

UDK/УДК 621

ISSN 0354-6829

IMK-14

ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ

ČASOPIS INSTITUTA IMK "14.OKTOBAR" KRUŠEVAC



GODINA XVII
BROJ 38 1/2011

IMK "14.OKTOBAR" KRUŠEVAC SRBIJA

SADRŽAJ

1.	Nebojša Nikolić, Života Antonić, Jovan Dorić UPOREDNI PRIKAZ DVA ANALITIČKA POSTUPKA KONSTRUISANJA POLARNOG DIJAGRAMA OPTEREĆENJA GLAVNIH LEŽIŠTA KOLENASTOG VRATILA.....	3
2.	Miloš Madić, Miroslav Radovanović METODOLOGIJA MODELIRANJA PROCESA OBRADRE REZANJEM PRIMENOM NEURONSKIH MREŽA	11
3.	Mladen Nikolić, Slađana Savić, Dragan Nikolić UTICAJ IMPREGNANTA AKTIVNOG UGLJA CINK OKSIDANA HEMISORPCIJU KARBONIL DIHLORIDA.....	17
4.	Slavko Arsovski, Jovan Milivojević, Sonja Grubor, Aleksandra Kokić Arsić, Nikola Tonić TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI TOKOVI KORIŠĆENIH DELOVA IZ CENTRA ZA DEMONTAŽU MOTORNH VOZILA NA KRAJU ŽIVOTNOG CIKLUSA	19
5.	Miloš Ristić TEHNOLOŠKA OGRANIČENJA BRZIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA.....	25
6.	Dragan Milčić, Miroslav Mijajlović, Boban Anđelković, Sava Đurić AUTOMATIZACIJA PRORAČUNA ZAVARENIH SPOJEVA.....	33
7.	Aleksandar Ašonja, Danilo Mikić ODRŽAVANJA KOTRLJAJUĆIH LEŽAJEVA.....	39
8.	Zlatomir Živanović, Zoran Jovanović, Zoran Masončić, Željko Šakota ISPITIVANJE BEZBEDNOSNO-TEHNIČKIH KARAKTERISTIKA VOZILA SA POGONOM NA KOMPRIMOvani PRIRODNI GAS (KPG)	45
9.	Ivica Čamagić, Nemanja Vasić, Zlatibor Vasić, Zijah Burzić, Aleksandar Todić ODREĐIVANJE TRAJNE DINAMIČKE ČVRSTOĆE EPRUVETA OSNOVNOG METALA I ZAVARENOG SPOJA NISKOLEGIRANOG ČELIKA POVIŠENE TVRDOĆE.....	53
10.	Miroslav Plančak, Dejan Morvin, Dragiša Vilotić, Mladomir Milutinović, Milentije Stefanović INKREMENTALNO ZAPREMINSKO DEFORMISANJE METALA.....	57
11.	Dragana Pavlović OBAVEZA IZDRŽAVANJA IZMEĐU RODITELJA I DECE.....	63
12.	Branko Lukić, Milutin Đuričić, Sava Đurić, Milan Đuričić OBEZBEĐENJE KVALITETA IZRADE ZAVARENIH LIMENIH "I" PROFILA	69
13.	Miroslav Smiljković, Tamara Božidarević ORGANIZACIONO USKLAĐIVANJE TRGOVINSKOG PREDUZEĆA I MARKETINGA.....	75
14.	Dejan Čikara, Aleksandar Todić, Tomislav Todić MOGUĆNOSTI PROGRAMIRANJA STRUKTURE LIVENOG GVOŽĐA.....	81
15.	Velimir Šeekić, Dejan Đorđević ULOGA REINŽINJERINGA I INFORMATIČKIH TEHNOLOGIJA NA TEHNOLOŠKE PROCESSE POSLOVANJA.....	89
16.	Milan Punišić, Milena Nikolić PRAVCI RAZVOJA OPŠTINA RASINSKOG OKRUGA I BUDUĆA MREŽA NASELJA.....	95

TEHNOLOŠKA OGRANIČENJA BRZIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA

Miloš Ristić¹⁾Kategorizacija rada:
PREGLEDNI RAD

Adresa:

¹⁾Visoka tehniška škola u Nišu

Rezime: Tehnološke mogućnosti pojedinih proizvodnih tehnologija su osnov za projektovanje za proizvodnju i montažu. Za slučaj substraktivnih i formativnih tehnologija ove mogućnosti su poznate. Međutim, za brze proizvodne tehnologije, koje doživljavaju eksplozivni razvoj, tehnološke mogućnosti, koje su inače široke, su nedovoljno poznate. U ovom radu su analizirane i prikazane tehnološke mogućnosti (i ograničenja) najčešće korišćenih brzih proizvodnih tehnologija zasnovanih na aditivnim procesima obrade.

Ključne reči: Rapid prototyping (RP), Design for Manufacturability (DFM)

1. UVOD

Savremeni, tržišno orijentisani, proizvodni procesi zahtevaju od proizvodnih sistema iteraciju svih zainteresovanih strana sa krajnjim ishodom dobijanja kvalitetnog, lako dostupnog i jeftinog proizvoda. Pored substraktivnih i formativnih procesa obrade, sve veći razvoj doživljavaju aditivni obradni procesi obrade, karakteristični za većinu brzih proizvodnih tehnologija.

Rapid prototyping (RP) tehnologije imaju velike tehnološke mogućnosti, koje se stalno razvijaju i usavršavaju i imaju važnu ulogu u raznim naučnim poljima.

Istraživanja u ovoj oblasti vezana su za usavršavanje ulaznih podataka, nove metode proizvodnje, razvoj novih i usavršavanje postojećih materijala i oblasti primene ovih tehnologija.

Svaki metod obrade ima svoje specifičnosti, pa je važno razumeti tehnološka ograničenja u vodećim RP tehnologijama (SLA, SLS, DMLS, SLM, 3DP, FDM, LOM) kako bi se za određeni model prepoznala i izabrala adekvatna tehnologija izrade.

U ovom radu se najpre definišu metodi projektovanja za proizvodnju, kao i projektovanje za proizvodnju i montažu. Zatim se daje pregled postojećih komercijalno dostupnih brzih proizvodnih tehnologija, a onda se za svaku od njih definišu tehnološke mogućnosti.

2. PROJEKTOVANJE ZA PROIZVODNJU

Iako troškovi procesa projektovanja proizvoda učestvuju u malom delu ukupne cene proizvoda, odluke koje se donose tokom ovog procesa utiču na značajan deo ukupnih troškova u stvaranju novog proizvoda i od suštinske su važnosti za tržišni uspeh ili neuspeh novog proizvoda. Obzirom da se troškovi koji nastaju zbog naknadnih izmena konstrukcije proizvoda uvećavaju vremenom, sposobnost da se vrše suštinske promene tokom razvoja proizvoda predstavlja veoma bitno svojstvo razvojnog sistema jer se njime mogu ostvariti značajne uštede [1].

Radi ostvarivanja ovog svojstva velika pažnja je posvećena integraciji konstrukcije i tehnologije. Ovi pokušaji su doveli do pojave metodologija projektovanja za proizvodnju (Design for Manufacturability – DFM), a kasnije i projektovanja za proizvodnju i montažu (Design for Manufacture and Assembly – DFMA). Sa te strane projektovanje za proizvodnju je zapravo sistematski pristup koji

omogućava inženjerima da predvide troškove proizvodnje u ranoj fazi procesa projektovanja, čak i kada je poznata samo okvirna geometrija proizvoda koji se razvija.

Primena DFM metoda može se sprovesti s velikom efikasnošću preko CAD/CAM sistema koji ima ugrađenu funkciju za procenu troškova. Projektanti mogu da razviju računarsku predstavu dela koji treba proizvesti njihovog koristeći CAD model. Tada se mogu dobiti podaci o tehničkim elementima CAD modela i može se izračunati cena izrade tehničkih elemenata. Ova informacija se odmah šalje nazad projektantu. Modifikovanjem CAD modela pomoću DFM smernica, projektant može da dobije i podatke o cenama alternativnih rešenja za konstrukciju i da na osnovu toga odluči o optimalnom rešenju konstrukcije.

Projektovanje za proizvodnju i montažu (DFMA) je metodologija za ocenjivanje konstrukcije dela i celokupne konstrukcije sklopa. To je način da se identifikuju nepotrebni delovi u sklopu i da se odredi vreme izrade, kao i troškovi sklopa.

Ova metodologija uključuje jednostavna pravila, koja mogu da imaju neverovatan uticaj na maksimalno smanjenje složenosti konstrukcije i maksimalno povećanje upotrebe standarda koji utiču na cenu. Koncept DFMA je napravljen s namerom da poveća svest svih uključenih u proces projektovanja o potrebi stalnog razvoja proizvoda i samog procesa.

3. PROCESI OBRADJE

Izbor odgovarajućih procesa proizvodnje za izradu određenog dela bazira se na pronalaženju potrebnih karakteristika tog dela sa mogućnostima procesa. Obzirom na fizičku suštinu, sve procese obrade možemo podeliti u tri grupe:

- Substraktivni procesi obrade (koji se karakterišu skidanjem materijala)
- Formativni procesi obrade (koji se karakterišu očvršćavanjem materijala)
- Aditivni procesi obrade (koji se karakterišu dodavanjem materijala)

Substraktivni procesi obrade su procesi gde se do željenog oblika dolazi skidanjem materijala. Substraktivna obrada obuhvata većinu procesa mašinske obrade i tu spadaju: glodanje, struganje, bušenje, sečenje, lasersko sečenje

je, sečenje vodenim mlazom, EDM i sl.

Kod formativnih procesa, čvrst ili polučvrst materijal se pod pritiskom dovodi u željeni oblik. Takve obrade su: livenje, savijanje, kovanje, injekciono livenje plastike i sl.

Substraktivni procesi, kao i formativni procesi, uključuju izbor sirovog materijala, proces selekcije, modularno projektovanje, upotrebu standardnih komponenti, razvoj delova za višestruku upotrebu, upotrebu odvojenih elemenata za vezu, smanjenje broja pravaca spajanja sklopa. Kirkland je dao listu faktora [2] koji utiču na projektantov izbor materijala, a Stoll navodi kontrolnu listu smernica za DFM [3], [4] koje predstavljaju sistematsku listu identifikovanih naredbi proisteklih iz primera dobre prakse u projektovanju.

Zajednička karakteristika ovih procesa je da za obradu koriste jedan ili više alata i jednu ili više alatnih mašina. Pre svake proizvodnje potrebno je definisati tehnološki postupak (pomoću CAPP sistema), odabrati i podesiti mašinu i alate, a kod NC mašina potrebno je napisati i program za upravljanje UJ NUMA (koristeći CAM sistem) [5].

Aditivni procesi [6] podrazumevaju spajanje čestica ili slojeva materijala u cilju dobijanja željenog oblika. Kod ovih procesa nema potrebe za alatima niti za posebnim podešavanjima mašine u zavisnosti od oblika izratka. Obzirom da je vreme pripreme proizvodnje jako skraćeno i obzirom da se ne zahtevaju posebni alati, ove tehnologije se nazivaju i brze proizvodne tehnologije ili direktne proizvodne tehnologije. Primeri ovih tehnologija su: stereolitografija, selektivno lasersko sinterovanje, 3D štampanje i izrada objekata laminacijom.

Mogući su i hibridni postupci obrade, koji kombinuju više procesa.

4. BRZE PROIZVODNE TEHNOLOGIJE

Razvoj brzih proizvodnih tehnologija, prvo za brzu izradu prototipova a zatim i za male serije, otvorio je novu eru u proizvodnim procesima. Ulazni podaci u ovim procesima su digitalne informacije koje opisuju fizički predmet u tri dimenzije (geometrijski model ili fizički model). Metod brzih proizvodnih tehnologija zavisi od uređaja proizvođača RP sistema i najčešće su to: fotoočvršćavanje, sečenje i spajanje, topljenje i očvršćavanje i lepljenje. Početno stanje materijala može biti čvrsto, tečno ili gasovito, što opet zavisi od metode i same mašine, kao što i sam izbor materijala zavisi od tehnologije koju koristi RP uređaj.

Pod brzim proizvodnim tehnologijama se podrazumeva čitav niz relativno novih, uglavnom aditivnih, tehnoloških postupaka koji omogućavaju direktnu proizvodnju kompleksnih fizičkih objekata koristeći kao ulaz 3D digitalni geometrijski model [13]. Geometrijski model može biti dobijen korišćenjem nekog CAD programa ili 3D skeniranjem postojećeg objekta i kasnijom obradom rezultata skeniranja (reverzibilni inženjering).

Sadašnji RP sistemi mogu direktno izrađivati funkcionalne delove u malim serijama. Ovi delovi obično imaju slabije karakteristike od delova dobijenim klasičnim mašinskim postupcima, mada napredni sistemi mogu proizvesti delove koji uz postprocesuiranje imaju karakteristike bliske konačnom proizvodu. Još veću važnost ima čin-

jenica je potrebno izuzetno malo vremena (nekoliko sati ili možda dan) da se od gotovog CAD modela izradi gotov prototip, što u velikoj meri smanjuje troškove.

Preduzeća koja upotrebljavaju RP tehnologije imaju mogućnost da eksperimentišu sa fizičkim objektima uz relativno mali utrošak vremena. RP tehnologije ostavljaju velike efekte na vreme i ulaganja potrebna za serijsku proizvodnju gde zavisno od obima proizvodnje, uštede u vremenu i ceni mogu biti od 50% do 90% ukoliko se koriste RP sistemi [6].

RP tehnologije omogućuju dizajnerima da stvaraju kompleksnije delove bez značajnih utrošaka vremena i novca. Ovo jeste i jedna od najvećih prednosti u RP tehnologijama, za razliku od klasičnih proizvodnih procesa gde su značajna tehnološka ograničenja bila upravo po pitanju geometrije.

Dizajneri mogu lakše da odgovore na potrebe kupaca optimizacijom proizvoda koja će imati neznatni uticaj na proizvodnju. DFM metodologija pokušava da smanji broj potrebnih delova na minimum, a ovde se broj pozicija smanjuje kombinovanjem više delova u složeniji deo sa istom funkcionalnošću. Projektovanjem manjeg broja delova štedi se vremenu potrebnom da se svaki deo posebno projektuje, ali i na vremenu neophodnom da se deo sastavi u sklop ili podsklop. Time se smanjuju troškovi montaže, nabavke i skladištenja.

Smanjuje se i broj ograničenja koja se odnose na oblik delova. U ranijim priručnicima za proizvodnju nalazile su se preporuke da se pri projektovanju izbegavaju oštre ivice, odnosno oštri uglovi i sl. Sada se mogu projektovati delovi koji su problematični za postavljanje u alate za mašinsku obradu, a i ne mora se voditi računa o višku materijala.

Smanjuje se i fizički rad u proizvodnji, jer nema specifičnih podešavanja i programiranja mašina za svaki deo posebno, manji je rad oko mašinske obrade i livenja pa je shodno tome i umanjena kontrola kvaliteta. U ovim postupcima smanjuju se viškovi materijala, troškovi odlaganja otpada, troškovi transporta materijala, broj komada u skladištu što sve može da doprinese manjim režijskim troškovima.

Nabavka je pojednostavljena jer je jedinična količina materijala gotovo nezavisna od količine, pa se mogu nabavljati količine potrebne za kraći period ili samo za određenu seriju. Greške u tumačenju dizajna se značajno manje ako se prototipovi izrađuju u više faza razvoja, što je prihvatljivo ukoliko se koriste RP sistemi. RP sistemi omogućuju izradu rezervnih delova po zahtevu, čak i za delove čiji su alati izgubljeni što u ukupnim troškovima održavanja ima značajnu ulogu jer će se smanjiti nepotrebna proizvodnja rezervnih delova.

4. TEHNOLOŠKA OGRANIČENJA U PROCESIMA OBRADU

Projektovanje za proizvodnju uključuje istovremeno razmatranje projektantskih zadataka i tehnoloških ograničenja u cilju prepoznavanja i prevazilaženja proizvodnih problema dok se proizvod još projektuje i tako nastoji da smanji vreme potrebno za razvoj proizvoda i poboljša kvalitet proizvoda.

Tehnološkičnost proizvoda se u najširem smislu te reči može definisati kao mera pogodnosti njegove izrade u

određenom proizvodnom sistemu, uz ostvarenje minimuma proizvodnih troškova [8].

Najčešći problemi koji se razmatraju u analizi tehnološkičnosti virtuelnih proizvoda svode se na sledeće tri analize:

1. Utvrditi da li je virtuelni proizvod (oblik, dimenzije, tolerancije, kvalitet površina) moguće uopšte izraditi ili ne?

2. Ako je utvrđeno da je virtuelni proizvod moguće izraditi, utvrditi stepen tehnološkičnosti,

3. Ako je utvrđeno da je virtuelni proizvod nemoguće izraditi, prepoznati svojstva koja stvaraju probleme prilikom izrade.

Tehnološkim ograničenjima u tzv. konvencionalnim postupcima obrade (substraktivnim i formativnim) bavili su se mnogi autori. Tako je Gupta [9], [10] predstavio metodologiju za ranu procenu tehnološkičnosti za prizmatične obradne komponente, gde se identifikuju sve moguće tehnološke operacije, a zatim se da li se željeni oblik može ostvariti propisanim postupkom. Hsiao [11] je razvio bazu znanja za sprovođenje analize tehnološkičnosti delova koji se izrađuju rezanjem, definisanjem geometrijskih tehničkih elemenata u cilju opisivanja obradnih procesa i ograničenja koja se tiču kretanja alata. Cutkosky i Tenenbaum [12] su razvili NEXT-Cut sistem za modeliranje i projektovanje tehnologije delova koji se obrađuju rezanjem.

Svi gore navedeni autori u svojim radovima proučavaju substraktivne obradne procese i suočavaju se sa problemima geometrije dela koji se izrađuje. Tehnološka ograničenja u formativnim i substraktivnim procesima obrade (tradicionalnim postupcima) ukazuju da je veoma teško izraditi složenu geometriju dela ili sitne detalje.

4.1 Tehnološka ograničenja RP tehnologija

Opšti preduslov za RP procese [6] je napredno 3D CAD modeliranje, što je često vremenski najzahtevniji korak, obzirom da se na ovim modelima treba vršiti analiza napona, FEM analize, planiranje za proizvodnju i sl.

RP zahteva modele ograničene zapremine, bez obzira da li se radi o površinskim ili zapreminskim elementima. Kako bi sistem bio optimalno upotrebljen i dao dobre performanse, parametri procesa moraju biti adekvatni. Mora se uzeti u obzir orijentacija dela, potrebe za osloncima, teško izvodljive strukture (tanki zidovi, mali otvori i prepušti). Problem je proistekao iz činjenice da postoje različite RP mašine sa raznim zahtevima i mogućnostima. Na primer, dok SLA zahteva oslonce, SLS ne zahteva.

Površinski ili solid model koji se izrađuje treba prvo da se konvertuje u STL fajl format koji aproksimira površinu modela upotrebom sićušnih trouglova. Izrazito zakrivljene površine opisuju se sa znatno više trouglova, čime i onako veliki fajlovi postaju znatno veći.

Dešava se da STL fajlovi budu neispravni zbog grešaka u modeliranju ali i usled nesavršenosti CAD-STL interfejsa. Današnji CAD modeli, čiji je kvalitet zavistan od CAD sistema, operatora i postprocesuiranja, imaju dosta problema, uključujući neželjene pukotine u ljuskama (rupe, naprsline, zazoni i sl.). Trenutno se greške u CAD modelima ispravljaju uz pomoć specijalizovanih softverskih paketa, a sam proces je jako naporan i vremenski

zahtevan. Ispravan STL fajl računar RP sistema analizira i iseca ga na horizontalne poprečne preseke koji se sekvencijalno izrađuju nekim od RP principa.

Neke od RP tehnologija se mogu koristiti za direktnu izradu samorazgradivih implantata korišćenjem već postojećih biokompatibilnih komercijalnih materijala u praškastom obliku.

Tehnologija trodimenzionalnog štampanja (eng. 3D printing – 3DP) se za sada pokazala kao najpogodnija za ovu vrstu implantata tako da će ona u ovom radu biti detaljnije obrađena.

4.1.1 Orijetacija modela u radnom prostoru RP mašine

Vreme izrade dela kao i kvalitet njegove površine bitno mogu da zavise od načina orijentacije. Kod aditivnih procesa, vreme gradnje modela je proporcionalno broju slojeva od kojih se model gradi. Na ovaj način, pravilna orijentacija (najveća dimenzija je u pravcu Z ose) smanjuje vreme izrade.

Sa druge strane, orijentacija modela utiče i na mehaničke karakteristike izrađenog dela. Izradak je najslabiji u pravcu normalnom na slojeve izrade, jer su uglavnom kod svih RP tehnika veze između slojeva slabije nego unutar jednog sloja [6]. Orijetacija zavisi i od planiranog napreznja prototipa, pa može biti odstupanja od ove preporuke.

Od orjenetacije u mašini zavisi i kvalitet površine, pa će tako cilindrične forme uvek biti kvalitetnije izrađene ukoliko se deo orijentiše da je osa cilindra paralelna Z-osi.

Kod zakrivljenih površina, usled slojevite prirode gradnje modela, dolazi do pojave efekta stepenica što takođe utiče na kvalitet površine. Efekat stepenica je posledica aproksimacije veličine poprečnog preseka. U slučaju geometrijskog modela poprečni presek se kontinuirano menja, ali prilikom proračuna poprečnih preseka koji odgovaraju sukcesivnim slojevima prototipa, dolazi do diskontinuiteta u njihovoj veličini, koji se manifestuje u obliku stepenica.

4.1.2 Kreiranje nosećih struktura

Neke od metoda za brzu izradu prototipova tokom procesa gradnje modela ne obrazuju odmah potpuno čvrst model koji je sposoban da nosi gornje slojeve materijala. Ovaj problem je posebno značajan prilikom izrade fizičkih modela koji imaju takozvane viseće elementa [6] (npr. drška kod šolje za čaj), a tokom gradnje modela ne postižu dovoljnu krutost. Zbog toga se u ovakvim slučajevima geometrijskom modelu dodaje noseća struktura. Zadatak noseće strukture je da spreči deformisanje visećih elemenata. U nekim slučajevima se noseća struktura postavlja između platforme i modela kako bi se kasnije olakšalo odvajanje prototipa od platforme. Materijal noseće strukture često nije istih karaktersitika kao materijal prototipa, već je obično slabiji kako bi se olakšalo njegovo uklanjanje tokom postprocesiranja.

Obzirom da prilikom izrade predmeta RP tehnologijama svaki novi sloj opterećuje prethodne slojeve, oslonci služe da se predmet, prilikom izrade, ne kreće po radnoj platformi.

Podupirači, kao posebna vrsta struktura za oslanjanje, koriste se za prepuste i za veće šupljine u predmetu izrade.

Pri projektovanju, treba uvek imati na umu da predimenzionisani oslonci povećavaju vreme izrade, a da nedovoljno čvrsti oslonci dovode do urušavanja predmeta izrade.

5. TEHNOLOŠKA OGRANIČENJA U VODEĆIM RP TEHNOLOGIJAMA

5.1 Stereolitografija – SLA

Da bi se održala preciznost – konzistentnost u toku izrade dela, dubina očvršćavanja i širina očvršnute linije se moraju kontrolisati. Ovaj postupak [6] zahteva da pored 3D geometrijskog modela projektuje i noseća struktura, koja povezuje deo koji se izrađuje i platformu (kako bi se povećala krutost), čime se izbegava mogućnost da deo potone na dno radne komore ili da slobodno pluta u komori.

Pored toga SLA tehnologija zahteva oslonce za delove koji imaju prepuste i useke. Oslonci se izrađuju zajedno sa modelom. Zato je potrebno obezbediti postprocesuiranje koje obuhvata uklanjanje oslonaca i drugog neželjenog materijala, a ako izradak treba imati finu površinu, deo se na kraju peskari i ručno polira.

Često je potrebno da se predmet naknadno očvršćava nakon izrade kako bi se polimerizacija potpunosti izvršila i da bi se ojačala struktura predmeta. Dugotrajno očvršćavanje, sa druge strane, može dovesti do deformisanja. Glavno pitanje u pogledu izrade kod svih aditivnih postupaka jeste minimalna visina sloja koji može da se nanese. SLA softver pravi horizontalne preseke STL modela od najčešće 0,1 mm što definiše i samu visinu slojeva od kojih se deo gradi.

Orijentacija modela je važna kao zbog efekta pojave stepenica, pomenutog u prethodnom poglavlju, tako i zbog samog vremena izrade.

Materijal koji se koristi za SLA su monomeri koji često toksični. Pored pažljivog rukovanja, neophodno je obezbediti i adekvatne uslove u pogledu ventilacije, kao i posebnih mera opreza.

5.2 Selektivno lasersko sinterovanje – SLS

Pri ovom postupku [6] može se koristiti veliki izbor materijala koji daju dobru postojanost izratku pri čemu, tokom izrade, nema potrebe za osloncima, niti je potrebno naknadno očvršćavanje. Ipak, površina dobijenog dela ima slab kvalitet, što je posledica relativno velikih dimenzija čestica praha, pa je neophodno postprocesuiranje kako bi se dobio zadovoljavajući kvalitet površine [6].

Zbog velike snage lasera potrebnog za sinterovanje praha, ovaj sistem troši dosta električne energije. Za instalaciju ovih sistema potreban je veliki prostor. Dodatni prostor potreban je za skladištenje inertnog gasa koji je neophodan u procesu izrade da bi se izbegla oksidacija ili eksplozija finih čestica praha.

Nakon izrade na SLS mašini neophodna je infiltracija drugog materijala jer su izrađeni delovi porozni. Zbog sekundarnog procesa sinterovanja u Laserform pećima, proces izrade se povećava za 24 časa.

5.3 Direktno lasersko sinterovanje metala – DMLS

DMLS tehnologija [6], spada u RP postupke koji koriste praškaste materijale i gde se izrada modela svodi na korišćenje toplotne energije lasera u cilju sinterovanja ili topljenja čestica praškastog materijala u određenim tačkama koje odgovaraju poprečnom preseku modela na odgovarajućoj visini.

Ovo je postupak selektivnog laserskog sinterovanja gde nema potreba za sekundarnim procesom sinterovanja i sagorevanja u peći za sinterovanje što znatno skraćuje vreme izrade.

Glavna prednost DMLS postupka ogleda se u mogućnosti izrade gotovo svakog oblika (sa svim detaljima). Uzimajući u obzir da vreme potrebno za brzu izradu prototipa zavisi od veličine modela, pravilna optimizacija pored ogromne uštede u vremenu izrade modela, štedi i materijal.

Ograničenja ovog postupka jesu u veličini kalupa koji može biti sinterovan ovim sistemom, obzirom na podatak da je maksimalni proizvodni prostor DMLS komore 250 mm x 250 mm x 215 mm. Pored toga, za veće segmente i vreme i materijal potrebni za proizvodnju se povećavaju, što utiče na povećanje troškova proizvodnje [13], jer je cena materijala na tržištu visoka.

5.4 Selektivno lasersko topljenje – SLM

SLM je prva tehnologija direktne izrade alata koji koristi jednokomponentni metalni prah veličine zrna između 10 - 30 μm za izradu delova gustine približno 100 % [14].

Proces SLM počinje tako što se praškasti materijal nanosi u tankom sloju na ravnu površinu koja je pričvršćena za pokretni klip [6]. Pomoću jakog infracrvenog laserskog zraka prečnika samo 30 μm selektivno se vrši topljenje čestica jednokomponentnog metalnog praha u mikroskopskoj zoni i to samo u tačkama koje odgovaraju poprečnom preseku modela na visini koja se trenutno izrađuje.

U odnosu na SLS i DMLS ova metoda daje grublji kvalitet, naročito kod delova sa radijusima. Neophodno je nekoliko sati finog poliranja da bi se dobio željeni kvalitet površine.

5.5 3D štampanje – 3DP

3DP postupak [6] koristi različite materijale u obliku praha i vezivna sredstva najčešće u obliku tečnosti. U procesu 3D štampanja se praškasti materijal nanosi u tankom sloju na ravnu površinu. Pomoću mlaznice, koja je slična onima koje se koriste kod ink-jet štampača, selektivno se vrši spajanje čestica praha brizganjem vezivnog sredstva u odgovarajućim tačkama poprečnog preseka.

Delovi izrađeni 3DP tehnologijom su znatno slabiji u odnosu na SLS, što ograničava upotrebu u funkcionalnim ispitivanjima. Delovi od gume, izrađeni ovim tehnologijama, zahtevaju dodatnu infiltraciju nekih materijala kako bi im se povećala gustina.

Izbor materijala u ovom postupku je ograničen od strane proizvođača uslovima korišćenja, odnosno gubljenjem garancije u slučaju korišćenja materijala koji nisu odobreni.

Delovi dobijeni 3d štamptom imaju grubu površinu pa je potrebno naknadno postprocesuiranje kako bi se došlo do zadovoljavajućeg kvaliteta površine.

5.6 Izrada modela ekstruzijom istopljenog materijala – FDM

FDM sistem [6] može da učita zapreminski, površinski ili žičani model, ali pre samog početka izrade moraju svi horizontalni režnjevi da budu definisani i tek tada se podaci o kretanju ekstruzione glave za svaki presek prebacuju jedinici za numeričko upravljanje kretanja glave (ovo može biti i korisno jer postoji mogućnost da korisnik ručno izmeni putanju kretanja alata).

Noseće strukture su najveći problem kod FDM-a u odnosu na sve ostale SFF tehnologije jer nema tečnog polimera ili sloja praha da pričvrsti najviši sloj koji se nanosi, pa će noseća struktura biti potrebna svuda gde je slabeći (najveći) sloj širi od prethodnog. Ovde je važno da noseća struktura bude dovoljno jaka, ali i da može sa lakom da se ukloni.

Delovi koji imaju unutrašnje otvore sa horizontalnim površinama teško se izrađuju FDM tehnologijama jer ne postoji način za otklanjanje noseće strukture.

Objet PolyJet tehnologija je unapredila FDM procese i postavila nove standard obzirom da može da ostvari ultra tanke slojeve od 16 μm , što je među vodećim rezultatima na tržištu. Pored toga sam process je znatno brži od ostalih FDM procesa. Kao potporni materijal za komplikovane geometrije, posebno je dizajniran gel koji se kasnije lako odvaja ručno ili vodenim mlazom.

Moguće je da se ovim procesom izrade fini detalji tankih zidova od 600 μm (ili manje u zavisnosti od geometrije). Širok spektar materijala mogućava izradu delova različite geometrije, mehaničkih osobina i boja.

Ovaj proces karakteriše pojava skupljanja i krivljenja jer se materijal ekstrudira kroz glavu i naglo hladi pri deponovanju, pri čemu se, usled brzog hlađenja, javljaju naponi koji naprežu model.

5.7 Proizvodnja objekata laminacijom – LOM

Slojeviti delovi rade se od tankih laminata trakama, a stabilnost celog objekta je ograničena lepljivošću adhezivnog sredstva na laminatu.

Delovi koji imaju jako složenu topologiju nemoguće je napraviti jer je nemoguće skloniti višak laminata, a da se pri tom ne poremeti model.

Ovaj proces nije pogodan za izradu delova u Z pravcu što ukazuje da LOM tehnologije nisu pogodne za izradu kompleksnih delova. Delovi sa potpuno zatvorenim rupama unutar modela ne mogu se izraditi LOM tehnologijama jer je nemoguće izvući višak laminata iz rupa.

Tehnološka ograničenja javljaju se i u pogledu izrade šupljih delova, npr. boce, koje je nemoguće izraditi ovim procesima.

Kod ove tehnologije moguća je pojava raslojavanja

nja modela.

Iako materijal ima prihvatljivu cenu, tokom ovog procesa javlja se velika potrošnja istog, jer se višak materijala nepovratno baca i ne može se ponovo koristiti.

Višak materijala se uklanja ručno, što je dugotrajan i nezgodan posao naročito ako postoje sitni detalji jer može dovesti do oštećenja modela.

5.8 Topljenje mlazom elektrona - EBM

EBM tehnologija se zasniva na procesu topljenja čestica odgovarajućih praškastih materijala uz pomoć snopa elektrona. EBM procesom [15] se postiže gustina dobijenih delova 100%. Veličina čestica praha se kreće od 45 - 150 μm u prečniku. Snop elektrona topi čestice praha u odgovarajućim tačkama poprečnog preseka a na osnovu geometrijskog modela.

Za razliku od drugih RP procesa EBM se zasniva na izradi modela u vakumu što omogućava očuvanje hemijskog sastava korišćenog materijala i minimizuje mogućnost hemijske reakcije između rastopljenog metalnog praha i okolne atmosfere (naročito kada su u pitanju legure Ti).

6. UPOREDNI PRIKAZ POJEDINIH KARAKTERISTIKA VODEĆIH BRZIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA

Rapid prototyping (RP) tehnologije i reverzni inženjering (eng. Reverse engineering – RE) su počele da igraju vrlo značajnu ulogu u polju medicine. Kompatibilnost RP tehnologija i dijagnostičkih slikovnih metoda kao što su CT skener i magnetna rezonanca omogućilo je da su uz pomoć RE-a, RP tehnologije sve prisutnije u ovoj oblasti [15].

Sa druge strane, pravilan izbor tehnologije zavisi od samog proizvodnog procesa koji zavisi od samog proizvodva – geometrije, ali i drugih karakteristika.

Izvršena su različita upoređivanja proizvodnih tehnologija i materijala za izradu implantanata [14], tehnologija za brzu izradu prototipova u proizvodnji alata za vulkanizaciju pneumatika [16], kao i brza izrada alata DMLS tehnologijom [13].

Najznačajnije ograničenje karakteristično za sve aditivne procese ogleđa se u minimalnoj debljini sloja koji se nanosi. Pregled ovih veličina pojedinih tehnologija dat je u tabeli 1. Prikaz najmanjih detalja koje je moguće proizvesti ovim tehnologijama i pojedinim mašinama dat je u tabeli 2.

U tabeli 3. [17] dat je prikaz različitih RP tehnologija i njihovih karakteristika u pogledu geometrijskih mogućnosti procesa, tačnosti i fleksibilnosti materijala koji se koriste.

Tabela 1. Prikaz tehnologija korišćenih za izradu segmenta alata za vulkanizaciju pneumatika [16]

PROCES	MEHANIZAM VEZIVANJA	MATERIJAL	DEBLJINA SLOJA (μm)
LOM	Laminacija i lepljenje	Papir	140
3DP	Vezivanje praha lepkom	Zp100 powder	76 – 254
SLS	Sinterovanje u tečnoj fazi	Laserform A6	127
SLM	Potpuno topljenje po dubini	Prah nerđajućeg čelika 316L	75
DMLS	Delimično topljenje ili sinterovanje	Directsteel H20	20 – 40

Tabela 2. Veličina najmanjih detalja koje je moguće proizvesti *

PROCES	MAŠINA	NAJMANJA VELIČINA DETALJA (μm)	DEBLJINA SLOJA (μm)
3DP	Zbuilder Ultra	138	50
	ZPrinter 650	200	89 - 102
SLA	Viper si ²	120	60
	SLA 7000	300	25
SLS	Vanguard	500	100
	PM100T	300	20
SLM	MCP Realizer	500	50
	SLM 250	500	20
DMLS	EOSINT M270	600 (min. debljina zida)	20
		700 (min. debljina zida)	20
FDM	Connex 500	600 (min. debljina zida)	16
	Alaris30	200	28

* Navedene karakteristike zavise od kompleksnosti geometrije dela, orijentacije u mašini, kao i samog izbora materijala koji se koristi.

Tabela 2. Upoređivanje različitih procesa [17]

RP/RM tehnologija	Geometrijske mogućnosti (sposobnosti)	Tačnost	Fleksibilnost materijala
SLA	Dobre, uklanjanje nosača može biti teško	Dobra, ali ograničena u pravcu Z-ose	Kalifornijski kalaj (smola), ograničen set materijala
SLA/višemlazni	Odlične, nosači se lako uklanjaju	Veoma dobra do odlična, male dubine slojeva	Kalifornijski kalaj (smola), ograničen set materijala ali uključuju i više materijala i neke elastomere (sintetičke polimere)
FDM	Veoma dobre, ograničene ukoliko nosači nisu rastvorivi u vodi	Dobra, ograničena velikom dubinom slojeva	Dobri plastični izbori
solidscape	Veoma dobre, lako se uklanjaju nosači	Veoma dobra do odlična	Ograničeni na nisko topljivu plastiku, voskove
SLS	Veoma dobre, neka pitanja oko uklanjanja praha iz unutrašnjih otvora	Dobra do veoma dobra	Uglavnom plastika, obloženi (premazani) metali i pesak
DMLS	Veoma dobre, neka pitanja oko uklanjanja praha iz unutrašnjih otvora	Dobra do veoma dobra	Metali, ali ograničeni na kvalitet braon PM delova sa poroznošću
LENS	Ograničene na 2-1/2 D	Ograničen na umeren	Dobra, čelici i titanijum, dobra gustina

6. ZAKLJUČAK

Stalni razvoj tehnoloških procesa doveo je da se pored konvencionalnih procesa obrade (substraktivni i formativni procesi) razviju i brze proizvodne tehnologije gde se izradak uglavnom proizvodi dodavanjem materijala (aditivni procesi).

Metode i aplikacije za procenu tehnološkičnosti tokom funkcionalnog razvoja proizvoda zasnovane su na veštačkoj inteligenciji i kao takve ne mogu biti u potpunosti sagledane i prihvaćene, već je na projektantu odgovornost u postupku izbora metode ili aplikacije.

Brze proizvodne tehnologije odlikuju se prvenstveno nepostojanjem ograničenja obzirom na geometriju, što je i najvažnija prednost u poređenju sa tzv. konvencionalnim obradnim procesima.

Karakteristika da se geometrijski zahtevan deo može direktno proizvesti iz 3D CAD modela na jednoj mašini, jednom tehnologijom, bez korišćenja drugih alata, dodatne reorijetacije delova i sklapanja delova, uz veliku uštedu u procesu projektovanja kao i same izrade, pri čemu su ukupni troškovi znatno manji nego kod substraktivnih, formativnih ili hibridnih procesa, ukazuje da su brze proizvodne tehnologije započele novu eru u razvoju proizvodnih sistema.

LITERATURA

- [1] G. Boothroyd and A. H. Redford (1968.), *Mechanized Assembly*, McGraw-Hill, London.
- [2] Kirkland, C. (1988). Meet two architects of design-integrated manufacturing. *Plastics World*, December, 46-50.
- [3] Stoll, H.W. (1988). Design for manufacturing. *Manufacture Engineering*, January, 67-73.
- [4] Stoll, H.W. (1988). Design for manufacture, *Tool and manufacturing handbook*. Vol. 5 SME Press (pp. 13-1 – 13-32).
- [5] Trajanović M., Possibilities of using rapid prototyping technologies in tyre mold manufacturing, 2nd Conference Pneumatics, Belgrade, Serbia and Montenegro, 2002.
- [6] M. Trajanović, N. Grujović, J. Milovanović, B.

Milivojević, Računarski podržane brze proizvodne tehnologije, monografija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2008.

[7] Harrison P., „Rapid prototyping user guide“, Faculty of Computing Science and Engineering, De Montfort University, Leicester, 2003.

[8] Manić M., Miltenović V., Stojković M., Banić M., *Feature Models in Virtual Product Development*

[9] Gupta, S.K., D.S. Nau, W.C. Regli, D. Nau (1997.), *Automated Manufacturability Analysis: A Survey*. *Research in Engineering Design*, 9 (3): 168-190.

[10] Gupta, S.K. and D. Das, (1995.), *A systematic Approach for Analyzing the Manufacturability of Machined Parts*. *Computer Aided Design*, 27(5): 343-352.

[11] Hsiao, D., (1991.), *Feature Mapping and Manufacturability Evaluation with an open set feature modeler*. PhD thesis, Mechanical Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona.

[12] Cutkosky, M.R. and Tenenbaum, J.M., (1992.), *Toward a framework for concurrent design*, *International Journal of Systems Automation: Research and Applications*, 1(3): 239-261.

[13] Milovanovic J., Stojkovic M., and Trajanovic M., *Rapid Tooling of Tyre Tread Ring Mould Using Direct Metal Laser Sintering*, JSIR, Vol. 68 (12), December 2009, pp. 1038-1042

[14] Milovanović J., Trajanović M., Vitković N., and Stojković M., *Rapid prototyping tehnologije i materijali za izradu implantata*, IMK-14 Istraživanje i razvoj, godina XV, broj 1-2, 2009., pp 23-29.

[15] Milovanović J. and Trajanović M., *Medical applications of rapid prototyping*, *Facta Universitatis series Mechanical engineering*, vol 5, no 1, 2007, pp 79-85

[16] Milovanović J., *Mogućnost korišćenja tehnologija za brzu izradu prototipova u proizvodnji alata za vulkanizaciju pneumatika*, Magistrski rad, Mašinski fakultet u Nišu, Niš, 2006.

[17] Yang Z., Wusk R., Joshi S., Frank M., and Petrzela J., *Conventional machining methods for rapid prototyping and direct manufacturing*, *Int. J. Rapid Manufacturing*, Vol. 1, No. 1, 2009

TECHNOLOGICAL LIMITATIONS OF RAPID MANUFACTURING TECHNOLOGIES

Abstract: *Technological capabilities of certain production technologies are the basis for the design for manufacturing and assembly work. These capabilities are known for the case of subtractive and formative technologies. However, for the rapid manufacturing technologies, that are experiencing explosive growth, the technological capabilities, which are otherwise broad, are insufficiently known. This paper analyses and shows the technological capabilities (and limitations) of the most commonly used rapid manufacturing technologies based on the additive processes of processing.*

Key words: *Rapid prototyping (RP), Design for Manufacturability (DFM).*