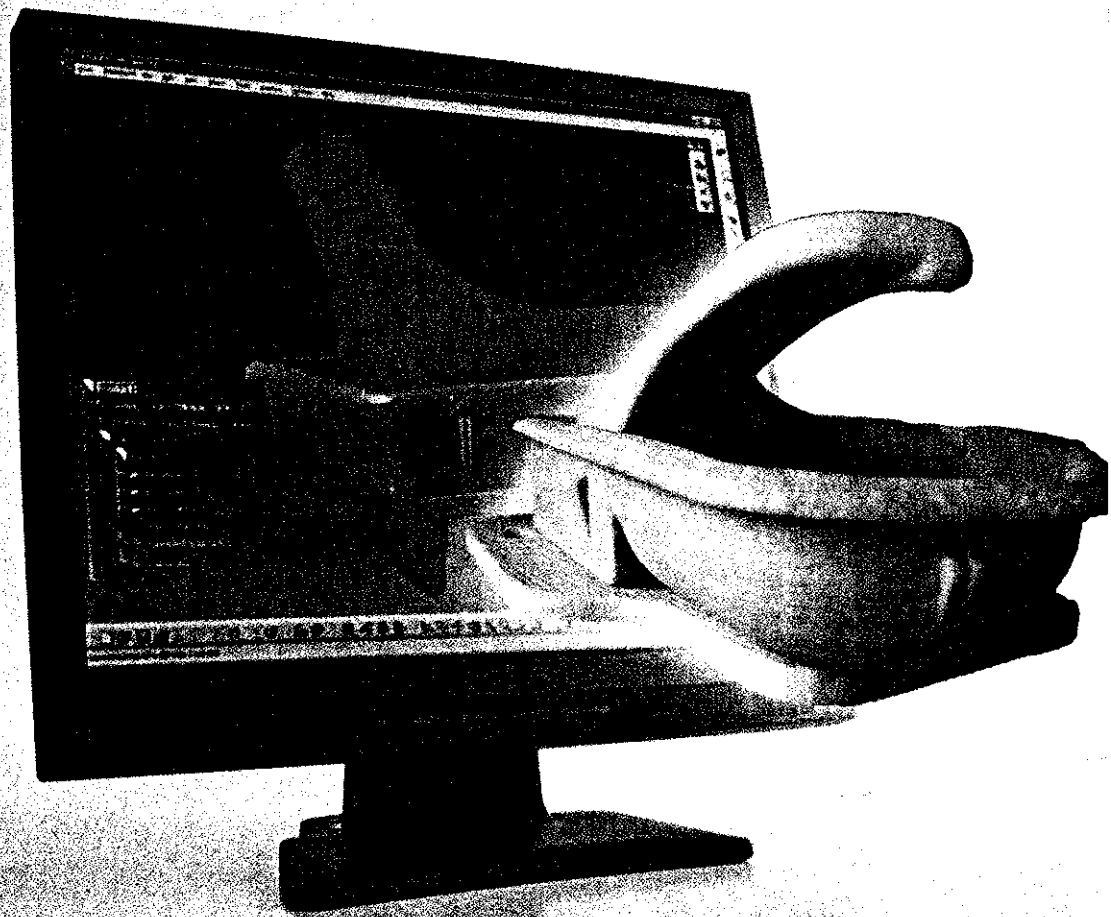


Dr Miroslav Trajanović
Dr Nenad Grujović
Mr Jelena Milovanović
Vladimir Milivojević

RAČUNARSKI PODRŽANE BRZE PROIZVODNE TEHNOLOGIJE



Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2008.

Dr Miroslav Trajanović
Dr Nenad Grujović
Mr Jelena Milovanović
Vladimir Milivojević

**RAČUNARSKI PODRŽANE BRZE
PROIZVODNE TEHNOLOGIJE**

2008



Dr Miroslav Trajanović
Dr Nenad Grujović
Mr Jelena Milovanović
Vladimir Milivojević

RAČUNARSKI PODRŽANE BRZE PROIZVODNE TEHNOLOGIJE

Recenzenti:

Dr Dragan Domazet
Dr Milentije Stefanović
Dr Milan Šljivić

Izdavač:

Mašinski fakultet u Kragujevcu, Centar za informacione tehnologije
Sestre Janjić 6
34000 Kragujevac
Tel./Fax: 034/304-710
<http://cit.kg.ac.yu/>

Za izdavača:

Dr Miroslav Babić, redovni profesor

Odlukom Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Kragujevcu br.01-1867/2 od 30.08.2007. god. odobreno da se štampa kao monografija.

Registar:

ISBN 978-86-86663-24-5

Korice:

Vladimir Milivojević

Tiraž:

300 primeraka

Štampa:

Grafički atelje "Skver", Kragujevac

Godina izdanja:

2008.

Izdanje:

Prvo

Sva prava zadržana. Ni jedan deo ove knjige ne može biti reprodukovano, snimljen, ili emitovan na bilo koji način: elektronski, mehanički, fotokopiranjem, ili drugim vidom, bez pisane dozvole autora.

Sadržaj

1	Uvod u brze proizvodne tehnologije	1
1.1	Osnovno o prototipovima	2
1.1.1	Definicija prototipa	2
1.1.2	Tipovi prototipova	2
1.1.3	Namene prototipova	3
1.2	Osnove RP tehnologija	4
1.2.1	Ulazni podaci	5
1.2.2	Metod	5
1.2.3	Materijal izrade	5
1.2.4	Primena	5
1.2.5	Koristi od upotrebe RP tehnologija	6
1.2.6	Direktne koristi	6
1.2.7	Indirektne koristi	8
1.3	Rasprostranjenost RP tehnologija	8
2	Brze proizvodne tehnologije	11
2.1	Podela procesa obrade	11
2.2	Struktura lanca RP procesa	12
2.2.1	3D modeliranje	13
2.2.2	Konverzija i prenos podataka	13
2.2.3	Provera i priprema	14
2.2.4	Izrada	20
2.2.5	Postprocesiranje	20
2.3	Problemi sa STL formatom i moguće alternative	21
2.3.1	Transformacija 3D modela u seriju poprečnih preseka	22
2.3.2	Prednosti i nedostaci STL fajl formata	23
2.3.2.1	Problemi sa STL fajlovima	23
2.3.2.2	Popravka STL fajlova	25
2.3.3	Alternative STL formatu	27
2.3.3.1	CLI fajl format	28
2.3.3.2	VRML fajl format	28
2.3.3.3	Dalji razvoj	29
2.4	Drugi izvori 3D modela za RP postupke	29
2.4.1	CT i MRI podaci	29
2.4.2	Sistemi za lasersko skeniranje	30
2.4.2.1	CMM sistemi	31
2.4.3	Veza RP tehnologija i reverznog inženjeringa	31

3	Metode RP	33
3.1	Podela brzih proizvodnih tehnologija	33
3.1.1	RP metode na bazi tečnosti	38
3.1.1.1	Fotopolimerizacija	38
3.1.1.2	Zamrzavanje	40
3.1.2	RP metode na bazi čvrstih materijala	40
3.1.2.1	Ekstrudiranje istopljenih materijala	40
3.1.3	RP metode na bazi praha	40
3.1.3.1	Topljenje praha	40
3.1.3.2	Vezivanje praha adhezivima	41
3.1.4	RP metode na bazi listova – Laminacija	41
3.2	Vodeće RP tehnologije	41
3.2.1	Stereolitografija	41
3.2.1.1	Princip rada	41
3.2.1.2	Postupak izrade	42
3.2.1.3	Materijali	47
3.2.1.4	Prednosti i nedostaci	47
3.2.1.5	Primena	48
3.2.1.6	Komercijalna rešenja	51
3.2.1.7	Istraživanje i razvoj	54
3.2.2	Selektivno lasersko sinterovanje	54
3.2.2.1	Princip rada	55
3.2.2.2	Postupak izrade	55
3.2.2.3	Materijali	56
3.2.2.4	Prednosti i nedostaci	58
3.2.2.5	Primene	58
3.2.2.6	Komercijalna rešenja	60
3.2.2.7	Istraživanje i razvoj	68
3.2.3	3D štampanje	68
3.2.3.1	Princip rada	68
3.2.3.2	Postupak izrade	69
3.2.3.3	Materijali	70
3.2.3.4	Prednosti i nedostaci	70
3.2.3.5	Primene	71
3.2.3.6	Komercijalna rešenja	73
3.2.3.7	Istraživanje i razvoj	75
3.2.4	Modeliranje deponovanjem istopljenog materijala (FDM)	76
3.2.4.1	Princip rada	76
3.2.4.2	Postupak izrade	76
3.2.4.3	Materijali	78
3.2.4.4	Prednosti i nedostaci	78
3.2.4.5	Primene	79
3.2.4.6	Komercijalna rešenja	80
3.2.4.7	Istraživanje i razvoj	83
3.2.5	Izrada objekata laminacijom	83
3.2.5.1	Princip rada	83
3.2.5.2	Postupak izrade	84
3.2.5.3	Prednosti i nedostaci	85
3.2.5.4	Primena	86
3.2.5.5	Komercijalna rešenja	88

4	Izbor RP tehnologija	91
4.1	Evaluacija prototipova i benčmarking	91
4.1.1	Razlozi za benčmarking	91
4.1.2	Metodologije benčmarkinga	91
4.1.2.1	Izbor tipa benčmark modela	91
4.1.2.2	Izbor merenja	92
4.1.2.3	Zapisivanje vremena izrade i rezultata merenja, izrada tabličnih i grafičkih prikaza	93
4.1.2.4	Analiza i poređenje rezultata	93
4.2	Preporuke za izbor RP tehnologija	93
5	Primena RP tehnologija	97
5.1	Prednosti i oblast primene RP tehnologija	97
5.2	Brza izrada prototipa	98
5.2.1	Primer izrade prototipa	99
5.3	Brza proizvodnja	102
5.3.1	Primer: Vacuum Casting	102
5.4	Brza izrada alata	105
5.4.1	Direktni meki RT postupci	111
5.4.1.1	Izrada pešćanih kalupa SLS postupkom	111
5.4.1.2	Direct AIM	111
5.4.2	Indirektni meki RT postupci	111
5.4.2.1	Izrada metalnih alata raspršivanjem	111
5.4.2.2	Kalupi od silikonske gume	111
5.4.2.3	Livenje u pesku	113
5.4.2.4	Precizno livenje	113
5.4.2.5	Livenje sa isparljivim modelom	115
5.4.3	Direktni tvrdi RT postupci	115
5.4.3.1	RapidTool™	116
5.4.3.2	Izrada alata od metalnih laminata	116
5.4.3.3	Prometal™	116
5.4.4	Indirektni tvrdi RT postupci	117
5.4.4.1	3D Keltool	117
5.4.4.2	EDM elektrode	117
5.4.4.3	Kopiranje glodalicom	118
5.5	Brza izrada replike	118
6	Studija slučaja	119
6.1	Korišćene RP tehnologije	119
6.2	Izrada objekata laminacijom (LOM)	121
6.2.1	Izrada segmenta alata za vulkanizaciju pneumatika metodom laminacije	121
6.2.2	Analiza LOM prototipa	124
6.3	3D štampanje (3DP)	130
6.3.1	Izrada segmenta alata za vulkanizaciju pneumatika metodom 3D štampanja	130
6.3.2	Analiza 3DP prototipa segmenta alata	132
6.4	Selektivno lasersko sinterovanje (SLS)	139

6.4.1	Izrada segmenta alata za vulkanizaciju pneumatika metodom selektivnog laserskog sinterovanja.....	139
6.4.2	Analiza SLS segmenta.....	140
6.5	Direktno lasersko sinterovanje metala (DMLS).....	152
6.5.1	Izrada segmenta alata za vulkanizaciju pneumatika metodom direktnog laserskog sinterovanja metala.....	152
6.5.2	Analiza DMLS segmenta.....	155
6.6	Selektivno lasersko topljenje (SLM).....	160
6.6.1	Izrada segmenta alata za vulkanizaciju pneumatika metodom selektivnog laserskog topljenja.....	160
6.6.2	Analiza SLM segmenta.....	161
6.7	Poređenje rezultata analize korišćenih procesa.....	173
6.7.1	Pouzdanost i ekonomski aspekti RP metoda za direktnu izradu alata.....	174
6.7.2	Određene prednosti i slabosti RP procesa.....	176
6.7.2.1	SLS proces.....	176
6.7.2.2	DMLS proces.....	177
6.7.2.3	SLM proces.....	177
7	Literatura.....	181
8	Rečnik.....	187

СР - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

658.5(004.984)
004.9

РАЧУНАРСКИ подржане брзе производне
технологје / Милош Трајковић (et
al) - 1. izd. - Крагујевац : Mašinski
fakultet, Centar za informacione
tehnologije, 2008 (Крагујевац - Skver) - 188
str., ilustr., 24 cm

Тираж 300 - Bibliografija: str. 181-186

ISBN 978-86-86661-24-5
Е. Трајковић, Мирослав (аутор)
а) САД/САМ системи б) Производња -
Примена рачунара
COBISS.SR-ID 150351372

1 Uvod u brze proizvodne tehnologije

Svrha svih tehnika izrade prototipova je da pomogne dizajnerima, inženjerima, investitorima i svima ostalima koji učestvuju u određenom projektu, da realizuju fizički model objekta koji se razvija. Posmatranjem fizičkog modela mogu se uočiti konstruktivne greške i moguće poteškoće u izradi i montaži. Uočavanje projektnih grešaka na fizičkom modelu – prototipu u ranim fazama projekta skraćuje ukupno vreme potrebno za razvoj proizvoda.

Razvoj proizvoda može se definisati kao proces stvaranja nečega što ne postoji u cilju zadovoljenja određenih potreba. To je složen proces koji se sastoji od više faza, gde svaka faza zavisi od više faktora (vreme, resursi, kompleksnost proizvoda i sl.). Uz to, globalna ekonomija zahteva brži tempo razvoja proizvoda, uz niže troškove. Pomenute faze su sledeće:

1. ideja – mentalna slika proizvoda,
2. koncepcija – početna ideja projekta,
3. alfa prototip – prvi prototip proizvoda,
4. glavni projekat – primarni projekat za proizvodnju,
5. alfa prototip – glavna provera proizvoda,
6. finalni projekat – optimizacija proizvoda,
7. nulta serija – proizvodnja malog obima,
8. serijska proizvodnja – proizvodnja velikog obima.

Veći deo troškova u razvoju proizvoda otpada na izradu koncepta i proveru dizajna. Tokom tih faza puno vremena se troši na dizajniranje i redizajniranje proizvoda. Prototipovi se prave i procenjuju, vrše se izmene i ceo proces se odvija ispočetka. Na kraju, dizajn proizvoda je konačan i ide se dalje u fazu proizvodnje. Više od polovine troškova razvoja otpada na početne faze, pa je jasno da bi uštede načinjene u tom periodu bile značajne.

U toku razvoja proizvoda, cena izmena projektne dokumentacije je različita, zavisno od faze u kojoj se promena vrši. Što je proizvod bliži finalnoj proizvodnji, to su i promene u projektu skuplje. Zato je važno uočiti nedoslednosti i probleme u ranim fazama razvoja. Sa napretkom računarske tehnike, a posebno CAD softvera koji radi sa parametrizovanim objektima, promene u osnovnom dizajnu mogu se vršiti uz najmanji napor. Izradom prototipova se osigurava da će proizvod odgovarati zamisli projektanta. Tako neće doći do nepotrebnih troškova nastalih zbog potreba za promenama u kasnim fazama projektovanja ili u fazi proizvodnje.

Ključ uspeha u razvoju proizvoda su nove tehnologije pomoću kojih se relativno brzo i jeftino mogu proizvesti različite klase prototipova. To su specijalni postupci koji umanjuju cenu i vreme potrebno da proizvod prođe ciklus razvoja. Među njima su vodeći: brza izrada prototipova (engl. *Rapid Prototyping* – RP) i brza izrada alata (engl. *Rapid Tooling* – RT).

1.1 Osnovno o prototipovima

1.1.1 Definicija prototipa

Prototip je suštinski važan deo procesa razvoja proizvoda. Uobičajena definicija prototipa glasi [HOR00]:

Prototip je prvi ili originalni primerak nečega što je, ili će biti, umnožavano ili razvijano.

Pa ipak, obzirom na široku upotrebu ovog pojma u praksi koje ova definicija ne pokriva, može se uzeti i sledeći, nešto slobodniji iskaz [CHU03]:

Prototip je aproksimacija proizvoda (ili sistema) ili njegovih delova u nekom obliku sa određenom svrhom njegove implementacije.

Ova vrlo opšta definicija odstupa od opšte prihvaćenog shvatanja prototipa kao fizičkog objekta. Njome su pokrivene razne vrste prototipova koji se koriste u razvoju proizvoda, pa čak i matematički modeli, skice, trodimenzionalni geometrijski modeli, gipsani modeli i fizičke aproksimacije proizvoda. Izrada prototipova je proces stvaranja navedenih prototipova. Stoga, ovaj pojam može obuhvatati razne procese, od puštanja simulacija na računaru, do izrade funkcionalnog prototipa.

1.1.2 Tipovi prototipova

Opšta definicija prototipa sadrži tri bitna aspekta i to:

1. implementaciju prototipa; od celog proizvoda (ili sistema) do podsklopova i komponenti,
2. formu prototipa; od virtualnog do fizičkog prototipa i
3. stepen aproksimacije; od grube predstave do tačne replike proizvoda.

Implementacija prototipa može da obuhvata izradu celog proizvoda ili samo njegove delove i podsklopove. Kompletan prototip, kako mu ime govori, modelira većinu karakteristika proizvoda. Najčešće se pravi u punoj veličini i funkcionalnosti. Međutim, nisu retki prototipovi koji se izrađuju umanjeni ili uvećani ili samo sa delimičnom funkcionalnošću.

Forma prototipa povezana je sa načinom na koji se prototip realizuje i koristi, i kreće se u oblasti od potpuno virtuelnih do fizičkih prototipova. Sa jedne strane su virtuelni prototipovi koji nisu opipljivi. U ovu klasu spadaju matematički modeli i trodimenzionalni geometrijski modeli. Ovakvi prototipovi se koriste uglavnom za analizu proizvoda. Zaključci koji iz toga slede zasnovani su samo na poznatim principima nauke i zapažanjima projekatana. Glavni nedostatak virtuelnih prototipova je nemogućnost predviđanja nepoznatih okolnosti. S druge strane, fizički model je opipljiva manifestacija proizvoda, i često se koristi za proveru koncepata, testiranje i eksperimente. Fizički model ne mora da poseduje punu funkcionalnost proizvoda. Ipak i kao takav on može da bude od neprocenjive vrednosti za ocenu ergonomskih i estetskih karakteristika proizvoda ili za potrebe marketinga.

Treći aspekt definicije prototipa obuhvata nivo aproksimacije prototipa. Veoma grubi prototipovi uglavnom se koriste za proučavanje oblika i gabarita proizvoda u ranim fazama razvoja. Takvi prototipovi i ne moraju da izgledaju kao konačan proizvod, ali se koriste u razvoju za testiranje i proučavanje mogućih problema. Nasuprot njima, postoje prototipovi koji u potpunosti odslikavaju proizvod kako po topologiji i geometriji, tako i po funkcionalnosti. Ovakvi

