

BRZA IZRADA PROTOTIPOVA SA TEHNOLOGIJOM VAKUUMSKOG LIVENJA

RAPID PROTOTYPING WITH VACUUM CASTING TECHNOLOGY

Dr Nenad Grujović¹, Dr Nikola Milivojević¹, Vladimir Milivojević¹,
Vladimir Dimitrijević¹, Jelena Borota¹, Mr Fatima Živić¹, Đorđe Grujović²
¹ *Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, Srbija, mfgk@kg.ac.yu*
² *IBM United Kingdom Limited, London, Velika Britanija*

Sadržaj – Ovaj rad je nastao kao rezultat primene tehnologije vakuumske livenje za brzu izradu prototipova u Centru za informacione tehnologije na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Kako je ovo relativno nova tehnologija i jedinstvena oprema u regionu, u radu su date osnove tehnologije, kao i iskustva stečena u procesu izrade.

Abstract – This paper is a result of use of vacuum casting technology with rapid prototyping in Centre for information technologies at the Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac. Since this is rather new technology, and unique piece of equipment in region, this paper presents its basics, together with experiences gained in actual prototyping.

1. UVOD

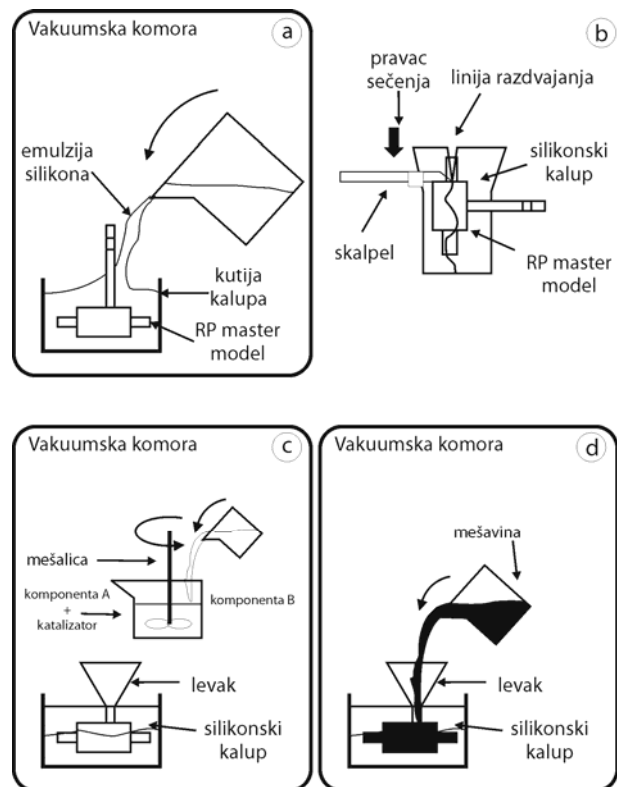
Tehnologije za brzu izradu prototipova (engl. Rapid Prototyping – RP) su danas prisutne u širokom spektru industrijskih oblasti zbog brojnih prednosti koje nude. Iako je RP relativno nova pojava u industriji, ove savremene tehnologije su za kratko vreme omogućile dostizanje niza ciljeva koje moderno tržište definiše, kao što su primarni zahtevi skraćenja vremena do pojave proizvoda na tržištu i smanjenje cene proizvoda. Viši stepen vizualizacije u ranim fazama projektovanja, otkrivanje grešaka projektovanja pre izrade alata i brza izrada alata za proizvodnju fizičkih prototipova postižu se primenom RP tehnologija. Razvoj velikog broja RP tehnologija i postupaka doveo je i do toga da se danas njihovom pojedinačnom i kombinovanom upotrebom mogu ostvariti i brza izrada alata (engl. Rapid Tooling – RT) i brza proizvodnja (engl. Rapid Manufacturing – RM).

RT obuhvata niz RP tehnika koje se koriste za brzu izradu složenih alata, kalupa i oblika koji se zatim koriste za izradu gotovih delova. Tehnike koje su prisutne u praksi su vakuumsko livenje[1], livenje gipsanih kalupa[2], livenje kalupa od smole[3], centrifugalno livenje[4], precizni liv i druge. One se najčešće primjenjuju kada se radi o malim serijama proizvoda i kada bi izrada alata uobičajenim postupcima bila jako skupa. Rezultat je kombinovanja RP tehnika sa konvencionalnim alatima da bi se od CAD podataka u praksi proizveo kalup za manje vremena i sa manje troškova u odnosu na tradicionalne metode.

2. TEHNOLOGIJA VAKUUMSKOG LIVENJA

Za proizvodnju funkcionalnih delova od plastike, metala i keramike, vakuumsko livenje u kalupu od silikonske gume predstavlja najfleksibilniji i najčešće korišćen RT postupak[5]. Prosto rečeno, to je livenje u vakuumskoj komori koje koristi podpritisak u komori da potpuno popuni kalup mešavinom. Time se znatno umanjuje mogućnost pojave mehurova unutar dela, a dobijaju se delovi vrlo slični po karakteristikama onima koji se izrađuju livenjem pod pritiskom[6]. Ovaj postupak odlikuju sledeće prednosti:

- **Ekstremno visoka rezolucija.** I najsitniji detalji master modela se mogu preneti na silikonski kalup, pa čak i otisci prstiju!
- **Značajno olakšano vađenje delova iz kalupa.** Geometrijski detalji koji bi onemogućili vađenje iz tvrdog kalupa, lako se mogu izvaditi iz savitljivog kalupa od silikonske gume.



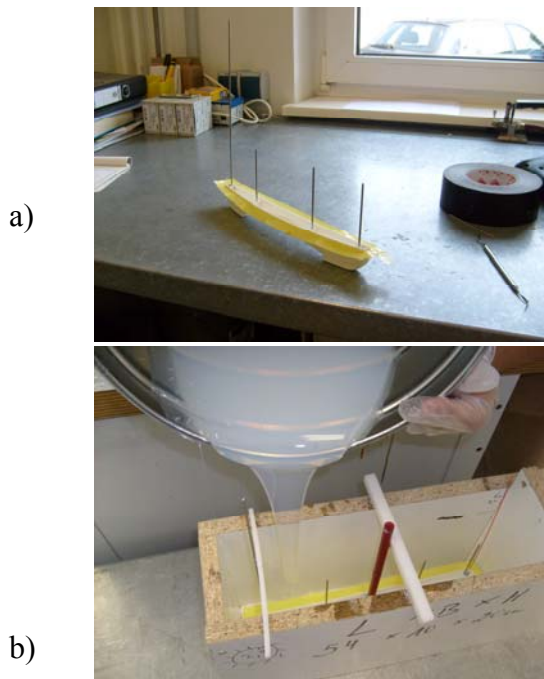
Slika 1. Izrada silikonskog kalupa i livenje prototipa

Slika 1. prikazuje princip tehnologije vakuumnog livenja koju čine sledeće operacije: (a) nalivanje silikonske gume, (b) razdvajanje kalupa, (c) mešanje polimera, i (d) ulivanje polimera u kalup. Master model, koji je zakačen za ulivni sistem, se spušta u kontejner. Emulzija silikonske gume se sipa u kontejner preko master modela. Zatim se silikonska guma suši u pećnici na temperaturi od 70°C u trajanju od tri sata, dok se ne stvrdne. Onda se na tako dobijenom stvrdnutom silikonskom kalupu skalpelom formira linija razdvajanja. Master model se zatim izvadi iz kalupa, a na njegovom mestu ostaje šupljina. Polovine kalupa se onda sastave, i uliva se materijal. To može biti poliuretana, a ulivanje se vrši u vakuumu da bi se izbegle nepravilnosti usled zarobljenog vazduha. Dodatno pečenje na temperaturi od 70°C u trajanju od četiri sata je potrebno da bi se očvrstnuo deo od polimera. Ovi kalupi se najčešće koriste za vakuumno livenje. U kalupu od silikonske gume može da se izradi do 20 poliuretanskih delova, pre nego što dođe do pucanja.

3. POSTUPAK IZRADE DELOVA TEHNOLOGIJOM VAKUUMSKOG LIVENJA

U praksi, postupak izrade delova vakumskim livenjem se može podeliti u više faza: izrada kalupa, izrada modela i postprocesiranje.

Izrada kalupa. Za vakumsko livenje neophodan je master model prema kojem se izrađuje kalup. Od kvaliteta master modela direktno zavisi i kvalitet odlivaka. Za master modele mogu se koristiti delovi izrađeni većinom RP postupaka, mada najbolje karakteristike poseduju delovi izrađeni SLA postupkom. Treba voditi računa pri izboru postupka izrade master modela, jer je preciznost vakumnog livenja izuzetna – moguće je da se otisci prstiju preslikaju na odlivak!



Slika 2. Izrada kalupa: a) priprema master modela i dodavanje ulivnog sistema, b) nalivanje silikonske gume

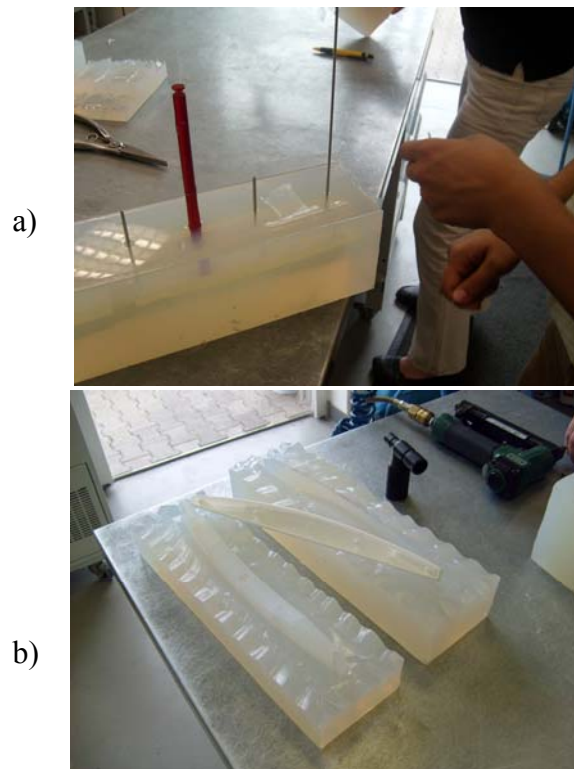
Način podele kalupa je predmet analize pre nego što se pristupi njegovoj izradi. Iako su kalupi od silikonske gume izuzetno fleksibilni, ipak treba voditi računa o tome da deo na kraju treba izvaditi bez uništenja kalupa. Takođe, pre izrade kalupa treba zatvoriti sve otvore na master modelu koji mogu onemogućiti vadenje mastera iz kalupa.

Nasuprot uobičajenom načinu izrade kalupa, a više nalik samom livenju, ulivni sistem i odušci se dodaju na master model pre nalivanja kalupa. Dobra strana ovakvog načina izrade je što se ulivni sistem može dizajnirati i izraditi na RP mašini zajedno sa master modelom. Moguće je i formirati kalup za izradu više odlivaka odjednom.

Kada je master model dopunjen ulivnim sistemom i osloncima, ceo sklop se spušta u livačku kutiju i fiksira. Kutija treba da bude nepropusna za silikon i da dobro podnosi temperature do 80°C.

Silikon za kalup je relativno lako dostupan, mada se mogu koristiti i drugi specijalni materijali. Priprema silikona podrazumeva da se i iz njega uklone mehuri gasa, što se postiže držanjem silikona u vakumskoj komori oko 15 minuta.

Nalivanje kalupa se vrši pažljivo da ne bi došlo do krupnih grešaka koje će se kasnije odslikati na odlivku. Nakon nalivanja, kalup se ubacuje u vakumsku komoru na 15-20 minuta zbog uklanjanja eventualnih mehura gasa.



Slika 3. Izrada kalupa: a) razdvajanje i obrada dobijenog kalupa, b) gotov kalup sa izvađenim master modelom

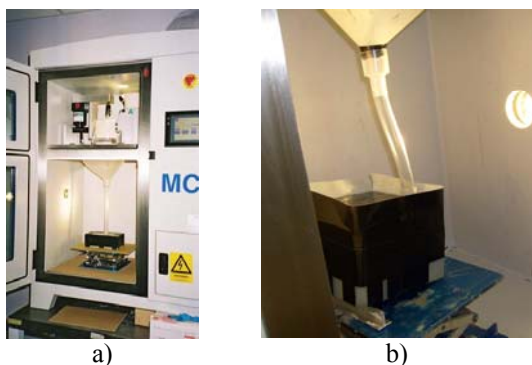
Iako silikon može da očvrstne i na sobnoj temperaturi, preporučuje se sušenje na 40°C u trajanju od 4 do 8

časova, jer tada neće doći do širenja master modela.

Pre rasecanja kalupa moraju se ukloniti kutija i delovi ulivnog sistema. Ukoliko je u prethodnim koracima označena linija razdvajanja, kalup je potrebno raseći duž oznake upotrebom skalpela ili dodatnog alata. Ne mora se strogo voditi računa o pravilnom sečenju po liniji razdvajanja, jer neravna površina razdvajanja omogućava lakše sastavljanje kalupa.

Liveenje. Postupak samog liveenja se sastoji iz tri koraka: zagrevanja kalupa, pripreme materijala i liveenja.

Pre liveenja, kalup se mora zagrejati na $65\div 70^{\circ}\text{C}$ i spojiti. Jednostavni kalupi sastoje se iz dva dela, a složeniji mogu imati i više delova. Pri spajanju kalupa treba voditi računa o zaptivosti spoja, pa se često koristi i lepljiva traka da onemogući curenje materijala.



Slika 4. Izrada odlivka: a) postavljanje kalupa u mašinu, b) liveenje

Uporedo sa zagrevanjem kalupa može se pripremiti i materijal. On se uglavnom dobija mešanjem dve komponente (A i B), gde je jedna komponenta osnovni materijal, a druga predstavlja katalizator. Obe komponente se zasebno zagrevaju na $65\div 75^{\circ}\text{C}$ u trajanju od 2 časa u vakuumu (zbog uklanjanja mehura). Potrebno je izračunati količinu komponenti potrebnu za izradu dela, što se dobija množenjem mase dela i specifične gustine mešavine uz uračunavanje gubitaka u ulivnom sistemu.

Nakon pripreme, komponente se sipaju u spremišta mašine koja automatski formira mešavinu. Na kraju, mašina uliva materijal u ulivni sistem, a vakuum omogućava da se kalup u potpunosti popuni.

Postprocesiranje. Kada je deo izliven, potrebno je ukloniti ulivni sistem i staviti kalup u pećnicu na 68°C . Ovo omogućava da materijal potpuno očvrstne, pre nego što se deo izvadi iz kalupa. Pri vađenju dela iz kalupa mora se voditi računa o delu, kao i o kalupu, da ne bi došlo do oštećenja. Zatim je potrebno ukloniti višak materijala sa dela. Ukoliko se na delu javile deformacije (posebno izraženo kod tankozidnih modela), zagrevanjem dela u pećnici u trajanju od 10 minuta može se dobiti korektna geometrija.

Raznovrsnost materijala koji se mogu koristiti za vakuumsko liveenje omogućava široku oblast primene. U osnovi, radi se o poliuretanskoj (PU) plastici koja karakteristikama odslikava druge tipove plastike. Tako se mogu koristiti PU materijali sa osobinama ABS-a, polipropilena, polikarbonata, pa čak i sa fleksibilnim karakteristikama nalik na gumu. Takođe, na raspolaganju su i providni materijali, a sirovom materijalu se boja može dodavati po potrebi.

Pošto je vakuumsko liveenje u osnovi slično ostalim postupcima liveenja, mogu se koristiti postojeće tehnologije za ubacivanje delova od drugih materijala u odlivak, za kreiranje teksture i površinsku obradu.

4. PRAKTIČNA PRIMENA VAKUUMSKOG LIVEENJA PLASTIKE

Sisteme za vakuumsko liveenje proizvodi kompanija MCP Vacuum Casting Machines (od septembra 2008. posluje kao MTT Technologies Group). U njihovoj aktuelnoj ponudi se nalazi više različitih sistema za vakuumsko liveenje, čije su karakteristike prikazane u Tabeli 1.

	MCP 5/01 ULC	MCP 5/01 (PLC)	MCP 4/04 ULC (PLC)	MCP 5/04 (PLC)	MCP 5/05 (PLC)	MCP 5/06 (PLC)
Dimenzije kućišta	1.175 x 900 x 750 mm	1.175 x 900 x 594 mm	1.910 x 1.510 x 900 mm	2.320 x 2.800 x 1.350 mm	2.320 x 2.800 x 1.350 mm	2.300 x 3.000 x 1.250 mm
Maksimalne dimenzije kalupa	530 x 450 x 425	530 x 450 x 425	750 x 900 x 750 mm	1.050 x 2.050 x 1.000 mm	1.050 x 2.050 x 1.000 mm 640 x 600 x 1.000 mm	650 x 900 x 1.000 mm – leva 650 x 900 x 1.000 mm - desna
Zapremina odlivka	0.8 dm ³ / max. 850 g	0.8 dm ³ / 850 g	6,5 kg	2.2 dm ³ / 2,5kg 5,5 dm ³ / 6,0 kg	2.2 dm ³ / 2,5kg 5,5 dm ³ / 6,0 kg	2x2.2 dm ³ / 5,0 kg 2x5,5 dm ³ / 12,0 kg
Najveća vrednost vakuuma	0,5 mbar	0,5 mbar		0,5 mbar	0,5 mbar	0,5 mbar

Tabela 1. Komercijalni sistemi za vakuumsko liveenje plastike kompanije MCP



Slika 5. MCP 5/01 sistem u prostorijama Centra za informacione tehnologije Mašinskog fakulteta u Kragujevcu

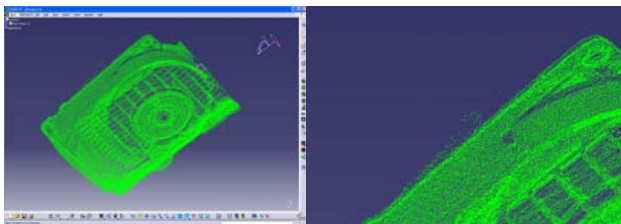
U Centru za informacione tehnologije Mašinskog fakulteta u Kragujevcu za vakuumsko livenje plastike upotrebljava se uređaj MCP 5/01 (PLC), prikazan na Slici 5., koji je nabavljen u okviru realizacije FP6 projekta.

Za izradu kalupa koriste se uglavnom master modeli dobijeni tehnikom 3D štampe. U tu svrhu koristi se uređaj ZPrinter 310 System. O osnovama tehnologije 3D štampe kao i o iskustvima u izradi prototipova ovom tehnologijom već je prikazano u radovima [7] i [8].

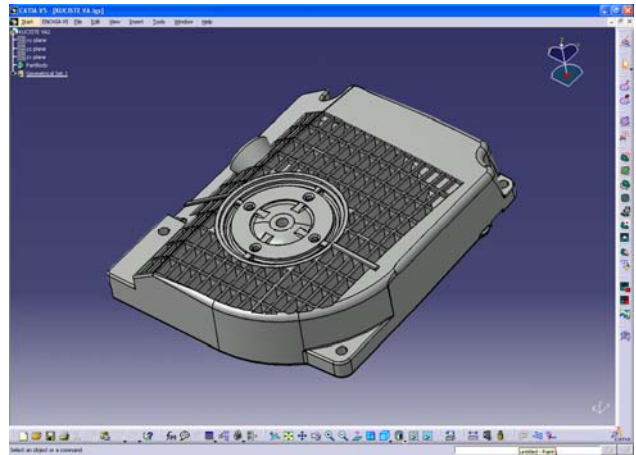


Slika 6. ZCorporation ZPrinter 310 System u prostorijama Centra za informacione tehnologije Mašinskog fakulteta u Kragujevcu

Da bi se master model mogao izraditi na 3D štampaču, potrebno je generisati STL fajl na osnovu CAD modela. U praksi se često se kao polazna osnova za izradu CAD modela koristi oblak tačaka dobijen digitalizacijom originalnog dela na laserskom 3D skeneru, Slika 7, [9].



Slika 7. Oblak tačaka dobijen digitalizacijom originalnog dela na laserskom skeneru



Slika 8. CAD model dobijen postupkom reverznog inženjeringa

Na osnovu dobijenog CAD modela, Slika 8., formira se odgovarajući STL fajl. Rezultujući STL fajl se učitava u namensku aplikaciju ZPrint Software koja upravlja izradom na 3D štampaču. Na slici 9. je prikazan izgled gotovog modela štampanog na 3D štampaču.



Slika 9. Fizički model dobijen postupkom 3D štampe

Opisani postupci nalaze svoje mesto primene i u medicini. RP medicinski modeli su našli primenu u planiranju kompleksnih hirurških intervencija, simulaciji, projektovanju i izradi implanata, medicinskih uređaja, hirurških pomoćnih alata, kao i u inženjeringu tkiva. U radu [10] je detaljno prikazana procedura pri proizvodnji medicinskih modela korišćenjem RP tehnologija, primena RP tehnologija u različitim granama medicine kao i budući trendovi i potrebe razvoja istih. U Centru za informacione tehnologije na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu u okviru projekta TR 12012 napravljen je kalup za model butne kosti (femur) i izlivena je serija modela koja će biti iskorišćena u naučno-nastavne svrhe na medicinskim ustanovama.

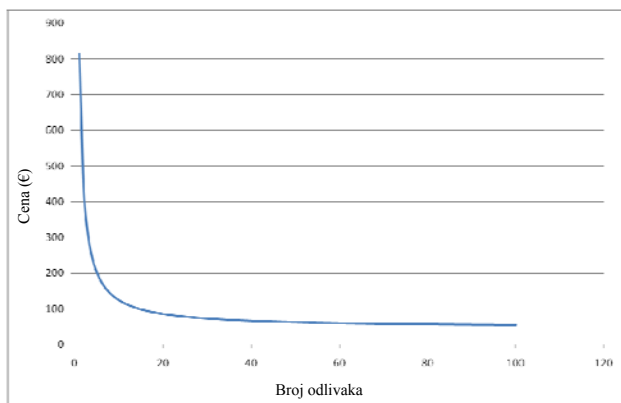
U praksi se pokazalo da je za pripremu kalupa potreban u proseku 1 radni dan, i da je sa tako dobijenim kalupom moguće izrađivati 4-5 delova dnevno, u zavisnosti od kompleksnosti i veličine samog modela. Treba imati u vidu da se pomoću jednog silikonskog kalupa napravljenog vakuumskim livenjem u nekim slučajevima može proizvesti približno 100 odlivaka.

Brza (ili direktna) proizvodnja predstavlja korak više od RP procesa: to je izrada gotovih proizvoda u velikim serijama na bazi RP postupaka i srodnih tehnologija. Izrađeni predmeti imaju sve karakteristike gotovog proizvoda, a cena izrade nije mnogostruko veća, što je naročito izraženo kod RP tehnologija. Jedna od primena tehnologije vakuumnog livenja je upravo brza proizvodnja plastičnih delova.

Za manje serije moguća je isplativa proizvodnja upotrebom RP mastera i vakuumnog livenja. Urađena analiza troškova serijske izrade modela butne kosti (femur), slika 10., pokazala je zavisnost troškova od broja odlivaka korišćenjem tehnologije vakuumnog livenja, Slika 11.



Slika 10. Model butne kosti (femur)



Slika 11. Zavisnost troškova izrade modela od broja komada u seriji

Iskustva stečena u upotrebi tehnologije vakuumnog livenja plastike u Centru za informacione tehnologije Mašinskog fakulteta u Kragujevcu ukazuju na mogućnost i isplativost primene ove tehnologije u našim uslovima. Dalji pravci rada i ispitivanja u ovoj oblasti u Centru delom su vezani i za aktivnosti projekta TR12012 (*Primena računarski podržanih tehnologija u hiruriji koštano zglobnog sistema*) koji finansira Ministarstvo nauke Republike Srbije.

6. ZAKLJUČAK

Tehnologije za brzu izradu prototipova su prisutne u širokom spektru industrijskih oblasti zbog brojnih prednosti koje nude. Ove savremene tehnologije su za kratko vreme omogućile dostizanje niza ciljeva koje moderno tržište definiše, kao što su primarni zahtevi

skraćanja vremena do pojave proizvoda na tržištu i smanjenje cene proizvoda. Viši stepen vizualizacije u ranim fazama projektovanja, otkrivanje grešaka projektovanja pre izrade alata i brza izrada alata za proizvodnju fizičkih prototipova postižu se primenom RP tehnologija. Ovi se postupci najčešće primenjuju kada se radi o malim serijama proizvoda i kada bi izrada alata uobičajenim postupcima bila skupa.

Raznovrsnost materijala koji se mogu koristiti za vakuurno livenje omogućava široku oblast primene. Mogu se koristiti postojeće tehnologije za ubacivanje delova od drugih materijala u odlivak, za kreiranje teksture i površinsku obradu. Primena RP i RT tehnika nije više ograničena samo na izradu prototipova, kao na početku razvoja ovih tehnologija. Materijali i tehnologije se razvijaju na takav način da omogućavaju i razvoj malih serija gotovih proizvoda. Proizvodnja malih serija predstavlja idealno rešenje za veći broj specifičnih potreba kod proizvoda namenjenih ograničenom manjem broju korisnika, pri čemu se omogućava dostizanje visokog kvaliteta i iterativno unapređenje proizvoda iako nije namenjen velikim serijama.

Uloga vakuumnog livenja kao procesa u okviru RP tehnologija je veoma značajna jer dozvoljava postizanje visoke preciznosti, kontrolu procesa livenja, čime omogućava kontrolisane karakteristike proizvoda, kao i primenu širokog spektra različitih materijala s aspekta ekonomičnosti njihove primene. Sistem za vakuurno livenje u Centru za informacione tehnologije Mašinskog fakulteta u Kragujevcu omogućava proučavanje optimalnih uslova rada, karakteristika samog procesa, kao i načine postizanja zahtevanih dimenzija, površinskih karakteristika materijala odlivka, kao i ostalih željenih karakteristika odlivka. Time se omogućava postizanje konstantnih rezultata visokog kvaliteta, uz kraće vreme rada, manji nivo greške i značajne uštede.

LITERATURA

- [1] Tromans G. P., *Producing Models and Tooling for the Rover Group*, Manufacturing Technology Update, IEE, 1993.
- [2] Muller T., *Recent developments in the use of the rapid prototyping to prototype die cast parts*, Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, s. 253-258, 12- 15 Juni 1994
- [3] Ruud A. N., *Rapid tooling for resin transfer moulding*, Proceedings of Sixth International Conference on Rapid Prototyping, s. 205-215, 4-7 Juni 1995.
- [4] Schaer L., *Spin-casting fully functional metal and plastic parts from stereolithography models*, Proceedings of Sixth International Conference on Rapid Prototyping, s. 217-236, 4-7 Juni 1995.
- [5] Venuvinod K. P., Ma W., *Rapid prototyping – Laser-based and other Technologies*, Kluwer Academic Publishers, 2004, s. 312
- [6] Trajanović M., Grujović N., Milovanović J., Milivojević V.: *Računarski podržane brze proizvodne*

tehnologije, monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2008

- [7] Grujović N., Milivojević N., Milivojević V., Dimitrijević V., Grujović Đ., „Iskustva u brznoj izradi prototipova tehnologijom 3D štampe“, 31. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije i Crne Gore sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, str. 437-442, Kragujevac, 2006
- [8] Grujović N., Milivojević N., Milivojević V., Dimitrijević V., Grujović Đ., „Brza izrada prototipova tehnologijom 3D štampe“, V Skup privrednika i naučnika, SPIN 2007, Zbornik radova, str. 38-42, Beograd, 2007
- [9] Grujović N., Milivojević N., Milivojević V., Dimitrijević V., Borota J., Grujović Đ., „Primena 3D štampe u procesu reverznog inženjeringa“, YUINFO 2008, Zbornik radova na CD-u, Kopaonik, 2008
- [10] Milovanović J., Trajanović M., *Medical applications of Rapid Prototyping*, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering Vol. 1, Nov 10, 2007, s. 1 - 2