

ULOGA I ZNAČAJ REVERZNOG INŽENJERSTVA I BRZE IZRADE PROTOTIPOVA U ODRŽAVANJU ROLE AND IMPORTANCE OF REVERSE ENGINEERING AND RAPID PROTOTYPING IN THE MAINTENANCE

Dragan Milutinović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

Nikola Slavković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

Rezime: Primena tehnologija reverznog inženjerstva i brze izrade prototipova postaju sve važnije i oblasti održavanja mašina i opreme. Česta potreba da se urgentno izradi oštećeni ili pohabani deo za neku mašinu za koju nema rezervnog dela, dokumentacije ili CAD modela, imperativno nameće potrebu za primenom reverznog inženjerstva kao efikasne i vrlo upotrebljive tehnologije koju po pravilu prati i primena tehnologije za brzu izradu funkcionalnih prototipova odnosno onih postupaka koji omogućavaju izradu delova koji su u stanju da barem privremeno obavljaju svoju funkciju. U ovom radu se ukratko razmatra uloga i značaj primene ove dve tehnologije u održavanju mašina i opreme.

Ključne reči: reverzno inženjerstvo, brza izrada prototipova, održavanje

Summary: The application of reverse engineering and rapid prototyping technology are becoming more important in the field of maintenance of machines and equipment. The frequent need to urgently make a damaged or worn part for a machine that has no spare parts, documentation or CAD models imperatively imposes the need for the application of reverse engineering technology as effective and very useful technology. The use of this technology involves the use of technology for the rapid manufacturing of functional prototypes i.e. the use of those procedures that enable the production of parts that are able to at least temporarily perform their function. This paper considers the role and importance of application of these two technologies in the field of maintenance of machines and equipment.

Keywords: reverse engineering, rapid prototyping, maintenance

UVOD

Svaki proizvod, mašina, oprema ili uređaj podrazumevaju da u životnom ciklusu prolaze kroz faze koncipiranja, projektovanja, konstruisanja, gradnje (izrade) i održavanja. Potrebe za brzim odgovorima na sve oštrije zahteve konkurencije su nametnule razvoj novih tehnologija kao što je simultano ili konkurentno inženjerstvo koje na paralelan način obuhvata ove pomenute faze u nastanku proizvoda koje se, kao i u konvencionalnim slučajevima, smatraju za tzv. direktno inženjerstvo. Pored CAD/CAM-a okosnicu simultanog inženjerstva čini i tehnologija brze izrade prototipova.

Primena reverznog inženjerstva svoju važnu ulogu dobija upravo tokom održavanja mašina i opreme. Mašine i oprema moraju stalno biti u funkciji jer svaki izgubljeni sat zbog njihovog otkaza je gubitak novca i kašnjenja u rokovima. Mnogi problemi vezani za održavanje mašina i opreme u radno sposobnom stanju se mogu rešavati primenom tehnologija reverznog inženjerstva i brzim izradom funkcionalnih prototipova.

Problemi koji se mogu pojaviti kod održavanja mašina i opreme a koje tehnologije reverznog inženjerstva /1-3/ i brze izrade funkcionalnih prototipova /4/ mogu efikasno rešiti se ukratko mogu sumirati na sledeće: (i) urgentna potreba za rezervnim delom ili njegovom reparacijom; (ii) originalna dokumentacija dela je nedostupna; (iii) proizvođač je obustavio proizvodnju svog proizvoda, kao i rezervnih delova za održavanje.

Danas su posebno intenzivna istraživanja u oblasti reverznog inženjerstva i imaju dosta kompletiranih rezultata. Neki od tih rezultata su dati u referencama /1-3/.

Mašinski elementi tokom rada se očekivano habaju i vremenom ih je potrebno zameniti novim ili repariranim delovima. Kako pouzdano znati koji je to trenutak za zamenu, čime će biti predupređen lom i teže oštećenje. U radu /2/ je prikazana metodologija za merenje i inspekciju korišćenjem alata za reverzni

*Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Republika Srbija
dmilutinovic@mas.bg.ac.rs

inženjering. Metodologija uključuje skeniranje dotrajalog ozubljenja, čime se dobija stvarno stanje pohabane površine ozubljenja i stvara realni 3D model. Ovaj model se upoređuje sa inicijalnim 3D modelom i na osnovu toga se donosi zaključak o daljim akcijama. Da li mašina može dalje da radi, ili je neophodna zamena dela ili njegova reparacija. Održavanje je vrlo bitno pri radu odgovornih sistema posebno u automobilske, avionske, energetske industriji i dr. Vrlo često je za bezbedan rad neophodna povremena reparacija nekih mašinskih elemenata, jer rezervnih delova ili jednostavno nema ili je jeftinije izvršiti reparaciju. Najskuplje bi bilo da dođe do lomova i ne planiranih remonta. Primer jedne metodologije za rekonstrukciju gasne turbine je dat u /3/ i obuhvata različite algoritme za popravku oštećenih lopatica. Ovaj proces obuhvata pet faza kao što su: (i) pred remonta inspekcija; (ii) identifikacija površina; (iii) rekonstrukcija defektne površine; (iv) navarivanje materijala na defektne površine; (v) obrada defektne navarene površine glodanjem i brušenjem.

U ovom radu se daje osvrt na ulogu i značaj primene reverznog inženjerstva i brze izrade prototipova u oblasti održavanja mašina i opreme, sa jednim primerom potencijalne primene, koja opisuje metodologiju primene ovih metoda.

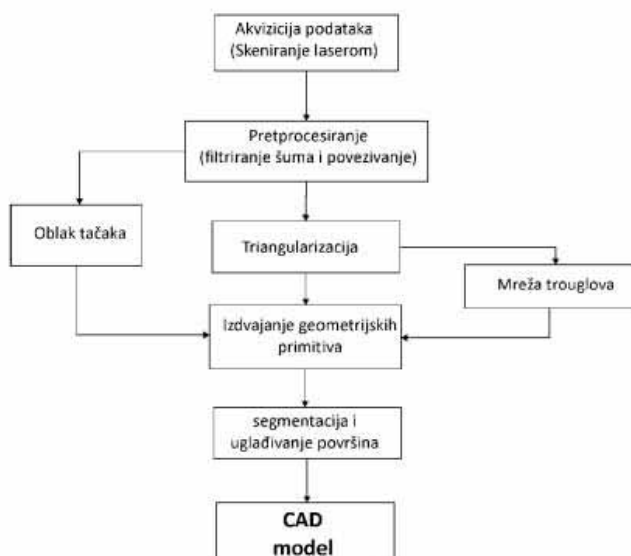
POJAM REVERZNOG INŽENJERSTVA

Reverzno inženjerstvo se definiše kao proces u kojem se dobija CAD model nekog fizičkog dela, kako bi se on ponovo napravio, doradio ili u cilju otkrivanja tajni u samom projektu. Reverzno inženjerstvo je takođe i postupak preuzimanja nove geometrije iz proizvodnje u cilju digitalizacije i izmene postojeće CAD dokumentacije /6/. Reverzno inženjerstvo predstavlja i koncept za ostvarivanje proizvodnje na osnovu originalnog fizičkog modela, bez postojanja i upotrebe tehničke dokumentacije /7/. Možemo reći da je reverzno inženjerstvo u opštem slučaju postupak kopiranja postojećeg dela, ili sklopa ili celog proizvoda, u novi CAD model u slučajevima kada nemamo tehničku dokumentaciju ili 3D model. Reverzno inženjerstvo obuhvata metode koje treba da se sprovedu u cilju akvizicije 3D geometrijskih podataka o stvarnom delu uz odgovarajući softver za naknadnu obradu i doradu dobijenih informacija.

U ovom radu ćemo se ograničiti samo na primene reverznog inženjerstva u mašinske industriji i to u sledećim slučajevima: (i) za dobijanje 3D modela mašinskog dela, za koji je izgubljena ili nije ni postojala nikakva tehnička dokumentacija; (ii) za formiranje sopstvene CAD biblioteke 3D modela rezervnih delova, koji se po potrebi mogu brzo izraditi; (iii) za analizu proizvoda konkurencije, prema nabavljenom uzorku; (iv) za vršenje inspekcije trenutne geometrije nekog odgovornog dela u poređenju sa nominalnom geometrijom CAD modela i donošenje zaključka o stanju tog dela; (v) za proveru pohabivosti delova, posebno alata velikih gabarita, radi utvrđivanja moguće potrebne reparacije i njihove zamene.

Reverzno inženjerstvo uključuje tri glavna koraka koja se koriste za izdvajanje informacija o projektu, materijalu, strukturi i kvalitetu površina i uslovima rada izabranog proizvoda i to: (1) faza skeniranja, (2) faza procesiranja oblaka tačaka i (3) faza solid modeliranja. Primer jednog dijagrama toka primene reverznog inženjerstva prema /8/, pokazan je na slici 1. Prema ovom dijagramu osnovne faze ili etape u reverznom inženjerstvu su akvizicija podataka (skeniranje), pretprocesiranje, triangulacija, izdvajanje (ekstrakcija) geometrijskih primitiva, segmentacija i uglađivanje površina, da bi se kao krajnji rezultat dobio CAD model nastao na osnovu oblaka tačaka dobijenih skeniranjem.

U fazi akvizicije podataka se vrši prikupljanje geometrijskih informacija fizičkog dela kroz primenu skeniranja. Eventualno ako su delovi većeg gabarita bez zahteva za velikom tačnošću, moguće je primeniti i fotogrametrijsku metodu. U fazi pretprocesiranja obrađuje se rezultat skeniranja u cilju otklanjanja šumova, primenom filtera, čime se ostvaruje smanjivanje broja tačaka uklanjanjem onih koje su nepotrebne za model.



Slika 1. – Dijagram toka osnovnih faza u primeni reverznog inženjerstva /8/

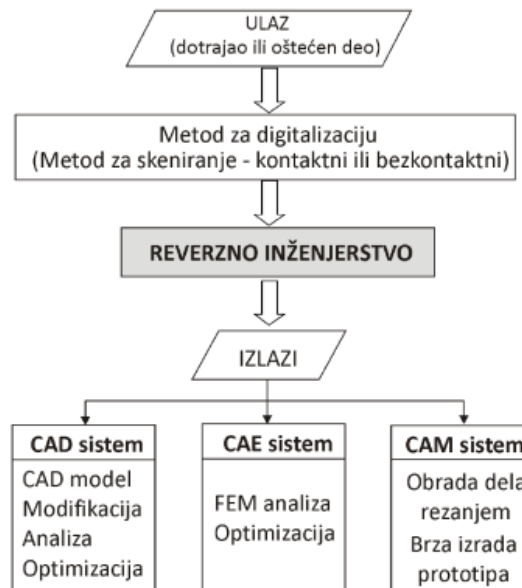
U fazi triangulacije se realizuje proces formiranja i preraspodele podataka oblaka tačaka na trouglove. Na taj način se stvaraju trouglaste mreže pomoću odgovarajućih algoritama. Ovakve trouglaste površine omogućavaju i definisanje tzv. STL fajla koji je neophodan u postupku brze izrade prototipova, pa i ovo može biti jedan od izlaza, koji je posebno zanimljiv, kada je potrebno brzo napraviti repliku skeniranog dela. Poslednja faza koja predstavlja segmentisanje u uglađivanje površina je najslabiji deo posla. Potrebno je kroz oblak tačaka provući glatke površine koje što bolje reprezentuju stvarne površine fizičkog modela u novo dobijenom CAD modelu. Na slici 2 je pokazan primer jedne interpretacije primene reverznog inženjerstva sa prikazom mogućih izlaza. Ulaz u postupak reverznog inženjerstva je obično dotrajan ili oštećen

deo, za koji se bira metod za njegovu digitalizaciju, kontaktni ili bezkontaktni. Potom se nastavlja sa fazama reverznog inženjerstva sa mogućim izlazima koji mogu biti prosledjeni CAD sistemu, CAM sistemu i CAE sistemu. U CAD sistemu se dobijeni model može dodatno modifikovati i doraditi, analizirati i izvršiti njegovu optimizaciju prema postavljenim kriterijumima. Korišćenjem CAE sistema može se vršiti FEM analiza i optimizacija koja uključuje proračune metodom konačnih elemenata. U CAM sistemu se na bazi CAD modela može generisati putanja za izradu rezanjem bilo dela ili kalupa za njega, a takođe se još može na bazi STL fajla primeniti neki od postupaka brze izrade prototipova.

BRZA IZRADA PROTOTIPOVA

Brza izrada prototipova mašinskih delova više nije novost, već realan resurs koji nudi procese i mašine za brzu izradu prototipova mašinskih delova dodavanjem i/ili oduzimanjem materijala. Brza izrada prototipova mašinskih delova (Rapid Prototyping) u današnjem vremenu vezuje se za početke firme 3D Systems iz SAD /10/. Opis brze izrade prototipova od njenih početaka opisan je u monografiji /11/.

Jedna od definicija brze izrade prototipova kaže da je to metod izrade trodimenzionih delova zadanog oblika pomoću njihovih modela, napravljenih obično u okruženju nekog CAD sistema, korišćenjem brzih, ponovljivih i fleksibilnih procesa obrade /4/. Ovaj metod se vrlo lepo uparuje sa reverznim inženjerstvom, koji treba da omogući dobijanje 3D CAD modela, koji će u stvari biti materijalizovan jednim od postupaka brze izrade prototipova.



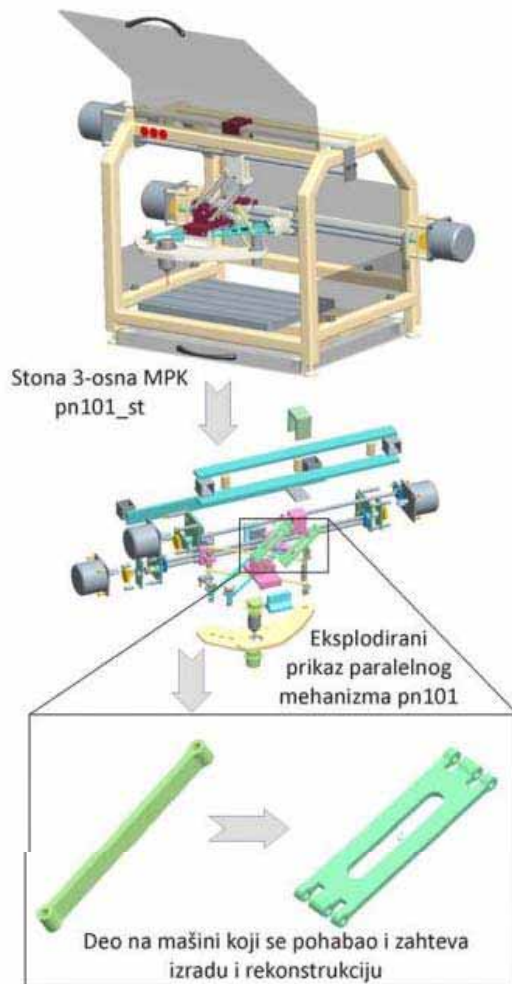
Slika 2. –Primene reverznog inženjerstva /1/

Prototipove u opštem slučaju možemo razvrstati u tri osnovne grupe, tzv. 3F (FFF): (1) Grupa Form, predstavlja uglavnom reljefe. Ova grupa prototipova služi da se donese zaključak o upotrebljivosti i/ili

pogodnosti oblika na mašinskom delu. (2) Grupa Fit, predstavlja uglavnom geometrije dela. Ova grupa prototipova se koristi za razne provere sklapanja, pa je tačnost dimenzija ovakvog prototipa važna, kako bi se nakon provere nastavio razvoj. (3) grupa Function predstavlja prototipove koji mogu biti i reljefi i geometrije. Ova grupa prototipova je potrebna da omogući proveru funkcije nekog mašinskog dela u meri u kojoj je to moguće na prototipu koji verovatno nije od istog materijala od koga treba da bude i sam mašinski deo. Ukoliko je moguće napraviti deo od istog ili približno istog materijala stepen provere će biti kvalitetniji.

U održavanju mašina i opreme postupak brze izrade prototipova je zanimljiv upravo u trećoj grupi Function prototipova, jer se na taj način mogu napraviti rezervni delovi ili reparirati oštećeni. Za ovakvu primenu je neophodno izabrati metod izrade koji omogućava izradu metalnih delova. Takav postupak je Direktno lasersko sinterovanje metala razvijen još 1994. godine i predstavlja prvi komercijalni metod za izradu prototipova od metala. Koristi metalni prah sa zrcima od oko 20 μm u prečniku. Metalni prah nema veziva, već se unosom velike toplote od laserskog zraka topi i sinteruje. Gustina tako dobijenog dela je 98% /12/.

JEDAN PRIMER PRIMENE ODRŽAVANJA MAŠINA PRIMENOM BRZE IZRADA PROTOTIPOVA I REVERZNOG INŽENJERSTVA



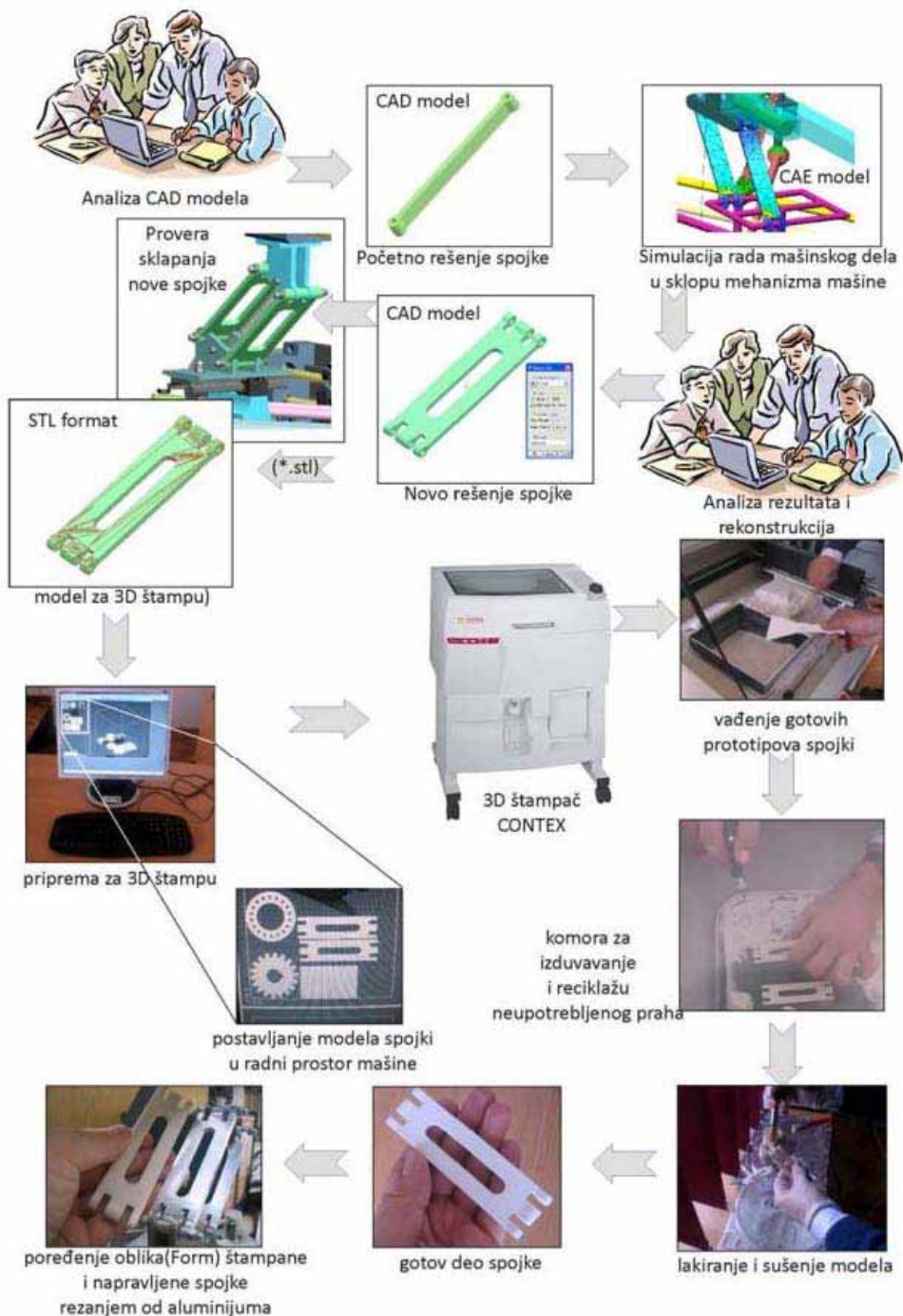
Slika 3. –Stona 3-osna mašina sa paralelnom kinematikom sa prikazom dela za izradu i rekonstrukciju

Jedan primer moguće primene reverznog inženjerstva i brze izrade prototipova za potrebe ilustracije primenljivosti ovih metoda u održavanju mašina biće pokazan na primeru jedne edukacione stone troosne mašine sa paralelnom kinematikom (MPK) pn101_st. Mašina je pokazana na slici 3, uključujući i eksplodirani prikaz primenjenog paralelnog mehanizma/13,14/. Jedna od specifičnosti ovog paralelnog mehanizma je i primena pasivnog translatorno obrtnog zgloba. Ovde je kao primer izabrana situacija da je deo spojke na pasivnom obrtnom zglobu pohaban i da zahteva reparaciju i/ili rekonstrukciju, posle adekvatne analize, jer je paralelni mehanizam tokom rada počeo da se koči.

U opštem slučaju ukoliko ne postoji geometrija posmatranog dela kao dokumentacija, moguće je metodima reverznog inženjerstva doći do CAD modela, što ovde nije bio slučaj. Ipak moguće je odrediti CAD model stvarnog izgleda dela, koji bi poređenjem sa nominalnim CAD modelom omogućio utvrđivanje pohabanosti mašinskog dela, ovde spojke. Na ovom primeru to ipak nije rađeno jer je deo jednostavne i poznate geometrije. Ipak sprovedena je procedura primene brze izrade prototipova raspoloživim metodom 3D štampe, radi ilustracije procedure, koja je pokazana na slici 4.

Po utvrđivanju otkaza u radu mašine, analizirana je simulacija rada mehanizma, uz primenu i analize metodom konačnih elemenata, čime je utvrđen potencijalni uzrok kočenja mehanizma, a to je pored pohabanosti i značajno opterećenje u korenu spojke na malom prepustu. Iz tog razloga je odlučeno da se uklone

oba nedostatka, rekonstrukcijom i izradom novih spojki, čiji je izgled pokazan na slici 4. Ove spojke su pripremljene kao CAD modeli, izvršena je analiza sklapanja i export u STL fajl za potrebe brze izrade ovih spojki. Pošto je ovde dat samo prikaz liustracije primene metoda korišćen je raspoloživ metod 3D štampe, koji ne daje dovoljno krute prototipove, koji su ovde mogli biti iskorišćeni samo kao Form prototipovi, odnosno da se iskoriste za proveru oblika. Kao pravo rešenje izbor bi pao na metod direktnog laserskog sinterovanja metala pri čemu bi tako izrađeni delovi mogli biti i direktno ugrađeni na mašinu.



Slika 4. –Ilustracija moguće primene brze izrade prototipova

ZAKLJUČNE NAPOMENE

U radu je pokazan značaj i uloga u primeni i kombinaciji savremenih metoda kao što su reverzno inženjerstvo i brza izrada prototipova u održavanju mašina i opreme. Nagli razvoj je doveo do toga da je sve manje vremena potrebno za razvoj proizvoda, životni vek proizvoda se skraćuje, ali zato u svom životnom veku mašina ili oprema mora da radi bez zastoja i otkaza. Ako do otkaza dodje, potrebno je brzo rešavati probleme. Jedan od načina za brzo dobijanje gotovih delova prema uzorku, je upravo uz primenu reverznog inženjerstva da bi se dobio CAD model oštećenog dela, a onda i primena metoda brze izrade prototipova da bi se deo i fizički što brže napravio. U radu je pokazana jedna ilustracija otkaza u radu jedne mašine, u kojoj je problem rešen primenom brze izrade prototipova. Može se zaključiti da primena reverznog inženjerstva i brze izrade prototipova svakako imaju budućnost u održavanju mašina i opreme i rešavanju problema koji mogu da nastanu tokom njihovog rada.

LITERATURA

- 1) Rathore, N., Jain, P. K. (2014) Reverse engineering applications in manufacturing industries: An overview, Chapter 45 in DAAAM International Scientific Book 2014, pp.567-576, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International
- 2) Kumar, A., Jain, P. K., Pathak, P. M. (2014) Reverse engineering approach for measurement and inspection of machine element. *International Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 15, issue 1, pp 95-101.
- 3) Wu, H., Gao, J., Li, S., Zhang, Y., Zheng, D. (2013) A review of geometric reconstruction algorithm and repairing methodologies for gas turbine components. *International Journal of Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, Vol.11, pp 1609-1618.
- 4) Glavonjic, M., Obradni sistemi za agilne tehnologije, http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma_bsc/indexnma.htm, 2013.
- 5) Živanović S. (2012) Razvoj edukacione mašine sa paralelnom kinematikom, Monografija iz edicije Posebna izdanja Zadužbine Andrejević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Apollo Graphic Production, Beograd.
- 6) Yau, H.T. (1997) Reverse engineering of engine intake ports by digitization and surface approximation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 6, pp 855-871
- 7) Abella, R. J., Daschbach, J. M., McNichols, R. J. (1994) Reverse engineering industrial applications. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 26, Issue 2, pp 381-385
- 8) Chang, M., Park, S. C. (2008) Reverse engineering of a symmetric object. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 55, pp 311-320
- 9) Bagci, E. (2009) Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, pp 407-418
- 10) <http://www.3dsystems.com/>, 2015.
- 11) Norrani, R., (2005) Rapid Prototyping, Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc.
- 12) <http://2016engineeringspecialtopic.weebly.com/direct-metal-laser-sintering-dmls.html>, 2015.
- 13) Živanović S. (2010) Konfigurisanje novih mašina alatki, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, doktorska disertacija.
- 14) Glavonjic, M., Milutinovic, D., Zivanovic, S., Dimic, Z., Kvirgic, V. (2010) Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.46, pp 51-60