alata i postavljanje na ubrizgavalicu koja iznosi oko 1000 kn.

Dolazi se do izračuna ukupnog troška injekcijskim prešanjem primjenom kalupa izrađenim aditivnom proizvodnjom koji iznosi oko 8200 kn (uračunat PDV).

Kalup je namijenjen za izradu 200 komada naplatka, tj. za 50 modela automobila jer su u kalupnoj šupljini 3 različita tipa naplatka.



Slika 4.21. Modeli dijelova kalupa za injekcijsko prešanje: a) pomični dio, b) nepomični dio



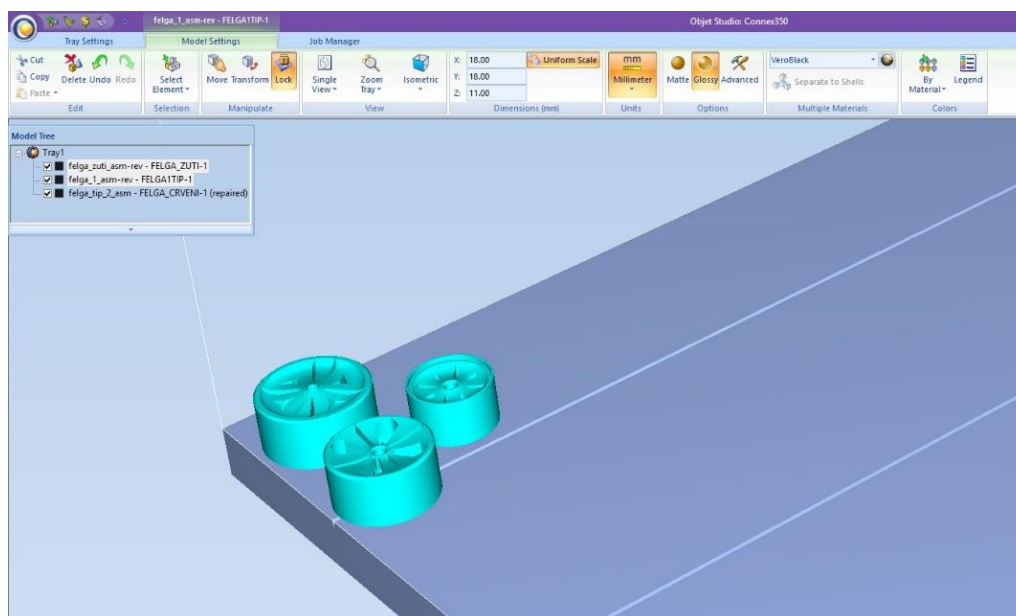
Slika 4.22. Modeli dijelova kalupa na radnoj podlozi stroja

### Troškovi aditivne proizvodnje za sva tri tipa naplatka

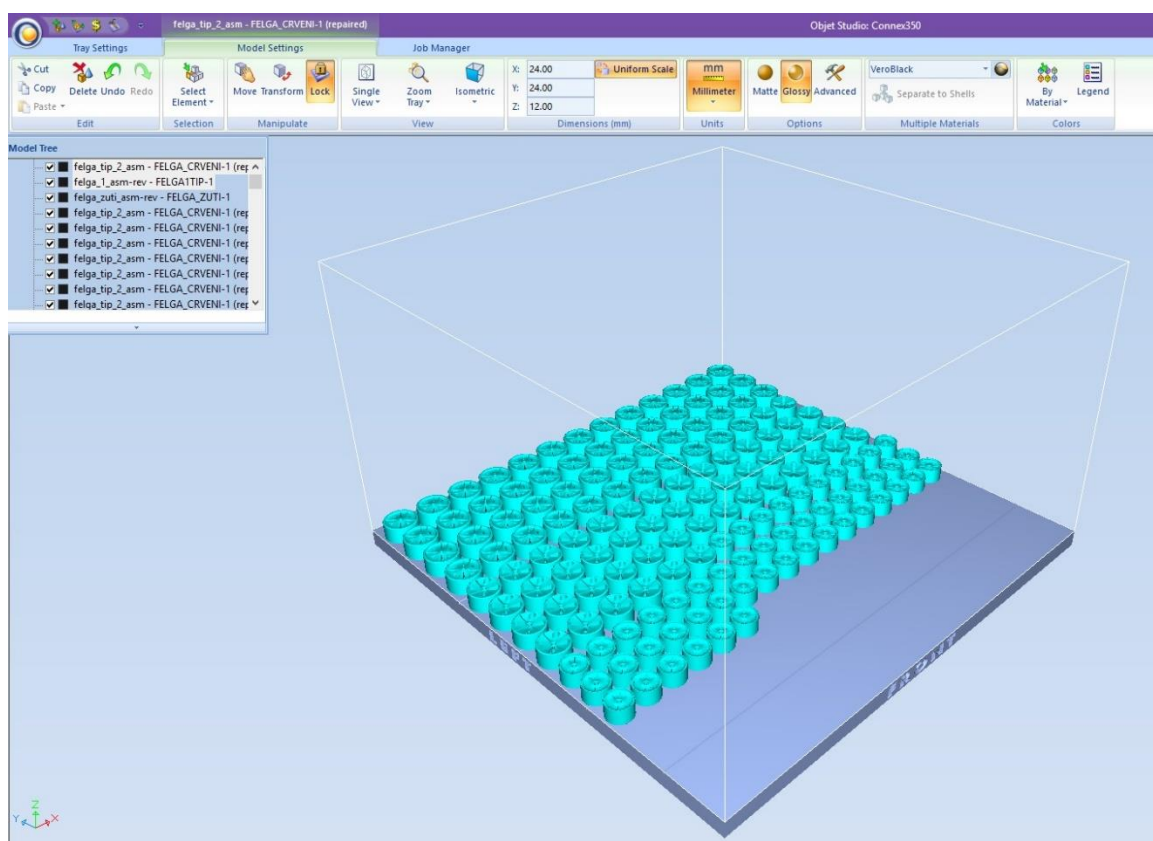
U tablici 4.4 su prikazani troškovi aditivne proizvodnje tri tipa naplatka (po 1 komad) koje su prikazane na slici 4.23 i troškovi izrade 50 različitih kompleta felgi (4 komada = 1 komplet), tj. 200 komada naplatka koji su prikazani na slici 4.24. Svih 50 različitih kompleta (200 komada) stanu na radnu podlogu stroja i mogu se izraditi u jednom ciklusu. To je svrha aditivne proizvodnje, da se različiti modeli mogu istovremeno izrađivati što uvelike doprinosi smanjenju troškova i vremena izrade. Jedino ograničenje je veličina radne podloge i dimenzije modela o čemu jedino ovisi broj istovremeno proizvedenih komada.

Tablica 4.4. Troškovi aditivne proizvodnje sva tri modela naplatka automobila

|                       |                    | <b>Tri modela<br/>naplatka</b> | <b>Komplet<br/>(50 naplatka)</b> |
|-----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <b>MATERIJAL</b>      | VeroBlack          | 14 g                           | 501                              |
|                       | Potporna struktura | 14 g                           | 467                              |
| <b>VRIJEME IZRADE</b> |                    | 1 sat i 30 minuta              | 8 sati i 30 minuta               |
| <b>CIJENA IZRADE</b>  |                    | 1022,82 kn                     | 6428,18 kn                       |



Slika 4.23. Tri modela naplatka na radnoj podlozi



Slika 4.24. 50 kompleta različitih naplatka na radnoj podlozi

Kada se usporede troškovi injekcijskog prešanja kalupom izrađenim aditivnom proizvodnjom (tablica 4.3) i izravne aditivne proizvodnje (tablica 4.4) dolazi se do zaključka da je aditivna proizvodnja jeftinija za oko 25 % u odnosu na kombinaciju s injekcijskim prešanjem za seriju od 200 naplatka. Tome se treba uzeti u obzir da kod aditivne proizvodnje istovremeno izrađujemo sve komplete, na jednom mjestu izravno iz 3D CAD modela.

Kod malih serija, aditivna proizvodnja nam omogućuje brzu izradu različitih kalupa istovremeno (od modela do kalupa isti dan). Također nam omogućuje brzu izmjenu modela s obzirom da je fokus na personaliziranim dijelovima pa je stoga kombinacija aditivne proizvodnje i injekcijskog prešanja pogodna za male serije koje su podložne promjenama. Troškovi izrade samog kalupa su veliki, ali je zato proizvodnja injekcijskim prešanjem jeftina i brza (proces proizvodnje 3 različita naplatka traje nekoliko sekundi). Zbog toga se dolazi do zaključka da je optimalno kombinirati aditivnu proizvodnju za izradu kalupa i proces injekcijskog prešanja za proizvodnju naplatka.

## 5. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja je postala bitan dio u različitim industrijama, pa tako s udjelom od 17 % aditivna proizvodnja u automobilskoj industriji zauzima visoko drugo mjesto u područjima primjene. Automobilska industrija od samih početaka ulaže velike napore kako bi implementirala i unaprijedila aditivne postupke u sve grane automobilske industrije. Trenutno veliki dio aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji otpada na brzi razvoj prototipova (RP) jer su aditivni postupci relativno skupi za masovnu proizvodnju. Aditivnim postupcima se ostvaruje brzi razvoj prototipova kojima se u automobilskoj industriji može testirati potražnja tržišta i odaziv tržišta na nove modele i ideje. Također se aditivnim postupcima žele poboljšati i unaprijediti postupci koji tradicionalnim postupcima nisu mogući kao npr.: masa dijelova, složena geometrija, visoki detalji i konsolidacija dijelova. Aditivna proizvodnja trenutno ne može zamijeniti tradicionalne postupke proizvodnje, ali ih može u nekim segmentima poboljšati i nadopuniti. Problem kod aditivnih postupaka predstavljaju sami materijali kod kojih postoji puno mjesta za napredak jer su aditivni postupci ograničeni vrstom i stanjem materijala.

Aditivni postupci ne unaprjeđuju samo automobilsku industriju, nego i ostale grane industrije koje bi se morale prilagoditi novom načinu proizvodnje. Aditivni postupci bi omogućili proizvodnju na jednom mjestu što ima za posljedicu manje utjecaja na okoliša zbog transporta, proizvodnje u različitim tvornicama i slično.

U eksperimentalnom dijelu je prikazana fleksibilnost aditivnog postupka (PolyJet) na primjeru dva modela automobila. Standardni i dotrajali dijelovi su se zamijenili s dijelovima koji su se modelirali prema vlastitim zamislima kako bi se što vjernije prikazale mogućnosti aditivnih postupaka u automobilskoj industriji.

Aditivna proizvodnja u automobilskoj industriji nije budućnost nego sadašnjost automobilske industrije. Aditivnoj proizvodnji u automobilskoj industriji se predviđa svijetla budućnost i veliki potencijal, a vrijeme će pokazati dali su to bila realna očekivanja.

## 6. LITERATURA

- [1] Pilipović, A.: *Aditivna proizvodnja*, Polimeri 33(2012)3-4, 134 – 135.
- [2] Pilipović A.: *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa*, Doktorski rad, FSB Zagreb, 2012.
- [3] Godec D., Šercer M.: *Aditivna proizvodnja*, Sveučilišni udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, lipanj 2015.
- [4] Godec D., Šercer M.: *Značaj aditivnih postupaka proizvodnje tvorevina u suvremenom razvoju i proizvodnji*, Aditivne tehnologije za mala i srednja poduzeća, Zagreb, 28.5.2013.
- [5] [https://www.solidsolutions.co.uk/Uploaded/Image/BLOGPICS/Nick%20Jones/SOLID WOKRS-Blog-3D-Printing-STL-Res-Type.JPG](https://www.solidsolutions.co.uk/Uploaded/Image/BLOGPICS/Nick%20Jones/SOLID%20WOKRS-Blog-3D-Printing-STL-Res-Type.JPG), 28.3.2017
- [6] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979>, 29.3.2017
- [7] [http://adtec.cateh.eu/brosura/content/AdTec%20Brosura\\_web.pdf](http://adtec.cateh.eu/brosura/content/AdTec%20Brosura_web.pdf), 2.4.2017
- [8] <https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting>, 12.4.2017
- [9] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=4751>, 2.4.2017
- [10] [https://www.ufpt.com/cmss\\_files/imagelibrary/Content%20Images/automotivediagram.bmp](https://www.ufpt.com/cmss_files/imagelibrary/Content%20Images/automotivediagram.bmp), 3.4.2017
- [11] <http://www.disruptivemagazine.com/features/how-3d-printing-has-disrupted-automotive-industry>, 3.4.2017
- [12] <http://www.meganSPORT.net/community/showthread.php?51945-who-owns-what-in-the-car-world>, 3.4.2017
- [13] [https://www.smartechpublishing.com/images/uploads/general/REVISED\\_LEDG\\_Edit\\_Automotive\\_Report\\_Provisional\\_Chapter\\_1.pdf](https://www.smartechpublishing.com/images/uploads/general/REVISED_LEDG_Edit_Automotive_Report_Provisional_Chapter_1.pdf), 3.4.2017
- [14] <http://www.automotiveworld.com/analysis/printing-automotive-industry-future-3d-style/>, 3.4.2017
- [15] [https://www.smartechpublishing.com/images/uploads/general/REVISED\\_LEDG\\_Edit\\_Automotive\\_Report\\_Provisional\\_Chapter\\_1.pdf](https://www.smartechpublishing.com/images/uploads/general/REVISED_LEDG_Edit_Automotive_Report_Provisional_Chapter_1.pdf), 3.4.2017
- [16] <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-automotive.html>, 20.4.2017

- [17] <https://www.protocam.com/learningcenter/blog/5-ways-to-use-additive-manufacturing-in-automotive/>, 20.4.2017
- [18] <https://www.sculpteo.com/blog/2016/01/20/3d-printing-transforms-the-automotive-industry/>, 15.4.2017
- [19] <https://www.strategyand.pwc.com/media/file/The-future-of-spare-parts-is-3D.pdf>, 15.4.2017
- [20] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/automotive-3d-printing-applications>, 21.4.2017
- [21] <http://www.divbyz.com/industries/automotive>, 21.4.2017
- [22] <https://3dprinting.com/automotive/3d-printed-cars/>, 21.4.2017
- [23] <https://www.scribd.com/document/263146284/AM-SRA-February-2014>, 25.4.2017
- [24] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:740682/FULLTEXT01.pdf>, 25.4.2017
- [25] <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-automotive.html>, 26.4.2017
- [26] <https://all3dp.com/3d-printed-car/>, 27.4.2017
- [27] <http://www.3ders.org/articles/20160908-25-incredible-3d-printed-cars-automotive-projects-in-the-world.html>, 27.4.2017
- [28] <https://localmotors.com/strati/>, 27.4.2017
- [29] <http://www.motorcyclenews.com/news/new-bikes/2016/may/worlds-first-3d-printed-motorcycle-revealed/>, 26.4.2017
- [30] <http://www.3ders.org/articles/20160330-see-how-a-3d-printed-car-is-really-made-with-local-motors-3d-printing-101.html>, 27.4.2017
- [31] <http://newatlas.com/divergent-3d-printed-motorcycle-dagger/46588/>, 27.4.2017
- [32] <https://3dprint.com/25612/stratasys-streetscooter-car/>, 30.4.2017
- [33] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917300533>, 30.4.2017
- [34] <https://www.slideshare.net/FabioBaiocchi/additivaintroeng20170102>, 30.4.2017
- [35] [https://www.eos.info/press/customer\\_case\\_studies/formula\\_student](https://www.eos.info/press/customer_case_studies/formula_student), 30.4.2017
- [36] <http://paradigm3d.com/automotive/>, 30.4.2017
- [37] <http://www.machinedesign.com/3d-printing/3d-printing-drives-automotive-industry>, 30.4.2017
- [38] [https://www.eos.info/industries\\_markets/automotive/motor\\_racing](https://www.eos.info/industries_markets/automotive/motor_racing), 30.4.2017
- [39] <http://www.crptechnology.com/automotive-case-studies/>, 30.4.2017

- [40] <https://www.slideshare.net/FabioBaiocchi/additivaintroeng20170102>, 30.4.2017
- [41] <https://rennlist.com/forums/944-turbo-and-turbo-s-forum/725447-refresh951-s-hybrid-ultra-stroker-build-57.html>, 30.4.2017
- [42] <https://www.goodfabs.com/additive-manufacturing>, 3.5.2017
- [43] <http://www.3dprecision.ch/fr/applications.html>, 3.5.2017
- [44] <http://www.stratasys.com/resources/case-studies>, 3.5.2017
- [45] [https://www.eos.info/case\\_studies/additive-manufacturing-of-front-wing-cascades-by-willimas-martini-racing](https://www.eos.info/case_studies/additive-manufacturing-of-front-wing-cascades-by-willimas-martini-racing), 3.5.2017
- [46] [http://www.conceptlaserinc.com/wp-content/uploads/2016/07/Concept-Laser-Automotive-Feature\\_Metal-AM-Summer-2016-Vol-2-No-2-sp.pdf](http://www.conceptlaserinc.com/wp-content/uploads/2016/07/Concept-Laser-Automotive-Feature_Metal-AM-Summer-2016-Vol-2-No-2-sp.pdf), 13.5.2017
- [47] <http://articles.sae.org/14175/>, 13.5.2017
- [48] <https://www.greenprophet.com/2012/03/objet-geometries-3d-printing/>, 13.5.2017
- [49] <http://www.automotivemanufacturingsolutions.com/technology/the-sum-of-its-parts>, 13.5.2017
- [50] <https://3dprintingindustry.com/news/toyota-materialise-team-to-3d-print-lightweight-car-seat-57779/>, 13.5.2017
- [51] <https://www.3dsystems.com/3d-printers/spro-230>, 20.5.2017
- [52] <https://3dprintingindustry.com/news/ferrari-uses-3d-printing-develop-new-engine-2017-f1-season-104862/>, 20.5.2017
- [53] [https://www.eos.info/industries\\_markets/automotive/serial\\_production\\_vehicles](https://www.eos.info/industries_markets/automotive/serial_production_vehicles), 20.5.2017
- [54] <http://www.compositesworld.com/blog/post/additive-manufacturing-metal-vs-composites>, 20.5.2017
- [55] <https://www.saving-volt.de/2015/03/edag-praesentiert-leichtbaukonzept-light-cocoon-aus-3d-druck/>, 20.5.2017
- [56] <https://3dprint.com/169423/metal-3d-printing-paradigm/>, 29.5.2017
- [57] <https://www.3dsystems.com/case-studies>, 29.5.2017
- [58] [https://angel.co/projects/252342%E2%80%90lightning%E2%80%90motorcycles%E2%80%90swingarm?src=user\\_profile](https://angel.co/projects/252342%E2%80%90lightning%E2%80%90motorcycles%E2%80%90swingarm?src=user_profile), 29.5.2017
- [59] <http://www.voxeljet.com/branchen/cases/kupplungsglocke-mittels-3d-druck/>, 1.6.2017
- [60] <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14211/Michelin-and-Fives-AddUp-From-Making-Tires-to-Making-Metal-3D-Printers.aspx>, 3.6.2017



- [61] <https://3dprint.com/7911/bmw-uses-3d-printing/>, 3.6.2017
- [62] <http://www.mustangandfords.com/news/1505-3d-computer-printed-parts-speed-development-for-ford/photo-gallery/#1>, 3.6.2017
- [63] <https://www.axisproto.com/gallery.php>, 3.6.2017
- [64] <https://www.pistonheads.com/gassing/topic.asp?h=0&f=47&t=995969&i=20>, 3.6.2017
- [65] <http://www.motorworldhype.com/2009/07/skunk2-mitsubishi-evo-intake-manifold/>, 13.6.2017
- [66] <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/3d-systems-projetr-660-ultimate-solution-hankook-tire-concept-design>, 13.6.2017
- [67] <https://www.trendhunter.com/trends/3dprinted-car-transmission>, 13.6.2017
- [68] <https://www.3dsystems.com/case-studies>, 13.6.2017
- [69] <http://consult3d.com/blog/inside-3d-printing-melbourne-australia/>, 13.6.2017
- [70] <http://www.turbodynamics.co.uk/media/blog/3d-printed-turbocharger>, 13.6.2017
- [71] [http://www.prodways.com/en/industrial\\_segment/automotive/](http://www.prodways.com/en/industrial_segment/automotive/), 14.6.2017
- [72] <https://www.3dsystems.com/materials/accura-clearvue>, 14.6.2017
- [73] <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14406/Five-Stories-Indicating-Auto-3D-Printing-Is-Kicking-into-High-Gear.aspx>, 20.6.2017
- [74] <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13181/Divergent-3D-and-PSA-Group-Overhaul-Auto-Manufacturing-with-3D-Printing.aspx>, 20.6.2017
- [75] <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14211/Michelin-and-Fives-AddUp-From-Making-Tires-to-Making-Metal-3D-Printers.aspx>, 20.6.2017
- [76] [http://www.doking.hr/sites/all/themes/adaptivetheme/at\\_doking/pdfs/services\\_brochure\\_5.pdf](http://www.doking.hr/sites/all/themes/adaptivetheme/at_doking/pdfs/services_brochure_5.pdf), 21.6.2017