

**SAVREMENI POSTUPCI OBRADJE METALNIH MATERIJALA –
HIBRIDNA PROIZVODNJA**

**MODERN METHODS OF PROCESSING METALS MATERIALS –
HYBRID PRODUCTION**

Ajla Sušić, dipl. Proizvodni inženjer
Univerzitet u Zenici, Politehnički fakultet
Zenica

Anel Baručija, dipl. inž. maš.
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet
Zenica

Doc. dr. Edin Begović
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet
Zenica

REZIME

U radu je objašnjen pojam aditivnih tehnologija i princip rada istih. Dat je kratak pregled postupaka aditivne proizvodnje, faze izrade proizvoda i oblast primjene aditivne i hibridne tehnologije. Aditivne tehnologije pružaju odgovor na povećanu kompleksnost proizvoda i otvaraju mogućnost brze izrade prototipa u malim serijama. U pogledu cijene, kvaliteta i brzine ne mogu se porediti sa konvencionalnim postupcima proizvodnje. Aditivna proizvodnja, najčešće lasersko sinterovanje i CNC obrada, danas se kombinuju i pripadaju istim mašinama. Aditivna tehnologija ima široku primjenu, a najčešće se može susresti u automobilskoj i avioindustriji. U radu su prikazani konkretni primjeri mašina za hibridnu proizvodnju renomiranih svjetskih proizvođača, kao što je DMG MORI.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja, lasersko sinterovanje, DMG MORI mašine

ABSTRACT

In the paper the concept of additive technologies and their working principle are explained. There is also a brief overview of additive manufacturing processes, product development phases and application of additive and hybrid technology. Additive technologies provide an answer to the increased complexity of the product and open the possibility of fast production of prototypes in small series. In terms of price, quality and speed, they can't be compared with conventional production methods. Additive manufacturing, most commonly laser sintering and CNC processing, today are combined and they belong to the same machines. Additive technology has wide application and is most commonly encountered in the automotive and aviation industry. The paper presents specific examples of machines for hybrid production of world's renowned manufacturers, such as DMG MORI.

Key words : Additive manufacturing, laser sintering, DMG MORI machines

1. UVOD

Izrada bilo kojeg proizvoda započinje idejom. Da bi se ideja pretvorila u završni proizvod, mora proći kroz nekoliko faza: od razrade koncepta, dizajna, izrade potrebne tehnološke dokumentacije i prototipa, prepravljanja nedostataka i konačno izrade krajnjeg proizvoda. Sve

ove faze predstavljaju trošenje resursa i jednim dijelom vremena. Smanjenje ovih troškova moguće je primjenom aditivne proizvodnje (eng. Additive Manufacturing – AM). Savremeni aditivni postupci proizvodnje počeli su se razvijati i primjenjivati od druge polovine 80-tih godina prošlog stoljeća. Aditivna proizvodnja odgovor je na dinamiku današnje industrije, te je interdisciplinarni proces. Ove metode su uglavnom slične jedna drugoj u dodavanju i vezivanju materijala, metodom „layer by layer“ (sloj po sloj) do izrade čitavog proizvoda. Postupcima aditivne proizvodnje mogu se izraditi dijelovi komplikovane geometrije na temelju računarskog 3D modela u relativno kratkom vremenu. Modeli izrađeni u nekom od CAD software-a se kod svih postupaka aditivne proizvodnje spremaju u STL datoteku (eng. Standard Tessellation Language), koja objekat pokazuje kao mrežu povezanih trokuta. STL datoteka nema boju, pa je 2009.g. [1] uvedena AMF datoteka (eng. Additive Manufacturing File), koja uz STL postaje standard za postupke aditivne proizvodnje i čini osnovu za rezanje u slojeve. Tokom 30-ak godina, koliko se aditivne tehnologije primjenjuju u svijetu, izdvaja se nekoliko tehnologija koje su danas najčešće u primjeni [2]:

- Stereolitografija (eng. Stereolithography – SL/SLA),
- PolyJet,
- Selektivno lasersko sinterovanje (eng. Selective laser sintering – SLS),
- Taložno očvršćavanje (eng. Fused Deposition Modeling – FDM),
- Laminiranje (eng. Laminated Object Manufacturing – LOM),
- Selektivno lasersko taljenje (eng. Selective laser melting – SLM),
- Direktno taloženje metala laserom (Laser engineered net shaping - LENS).

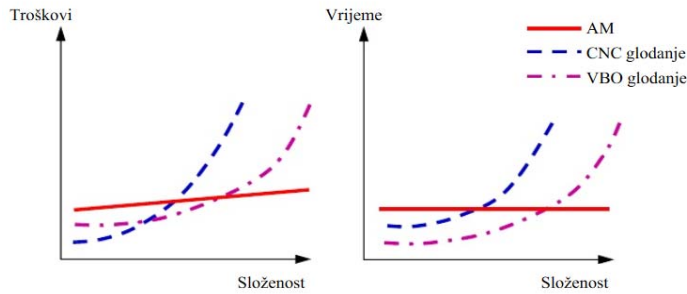
Stalno unaprijeđenje aditivnih i konvencionalnih proizvodnih tehnologija rezultiralo je spajanjem istih u jednu, tzv. hibridnu proizvodnju raznih dijelova. U kombinaciji aditivnih tehnologija i tehnologija obrade odvajanjem čestica, hibridni proizvodni postupak „LENS“ (eng. Laser engineered net shaping) ili Direktno taloženje metala laserom, danas je jedna od novije razvijenijih tehnologija koja će zbog svojih prednosti i mogućnosti imati veliki značaj u budućoj industrijskoj proizvodnji. Aditivnom tehnologijom laserskim sinterovanjem izrađuje se približno gotovi željeni oblik obratka, te se zatim postupkom obrade odvajanjem čestica isti taj obradak obrađuje do završnog oblika sa zahtijevanom tačnošću i kvalitetom. LENS postupak će u nastavku biti opisan kroz princip rada mašina renomiranih svjetskih proizvođača, od kojih je najistaknutiji DMG MORI.

2. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Aditivne tehnologije najčešće se koriste [3] :

- kada je proizvod geometrijski složen,
- kada je potrebna brza proizvodnja prototipa,
- kada je bitna niska cijena (za manje dijelove),
- kada je potreban mali broj identičnih dijelova,
- kada je dio izrađen od materijala koji se teško obrađuje odvajanjem čestica,
- za ličnu upotrebu.

Aditivna proizvodnja u velikoj mjeri doprinosi proizvodnoj „filozofiji“: proizvoditi jeftinije, kvalitetnije i brže, budući da omogućava višestruko skraćivanje vremena izlaska proizvoda na tržište, smanjuje troškove usvajanja novog proizvoda i povećava kvalitetu izrade istog. Aditivna proizvodnja je, u pogledu kompleksnosti oblika, veličine i vremena izrade proizvoda, isplativija od uporedivih konvencionalnih proizvodnih tehnologija, kao što je to prikazano na slici 1.

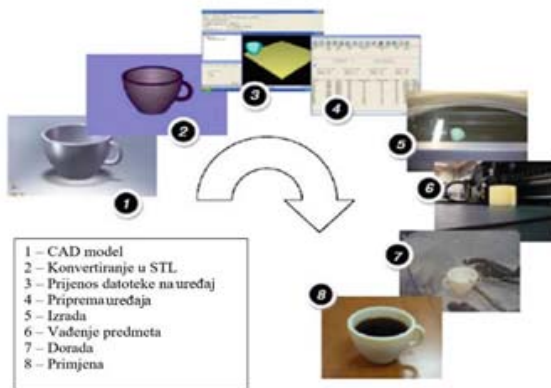


Slika 1. Usporedni dijagram AM, CNC glodanja i VBO glodanja [4]

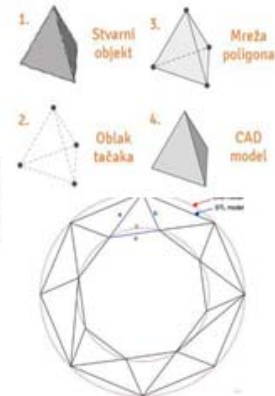
Kruth (1991) [5] klasifikovao je RP (eng. Rapid Prototyping – RP) tehnike prema sirovini koja se koristi na:

- **Tečno bazirane postupke** - (Sterilitografija, eng. Stereolithography SLA, PolyJet),
- **Praškasto bazirane postupke** - (eng. Selective Laser Sintering, SLS, eng. Laser Engineering Net Shaping – LENS, 3D printanje),
- **Čvrsto bazirane postupke** - (Taložno očvršćivanje, eng. Fused Deposition Modeling, FDM i proizvodnja laminiranih objekata, eng. Laminated Object Manufacturing, LOM).

Postupak izrade nekog proizvoda primjenom aditivne proizvodnje može se podijeliti u više faza. Na slici 2. prikazan je proces izrade i korištenja proizvoda kroz osam karakterističnih faza. Dizajn se najprije generiše pomoću CAD software-a koji pruža 3D sliku. Datoteka mora biti pretvorena u STL format jer je to vrsta datoteke koju mašine za aditivnu tehnologiju mogu čitati i tumačiti (slika 3). Nakon prijenosa datoteke i podešavanja parametara mašine (debljina sloja, snaga, brzina itd.) slijedi izrada dijelova, te nakon završetka zadnjeg sloja, vađenje gotovog proizvoda. Prilikom vađenja treba paziti da je temperatura u radnom prostoru mašine dovoljno niska za sigurno rukovanje dijelovima. Zatim, slijedi naknadna obrada (čišćenje viška materijala, brušenje, dodatna termička obrada, odstranjivanje potporne strukture, bojenje itd.) i primjena.



Slika 2. Faze izrade proizvoda postupcima aditivne proizvodnje [6]



Slika 3. Usporedba CAD i STL modela [7]

3. HIBRIDNA TEHNOLOGIJA - „LENS“ PROIZVODNI POSTUPAK

Hibridna proizvodnja sadrži aditivne i suptraktivne tehnologije, što znači da uređaji mogu započeti proces proizvodnje ili popravku nekog objekta aditivnom ili suptraktivnom tehnologijom. Razlog za takvu kombinaciju i razvoj hibridnog postupka obrade uglavnom je

upotreba kombinovanih prednosti, te izbjegavanje ili smanjenje neželjenih efekata proizvedenih komponenti kada se pojedinačno primjenjuju. Jedinstvena kombinacija postupka laserskog sinterovanja sa sapnicom za doziranje praha i kasnije postupka glodanja, inovativna je hibridna metoda obrade (slika 4). Lasersko sinterovanje je proces preciznog zavarivanja u kojem se na objekat polažu metali u obliku praha te se prah zavaruje ili nataljuje na objekat pod utjecajem lasera. Mašina, koja nanosi prah i zavaruje ga, koristi LENS (Laser engineered net shaping - Izravno taloženje metala laserom) postupak izrade proizvoda. Fleksibilna izmjena između laserskog sinterovanja i obrade glodanjem omogućava direktnu obradu nekog područja do kojeg se više ne može doći na gotovom komadu.



Slika 4. Kombinacija LENS postupka i procesa glodanja na hibridnoj mašini DMG MORI Lasertec 65 3D [8]



Slika 5. Impeler izrađen LENS postupkom [9]

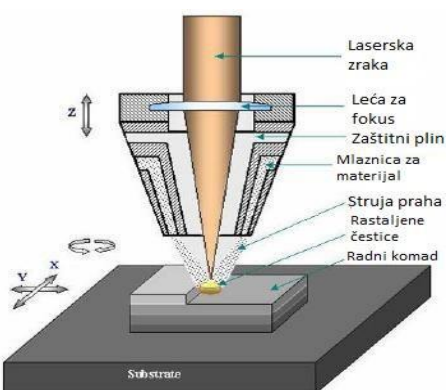
Laserski postupak se temelji na doziranju metalnog praha, koji omogućava aditivnu proizvodnju dijelova bez obradne komore ni potrebe korištenja potpornih konstrukcija. Specifična upotreba ovog postupka je i mogućnost popravke, tj. rekonstrukcije mašinskih dijelova složene geometrije (engl. *Reverse Engineering*). Neki proizvodi, kao što su kućišta turbine, prirubnice, lopatice turbine i impeleri, mogu biti izrađeni LENS postupkom (slika 5.) Mnoge kompanije u području industrijske proizvodnje alatnih mašina razvijaju i proizvode nove hibridne tipove alatnih mašina. Od mnogih drugih, u ovom radu su izdvojene neke od hibridnih alatnih mašina, s tehnologijom laserskog sinterovanja i glodanja na jednom mjestu, od kompanije DMG MORI, Mazak i kompanije Optomec.

3.1. DMG MORI - Lasertec 65 3D

Mašina posjeduje dosta veliki obradni prostor za obratke veličine do 500 mm u promjeru, visine 400 mm i težine obradaka do 600 kg prema [9]. Karakteriše je potpuno automatizirana izmjena laserske obrade sa glodanjem. Konstruiranje i programiranje obradaka obavlja se u SIEMENS NX softverskom paketu. Princip rada hibridne alatne mašine „Lasertec 65 3D“ (slika 6), tj. postupak laserskog sinterovanja, temelji se na korištenju koaksijalne sapnice pri čemu se metalni prah dozira u slojevima na osnovni materijal (neporozno i taljenje bez pukotina). Laserskom zrakom se formira bazen rastaljenog materijala na metalnoj podlozi, u koji se dozira prah. Prah se tali da bi se formirala obloga koja je fuzijski vezana na podlogu. Tako je metalni prah spojen jako čvrstom vezom za površinu. Zaštitni plin sapnice štiti od oksidacije tokom postupka sinterovanja. Na slici 7. prikazan je LENS postupak.



Slika 6. Hibridna alatna mašina
Lasertec 65 3D [10]



Slika 7. LENS postupak [11]

Nakon hlađenja metalni slojevi se mogu mehanički obrađivati, simultanim 5-osnim glodanjem. Tokom obrade glodanjem, laserska glava se nalazi izvan radnog prostora te je tako zaštićena od prašine, sredstva za hlađenje i odvojenih čestica. 5-osna obrada se sastoji od 3 translacijske osi X, Y i Z, te druge dvije su pridružene okretno-nagibnom stolu. Ova alatna mašina ima široko područje primjene u industriji, a to su: namjena izrade, te prevlačenje dijelova/komponenti. Mašina se s cjelokupnom proizvodnjom dijelova može upotrijebiti u svemirskoj i avioindustriji. Također se upotrebljava kod izrade raznih dijelova kao što su mlaznice, u vakuumskoj tehnologiji za izradu rashladnih cijevi, te kod izrade kalupa za rashladne elemente. Jedna od namjena je i popravka visoko vrijednih oštećenih ili istrošenih čeličnih dijelova na mašini. Za izradu jednog kućišta turbine ovoj mašini je potrebno 230 min laserskog zavarivanja i 76 min glodanja, prema [9].

3.2. MAZAK - Integrex i-400 AM

Kompanija Mazak još je jedna od vodećih kompanija u proizvodnji alatnih mašina koja je razvila hibridne višenamjenske alatne mašine u kombinaciji aditivne tehnologije i tehnologije obrade odvajanjem. Ona predvodi u području tehnologija koje pružaju cjelokupnu obradu dijelova u jednom stezanju, tzv. „Done-in-One” proizvodnju. Na već postojeće tokarske i obradne centre dodatno je integrisana tehnologija laserskog taloženja metalnog praha. Prikaz mašine je na slici 8. Omogućava također 5-osnu obradu koja se sastoji od 3 translacije u smjeru osa X, Y i Z, te dvije rotacijske ose C i B glavnog vretena.



Slika 8. Hibridna višenamjenska alatna
mašina Integrex i-400 AM [12]



Slika 9. Dvije vrste laserskih glava [13]

Mašina posjeduje i dodatno vreteno za veću produktivnost koja se omogućava obavljanjem i sljedećih po redu operacija u jednom stezanju. Za integrisanu tehnologiju laserskog taloženja

metalnog praha na višeoperacijsku alatnu mašinu, razvijene su dvije vrste laserskih glava prikazano na slici 9. Jedna od njih je tzv. „fina” laserska glava koja omogućava koaksijalno lasersko oblaganje. Druga je visokobrzinska laserska glava koja omogućava lasersko oblaganje sa većom brzinom i većim učinkom taloženja. Glava se postavlja na glodače vreteno sa automatskim izmjenjivačem alata. Zatim, zaštitni poklopac koji predstavlja protumjeru protiv mogućih pojava kontaminacija na optičke dijelove laserske glave automatski je uklonjen i tad se glava spaja na razdjelnik. Lasersko taloženje metalnog praha je postupak koji koristi lasersku zraku za formiranje bazena s rastaljenim materijalom na metalnoj podlozi, u koji se dozira prah. Prah se tali da bi se stvorila obloga koja je fuzijski vezana na podlogu, a zahtijevani geometrijski oblik se izrađuje sloj po sloj. [12] Opisana tehnologija laserskog taloženja metalnog praha u kombinaciji s obradom odvajanjem čestica, dobro je prilagođena za maloserijsku proizvodnju teško obradivih materijala, kao što su legure korištene u avioindustriji, materijala visoke tvrdoće korištenih u energetskom sektoru, te proizvodnje alata, komponenti i visokopreciznih, specijalnih legurnih konstrukcija često korištenih za proizvodnju medicinskih uređaja. Iako je postupak pogodan i za izradu dijelova i popravku, najučinkovitija primjena je u prevlačenju materijala.

3.3. Optomec - LENS 850-R

U nastavku na slici 9. prikazana je mašina za izravno taloženje metala laserom i njene osnovne karakteristike.

Karakteristike:

- Mašina: LENS 850-R
- Proizvođač: Optomec
- Maksimalna veličina proizvoda: 900 x 1500 x 900 mm
- Cijena mašine: 250.000 \$
- Debljina sloja: min 0,03 mm



Slika 10. Mašina za izravno taloženje metala laserom LENS 850-R [14]

Proces LENS-a kod ove mašine se odvija u zatvorenoj 3D komori za printanje koja se pročišćava argonom tako da su razine kisika i vlage vrlo niske (<10 ppm). Time se održava čistoća proizvoda i sprječava oksidacija. Metalni prah se dovodi u glavu za taloženje materijala pomoću Optomec-ovog sistema za punjenje praha. Kada se jednom nanese sloj, glava za taloženje materijala prelazi na sljedeći sloj. Proces je kontinuiran do izrade gotovog proizvoda. Po završetku, metalni dio se uklanja i može se naknadno obrađivati, po potrebi. LENS 850-R se može koristiti s različitim metalima i legurama i služi za popravku istrošenih dijelova, izmjenu alata za ponovnu upotrebu, hibridnu proizvodnju i napredni razvoj proizvoda [14].

4. ZAKLJUČAK

Uzimajući u obzir četiri najbitnija atributa proizvodnje: cijenu, brzinu, kvalitet i fleksibilnost, za proizvodnju većih dijelova niti jedna aditivna tehnologija se ne može porediti sa konvencionalnim postupcima proizvodnje. Međutim, ukoliko želimo brzu izradu prototipa na zahtjev, u malim serijama tu su aditivne tehnologije, odnosno tehnologije za proizvodnju kompleksne geometrije, novih dijelova (proizvoda), za izradu alata, kalupa i dr. Proizvodne kompanije danas, sa svojim tehnologijama moraju biti što fleksibilnije u pogledu primjene raznih proizvodnih postupaka, obradi novih materijala, potpuno automatiziranom i

autonomnom radu, te brzjoj reakciji na zahtjeve savremenog tržišta. Zbog velikih zahtjeva savremenog tržišta, za ekonomski isplativim tehnološkim rješenjima i zahtjevne obrade sve kompleksnijih geometrijskih oblika, sve više se razvijaju hibridne tehnologije i hibridne alatne mašine. Razvijaju se u smjeru proizvodnje na što produktivniji i ekonomičniji način, kako bi se minimizirali nedostaci pojedinačnih, konvencionalnih postupaka obrade. Postoji niz kombinacija hibridnih tehnologija koje su već razvijene i implementirane u industriji. Proizvodnjom složenih dijelova uključuje se mnogo različitih procesa obrade na kojima se premještanjem s jedne obrade na drugu troši mnogo vremena, a samim tim i novca, te se otvara prostor pogreškama kod rukovanja, stezanja i sl. Jedan od bitnih nedostataka takvog načina proizvodnje je i zauzimanje prostora različitim proizvodnim ćelijama. Stoga se ostvaruje ekonomska prednost razvojem mašine koja ima u sebi mogućnost više načina obrade. S mogućnošću potpune automatizacije i autonomnog rada, s poboljšanim kontrolnim sistemima i sve razvijenijim inteligentim sistemima za upravljanje, hibridne alatne mašine pogodne su za digitalizaciju i međusobno povezivanje s ostalim tehnološkim sistemima preko virtualno-fizičkih sistema. To je budućnost i na tome se zapravo i temelji nadolazeća četvrta industrijska revolucija, pod nazivom Industrija 4.0. Iako je dosta skuplja u odnosu na standardnu, aditivna i hibridna tehnologija doprinose vrijednostima proizvoda ili vrijednostima za ubrzavanje razvoja proizvoda, te ciklusa testiranja.

5. LITERATURA

- [1] Nadan Mernković, Primjena suvremenih koncepcija u razvoju proizvoda
URL:<https://repozitorij.simet.unizg.hr/islandora/object/simet%3A42/datastream/PDF/view>
- [2] Josip Novak, Napredne tehnologije materijala – Aditivne tehnologije, II dio URL:
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1522256222-0-josipnovakseminaraditivnetehnologijeiiidio.pdf
- [3] Goran Cukor, Aditivna proizvodnja URL: <https://www.scribd.com/doc/216532110/Aditivna-proizvodnja>
- [4] Hassan Abdel – Gawad El – Hofy. Advanced Machining Processes. Production engineering, Department Alexandria University, Egypt, 2005.
- [5] Ana Pilipovic, Aditivna proizvodnja. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/147943>
- [6] Hinko Fuš, Prototip 3D pisača sa paralelnom kinematičkom strukturom, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. URL:
http://repozitorij.fsb.hr/7489/1/Fu%C5%A1_2017_zavr%C5%A1ni_preddiplomski.pdf
- [7] Opšti funkcionalni princip laserskog sinterovanja. URL:
https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested
- [8] Lasertec 65 3D hibrid mašina sa postupcima obrade. Hibridno CAD/CAM programiranje laserskog zavarivanja i glodanja. URL: <https://en.dmgmori.com/>
- [9] Sastav praha za izradu metalnih dijelova na DMG MORI mašini. URL:
<https://www.youtube.com/watch?v=L3CkzQQFZXs>
- [10] Lasertec 65 3D hibrid mašina sa postupcima obrade. Hibridno CAD/CAM programiranje laserskog zavarivanja i glodanja. URL: <https://en.dmgmori.com/>
- [11] Miroslav Horvat, Završni rad, Pregled aditivni postupaka proizvodnje, Sveučilište Sjever, Odjel za proizvodno strojarstvo.
- [12] Darko Antolic, Završni rad, Hibridni alatni strojevi, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. URL :
https://core.ac.uk/download/pdf/79434548.pdf?fbclid=IwAR3Tf2T_QSO1qRpGTOotR58X22L6G3AGp9gw5KwSaGtI7nVYWPPLsHvKsc
- [13] Dvije vrtse laserskih glava na mašini Integrex i-400AM URL:
<https://www.youtube.com/watch?v=KbXJb4wcnw>
- [14] <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/optomec-lens-850-r/>

