

Posvećeno 70. obljetnici života prof. dr. sc. Igora Čatića
Dedicated to Prof. Igor Čatić, PhD, on his 70th birthday

Damir GODEC, Mladen ŠERCER
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Brza proizvodnja kalupa

ISSN 0351-1871
UDK 621.744:678.027.7
Pregledni rad / Review article
Primljeno / Received: 15. 1. 2007.
Prihvaćeno / Accepted: 26. 3. 2007.

Sažetak

Primjena prototipova pri razvoju proizvoda postaje sve važnijom. Razlog je u većem broju razvijenih automatiziranih postupaka brze proizvodnje prototipova (e. *Rapid Prototyping* – RP) koji omogućuju izravno pravljenje prototipova temeljeno na CAD modelu proizvoda u vrlo kratkom vremenu. Temeljni je nedostatak tih postupaka još uvijek ograničen broj raspoloživih materijala za proizvodnju prototipova. S druge strane, ako postoji odgovarajući materijal za proizvodnju prototipova, načela pravljenja prototipova razlikuju se od, primjerice, pravljenja otpresaka injekcijskim prešanjem. To dovodi do bitnih razlika u svojstvima prototipova i budućih proizvoda načinjenih injekcijskim prešanjem. Na tržištu se može uočiti još jedan trend – zahtjevi za proizvodnju veće količine istovrsnih prototipnih tvorevina. U tom slučaju RP postupci nisu više toliko atraktivni zbog povišenih troškova i niže brzine njihova pravljenja u usporedbi sa, primjerice, injekcijskim prešanjem. Takvo stanje uzrokovalo je sve prošireniju uporabu RP postupaka za pravljenje elemenata kalupa ili cijelih kalupa – postupaka brze proizvodnje kalupa (e. *Rapid Tooling* – RT). U radu je predstavljen pregled važnijih RT postupaka.

KLJUČNE RIJEČI:

brza proizvodnja kalupa
injekcijsko prešanje
razvoj proizvoda

KEYWORDS:

rapid mould manufacturing
injection moulding
product development

Rapid Mould Manufacturing

Summary

The application of prototypes is becoming more and more important in the product development process. The reason lies in an increasing number of the developed automated processes of Rapid Prototyping (RP) which enables direct prototype production based on the CAD model of product within a very short time. One of the basic drawbacks of RP processes is the still limited number of applicable materials for prototype production. On the other hand, if appropriate material for prototype production does exist, the basic principles of prototype production differ from those for e.g. injection moulding. This leads to the key differences in properties of prototypes and future products produced by injection moulding. There

is also another trend that can be noticed on the market - demands for the production of larger quantities of the same prototypes. In that case, RP processes are not so attractive any more, because of the costs of prototype materials and the speed of RP process in comparison with e.g. injection moulding. This caused a wider application of RP processes as processes for the production of mould elements or the entire moulds - Rapid Tooling processes (RT). The paper presents an overview of the major RT processes.

Uvod / Introduction

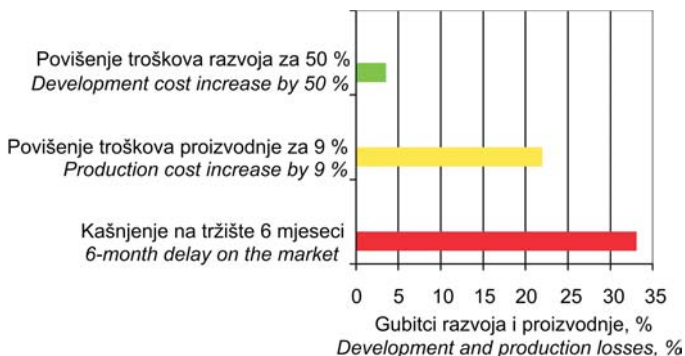
Pri razvoju svih proizvoda teži se proizvodnji visokokvalitetnih proizvoda u što kraćem vremenu, uz što niže troškove. Na tržištu su u prošlosti postojali većinom masovni, identični proizvodi. Međutim, marketinška koncepcija tvrtki usmjerena je krajnjem korisniku i njegovim zahtjevima. Tomu je posebice pridonijela globalizacija tržišta te pojačana konkurencija među proizvođačima. Prilagodbe zahtjevima potrošača mogu se očitovati u završnim fazama proizvodnje (npr. proizvodnja istih proizvoda, ali u različitim bojama), no mogu se očitovati i u bitnim izmjenama u proizvodu. Pri tome vrijeme postaje ključnim čimbenikom za ocjenu uspješnosti na tržištu. Jedan od mogućih odgovora takvim oštrim zahtjevima na razvoj proizvoda jest uporaba postupaka obuhvaćenih pojmom brza proizvodnja tvorevina u sklopu koncepta tzv. brzog razvoja proizvoda (e. *Rapid Product Development* - RPD). RPD pristupom nastoji se ubrzati proces razvoja proizvoda radi minimiranja vremena od ideje o proizvodu do njegova izlaska na tržište. Kada se govori o RPD pristupu, misli se ponajprije na primjenu konstruiranja i izradbe s pomoću računala (CAD, CAM, CAE) te primjenu postupaka brze proizvodnje tvorevina i obrnutoga, reverznoga inženjerstva. Brzu proizvodnju tvorevina moguće je ostvariti na tri načina, tj. kao postupke: brze proizvodnje prototipova (e. *Rapid Prototyping* - RP), brze proizvodnje alata (e. *Rapid Tooling* - RT) i brze (izravne) proizvodnje (e. *Rapid Manufacturing* - RM). Ti postupci omogućuju proizvodnju tvorevina vrlo kompliciranih oblika izravno iz računalnih podataka u vrlo kratkom vremenu s pomoću najčešće automatiziranih procesa.¹

Postupci brze proizvodnje tvorevina / Rapid production procedures

Na području razvoja proizvoda moguće je zamijetiti nekoliko trendova. Konstruiranju se posvećuje sve veća pozornost, sve je češća pojedinačna i maloserijska proizvodnja, potrebno je sve više voditi računa o zaštiti okoliša, općenito je skraćen vijek proizvoda na tržištu, prisutan je trajan pad cijena proizvoda na tržištu zbog vrlo jake konkurencije, pri razvoju proizvoda potrebno je držati se različitih propisa i normi, zahtijeva se interdisciplinarni pristup razvoju proizvoda, u proces razvoja proizvoda uključuje se sve više stručnjaka izvan matičnog poduzeća (multinacionalne kompanije), gdje je vrlo važno uspostaviti odgovarajuću komunikaciju između suradnika. Novi proizvodi su kompleksniji (funkcijski) i kompliciraniji (geometrijski), a vrijeme njihove proizvodnje treba biti što kraće.¹⁻³

Analizom slike 1 moguće je zaključiti kako je vrijeme potrebno za uvođenje proizvoda na tržište ključan čimbenik za ocjenu uspješno-

sti bilo kojeg proizvoda. Prevlad vremena nad troškovima pri razvoju proizvoda nema samo apsolutno već i relativno značenje. To znači da nije dovoljno samo tijekom razvoja proizvoda donositi ispravne odluke, već je važnije donositi ih što je moguće ranije.¹ Pri tome treba napomenuti kako se pri razvoju proizvoda u fazi konstruiranja istodobno definira 80 % kvalitete proizvoda te 70 % troškova razvoja i proizvodnje proizvoda.^{1,4} Moguće je zaključiti kako se maksimalna dobit može ostvariti minimiranjem vremena razvoja proizvoda, a ne troškova razvoja.¹



SLIKA 1. Utjecaj različitih čimbenika na gubitke u procesu razvoja proizvoda¹

FIGURE 1. Influence of different factors on the losses in product development process

Očita je važnost postupaka brze proizvodnje prototipova unutar RPD pristupa. Nakon što se ideja o novom proizvodu definira u digitalnom obliku, u vrlo se kratkom vremenu s pomoću postupaka brze proizvodnje prototipova može izraditi fizički ili čak i funkcijski model.¹ Modeli tijekom razvoja proizvoda rabe se ponajprije radi poboljšanja kvalitete komunikacije između timova stručnjaka uključenih u razvoj te radi komunikacije s tržištem. Posebnim prototipovima moguće je analizirati ispunjavanje propisanih normi za proizvod, moguće je certificiranje proizvoda itd. Vrlo je bitna uloga prototipova i u ranom otkrivanju grešaka i propusta tijekom razvoja proizvoda.

Prema definiciji VDID (*Verband Deutscher Industrie-Designer*), postoji šest različitih tipova modela:^{1,3}

- razmjerni modeli
- ergonomijski modeli

- konstrukcijski modeli
- funkcijski modeli
- prototipovi
- tvorevine.

Modeli u pravilu predstavljaju trodimenzijski prikaz stvarne tvorevine u različitim mjerilima. Pri tome prototipovi predstavljaju samo jednu vrstu modela. Međutim, u sklopu brze proizvodnje tvorevina, postupci pravljenja svih vrsta modela nazivaju se postupcima brze proizvodnje prototipova, pa se za sve modele općenito uvriježilo naziv prototip.

Prototipove je također moguće podijeliti na reproduksijske i procesne prototipove. Reprodukcijski prototipovi vjerno prikazuju proizvod, no primjenjuju se samo u marketinške i eventualno u konstrukcijske svrhe uz određena ograničenja. Procesni prototipovi primjenjuju se za ispitivanje karakteristika razvijanog modela te za njihovo poboljšanje. Na primjeru injeksijskog prešanja, procesni prototipovi (npr. načinjeni u kalupu za izradbu prototipova) primjenjuju se za poboljšanje karakteristika otpresaka, ali i procesa injeksijskog prešanja, prije nego što se uopće započne s izradbom kalupa.³

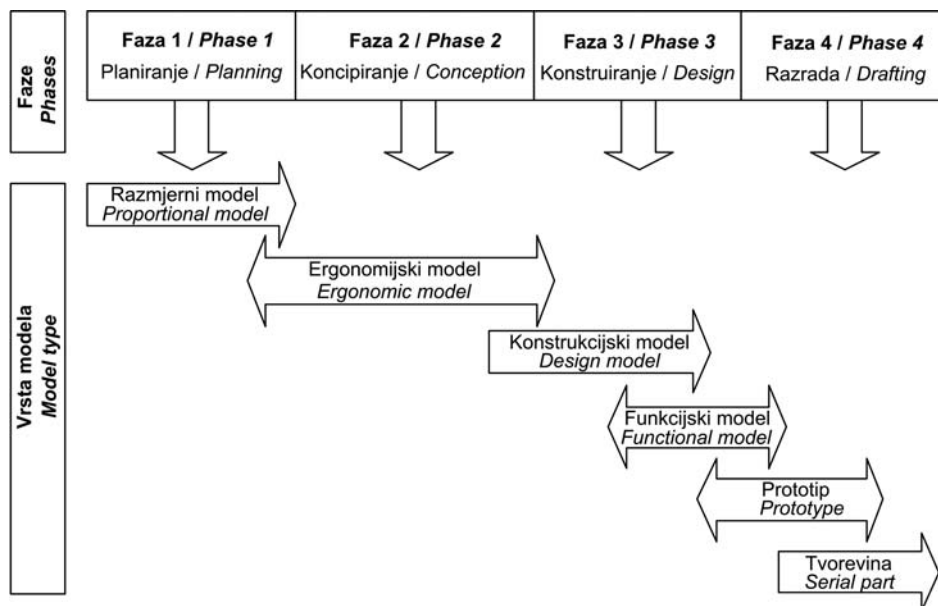
Posebnu skupinu prototipova čine tzv. prividni prototipovi, koji se razvijaju u okružju nazvanom prividna stvarnost, prividnost (e. *Virtual Reality*).¹

Općenito, povezanost razvoja proizvoda prema definiciji DIN VDI 2221 i uporabe pojedinih vrsta prototipova u određenim fazama razvoja moguće je prikazati slikom 2.¹

Najčešća područja primjene prototipova prikazana su slikom 3. Slika 4 prikazuje strukturu primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina.⁵

Najveći nedostatak postupaka brze proizvodnje prototipova je u ograničenom broju materijala koje je moguće preraditi. Svojstva raspoloživih materijala za proizvodnju prototipova u načelu se bitno razlikuju od svojstava materijala koji se rabe pri serijskoj proizvodnji. Kada je riječ, primjerice, o injeksijskom prešanju, bitna razlika javlja se i u samom načinu proizvodnje, odnosno proizvodnji prototipova i otpresaka u serijskoj proizvodnji.⁶

Gotovo svaki postupak proizvodnje prototipova može se rabiti za proizvodnju dijelova čija je primarna estetska funkcija. Međutim, samo pokusna proizvodnja prototipova predviđenim postupkom preradbe daje potrebne informacije o ponašanju proizvoda,



SLIKA 2. Korelacija između definicije razvoja proizvoda prema DIN VDI 2221 i brze proizvodnje prototipova¹

FIGURE 2. Correlation between definitions of product development according to DIN VDI 2221 and rapid prototyping

moogućnostima preradbe i tolerancijama izmjera proizvoda. Zahtjevi tržišta stoga postavljaju novi zadatak na brzu proizvodnju prototipova; njihovu pojedinačnu ili maloserijsku proizvodnju sa svojstvima usporedivim svojstvima otpresaka izrađenih u klasičnim kalupima za serijsku proizvodnju u što kraćem vremenu.^{1,7,8} Iako je razvoj na području izravne proizvodnje prototipova stalan, i najbrži RP uređaji još su prespori i omogućuju preradbu samo ograničenog broja materijala pa ne zadovoljavaju svakodnevne potrebe industrije. Postupci kao što je injekcijsko prešanje stoga ostaju za sada jedinim odgovorom na te zahtjeve. Pri tome RP postupci mogu poslužiti za ubrzanje postupaka izradbe kalupa te za sniženje troškova tih postupaka. Zbog toga se razvija posebno područje brze proizvodnje kalupa.^{1,8}

Postupci brze proizvodnje kalupa / Rapid tooling procedures - (RT)

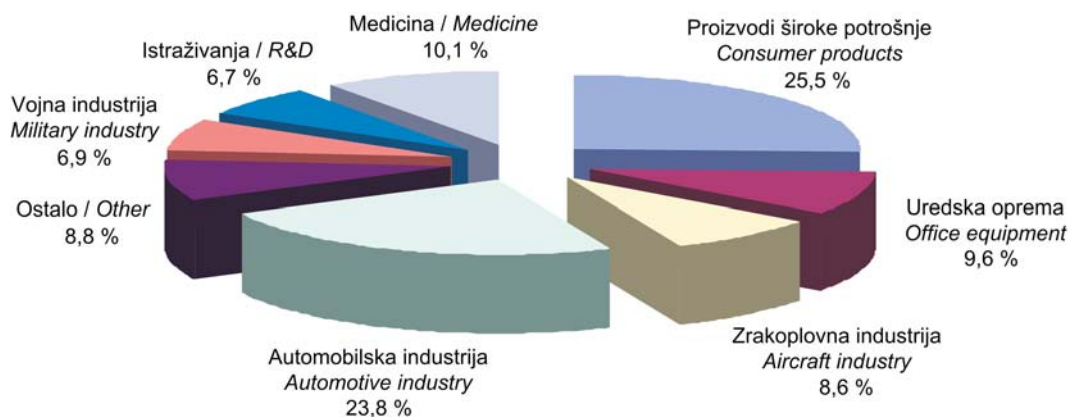
Brza proizvodnja prototipnih kalupa podrazumijeva uporabu niza postupaka brze proizvodnje prototipova s pomoću kojih se izrađuju cijeli privremeni kalupi ili samo elementi koji oblikuju kalupne šupljine (tzv. hibridni kalupi), u kojima će se izraditi odgovarajući broj otpresaka (prototipova).^{8,9}

Razlikuju se dvije temeljne skupine postupaka brze izradbe kalupa:^{1,8}

- postupci temeljeni na proizvodnji pramodela s pomoću postupaka brze proizvodnje prototipova i njihovom daljnjom obradom (posredni postupci brze proizvodnje kalupa)
- postupci temeljeni na izravnoj proizvodnji elemenata kalupa (izravni postupci brze proizvodnje kalupa).

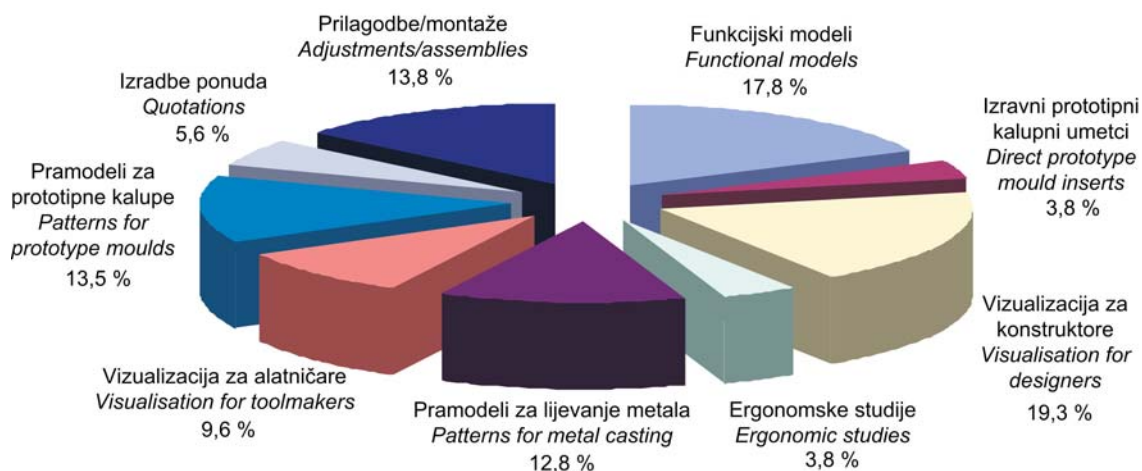
Mogućnosti brze proizvodnje kalupa uz niske troškove postale su tema mnogih istraživanja i projekata, a razvoj postupaka brze proizvodnje kalupa dao je djelomičan odgovor suvremenim tržišnim zahtjevima. Postupci brze proizvodnje kalupa ustvari predstavljaju kombinaciju postupaka brze proizvodnje prototipova i klasičnih postupaka izradbe kalupa radi brzog razvoja i izradbe kalupa. Brza proizvodnja prototipova zahtijeva prevladavajuće znanje glede samo jednog postupka (usvojenog RP postupka), dok brza proizvodnja kalupa zahtijeva, osim poznavanja postupka RT, i dobro poznavanje postupka injekcijskog prešanja te postupaka obradbe odvajanjem čestica. Postupci RT pružaju rješenja za izradbu kalupnih šupljina, no kalup nije sustav koji čine samo elementi koji oblikuju kalupnu šupljinu ugrađeni u kućište, već je to mehanički i toplinski dinamički podsustav sustava za injekcijsko prešanje. Stoga se pred RT postupke postavljaju mnogo oštriji zahtjevi negoli pred RP postupke.^{1,8}

Na tržištu RT opreme i materijala u ovom trenutku nisu ispunjeni navedeni zahtjevi (posebice posljednja dva zahtjeva). Međutim, sve tvrtke s tog područja trajno se nastoje približiti tim zahtjevima. To se posebice odnosi na brzinu opreme, točnost i preciznost izmjera i oblika te u broju materijala koje je moguće preraditi RT postupcima. Također se trajno usavršavaju svojstva uporabljivih materijala, što pridonosi poboljšanim svojstvima gotovih tvorevina. Na taj se način u budućnosti očekuje smanjenje razlika u kvaliteti kalupnih umetaka načinjenih klasičnim postupcima i alternativnim RT postupcima.^{1,8} U nastavku slijedi opis nekoliko najvažnijih postupaka brze proizvodnje kalupa.



SLIKA 3. Područja primjene prototipova⁵

FIGURE 3. Prototype application areas



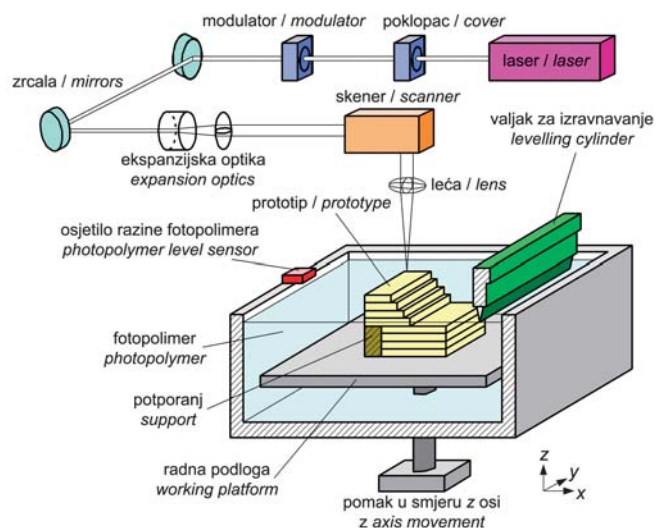
SLIKA 4. Raščlamba primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina¹

FIGURE 4. Systematisation of prototype application in development and production

Izravna proizvodnja epoksidnih dijelova kalupa / Direct production of epoxy mould inserts (e. Direct ACES IM - AIM)¹⁰

Izravni AIM postupak je postupak brze proizvodnje kalupa pri kojem se s pomoću postupka stereolitografije (e. *Stereolithography* – SLA) izrađuje ljsuka oblika kalupne šupljine (debljine 2 do 3 mm).

Prototipovi s pomoću postupka stereolitografije (slika 5) nastaju polimeriziranjem niskoviskozne polimerne kapljavine sloj po sloj pod djelovanjem UV svjetlosti. Stereolitografijom se uglavnom prerađuju fotopolimeri temeljeni na akrilnim, vinilnim ili epoksidnim smolama. Oblik i izmjere prototipova izravno se na uređaj za stereolitografiju prenose s 3D računalnog modela prototipa. Kalupni elementi (stijenke kalupne šupljine) izrađuju se s pomoću tzv. *Accurate Clear Epoxy Solid* (ACES) smole. Zbog niske toplinske provodnosti toga materijala, u unutrašnjost SLA ljsuke lijeva se smjesa aluminija i epoksidne smole. Tipično trajanje ciklusa injekcijskog prešanja s AIM kalupima iznosi za tanje stijenke 3 do 5 minuta, za razliku od 5 do 20 sekundi u klasičnim kalupima.



SLIKA 5. Postupak stereolitografije (SLA)¹⁰

FIGURE 5. Stereolithography procedure

Glavna je prednost tog postupka brza i jeftina proizvodnja ljsuka, dobra dimenzijska točnost i preciznost, mogućnost reprodukcije vrlo finih detalja. Elementi kalupne šupljine osjetljivi su na savijanje te trošenje, posebice pri preradbi staklom ojačanih plastomera. Takvi kalupi vrlo brzo postaju neupotrebljivi zbog intenzivnog trošenja, a prisutna je i teškoća odvođenja topline kalupu zbog loše toplinske provodnosti materijala kalupa.

3D Keltool postupak / 3D Keltool procedure¹¹

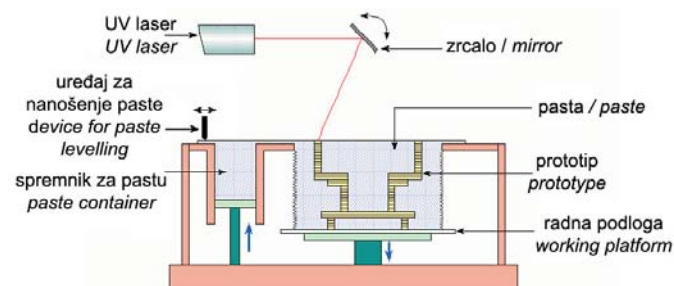
3D *Keltool* je postupak pravljenja metalnih kalupnih umetaka s pomoću pramodela načinjenih SLA postupkom. Postupak započinje izradbom 3D računalnog modela te pravljenjem pramodela oblika žiga i gnijezda kalupa s pomoću SLA postupka. Zatim se proizvode silikonski kalupi sa šupljinama koje odgovaraju geometriji pramodela. U te se kalupe u idućem koraku lijeva smjesa metalnog praha (čelik i titan-karbid) i veziva, čime se dobivaju tzv. *zelenci* umetaka. *Zelenci* se stavljaju u peć te se pri povišenim temperaturama i u kontroliranoj atmosferi (sniženi udio vodika) razgrađuje vezivo, metalne čestice sraščuju, a u nastale pore prodire bakar. Rezultirajući kalupni umetci sastoje se od 70 % čelika i 30 % bakra. 3D -

Keltool postupak omogućuje visoku razlučivost detalja na kalupnim umetcima. Tolerancije tog procesa kreću se u granicama $\pm 0,02$ mm. Pri tome je ključna točnost pramodela, koja izravno utječe i na točnost izrađenih kalupnih umetaka.

Prednosti primjene 3D *Keltool* postupka pri pravljenju kalupnih umetaka jesu: preradba svih vrsta plastomera, visoka preciznost, visoka tvrdoća elemenata kalupa, moguća izradba od 500 000 do 1 000 000 otpresaka u jednom kalupu (postojanost trošenju), brz izlaz proizvoda na tržište, mogućnost naknadne obradbe s pomoću bilo kojega klasičnog postupka, nema ograničenja glede kompliciranosti geometrije, skraćanje vremena za oko 60 % u usporedbi s klasičnom izradbom kalupa, moguća povišena proizvodnost kalupa (optimirani položaj kanala za temperiranje), mogućnost vrlo dobre ponovljivosti (pravljenje kalupa s više kalupnih šupljina). Nedostatak tog postupka je ograničenje u izmjerama kalupnih umetaka (150 mm · 215 mm · 100 mm).

OptoForm postupak pravljenja kalupa / OptoForm mould-making procedure¹²

Tipični materijal za pravljenje metalnih prototipova i elemenata kalupa postupkom *OptoForm* u pastoznom je stanju. Pastozni materijal je fotopolimer (akrilni ili epoksidni), punjen metalnim ili keramičkim prahom ili česticama. Materijali koji se rabe za *OptoForm* postupak dijele se u nekoliko skupina: akrilne smole dovoljne čvrstoće da se mogu rabiti za proizvodnju voštanih kalupa za injekcijsko prešanje, višenamjenske epoksidne smole za proizvodnju prototipova, skupina materijala male stlačivosti za postupke kao što su toplo oblikovanje i oblikovanje deformiranjem, keramike, metali (titan i čelik). Pastozni materijal nanosi se u finim slojevima jedan na drugi, a svaki sloj mjesno očvršćuje s pomoću UV laserske zrake upravljane posebnim zrcalima (slika 6). Sustav za dobavu novog materijala s pomoću dvostrukog valjka nanosi novi sloj paste na prethodno očvršnut sloj. Debljina sloja može varirati od 20 do 200 μ m. Postupak zahtijeva uporabu posebnih potpornja (kao u slučaju stereolitografije) radi učvršćivanja prototipa tijekom njegova pravljenja.



SLIKA 6. *OptoForm* postupak¹²

FIGURE 6. *OptoForm* procedure

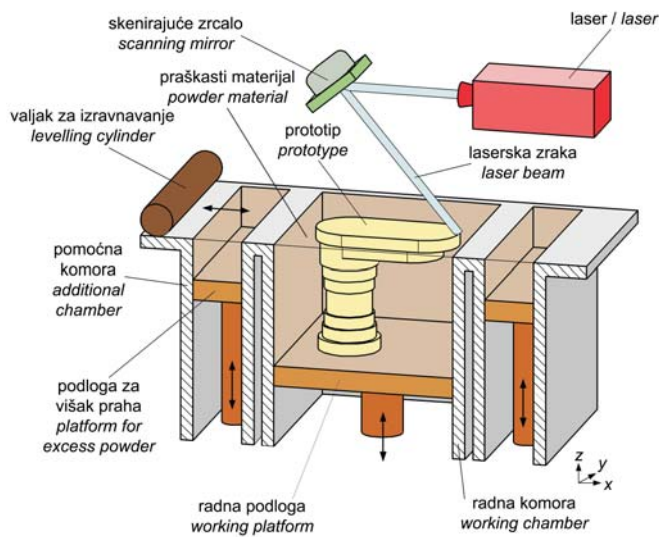
Nakon pravljenja jednoga sloja nije potrebno dodatno vrijeme prije nanošenja novoga sloja kao što je slučaj pri stereolitografiji. Ta činjenica, zajedno s činjenicom da se za postupak rabi Ar laser snage 400 ili 800 mW, dovodi do visoke proizvodnosti čak i za velike i masivne prototipove. Brzine proizvodnje prototipova mogu dostići i 25 mm/h (u smjeru osi z). Izmjena materijala također je vrlo brza i jednostavna. *OptoForm* je još u razvoju pa za sada nema podataka o trajnosti kalupnih elemenata načinjenih tim postupkom.

Proizvodnja silikonskih kalupa (RTV kalupi) / Silicone mould production (RTV Moulds)¹

Proizvodnja kalupa od silikonskog kaučuka koji umrežuje pri sobnoj temperaturi (RTV kaučuci) jedan je od najpopularnijih posrednih postupaka brze proizvodnje kalupa. Pri tome se silikonski kaučuk rabi kao kalupni materijal koji se lijeva oko pramodela tvoreći elemente kalupne šupljine. Općenito, postupak se sastoji od tri koraka: pravljenja pramodela, dotjerivanje pramodela na željeni oblik i točnost izmjera te lijevanje silikonskog kaučuka oko pramodela. Nakon lijevanja i očvršćivanja silikonskog kaučuka, kalup se razrezuje po sljubnici s pomoću skalpela, a iz kalupne šupljine se vadi pramodel. Materijali koji se najčešće prerađuju u takvim kalupima su poliuretani, ABS i poliamidi. Silikonski kalupi predstavljaju vrlo jednostavno, brzo i jeftino rješenje za izradbu vizualnih i ergonomskih prototipova. Nedostatak postupka je u mogućnosti izradbe relativno malog broja otpresaka (prototipova) te ograničenost na preradbu samo nekoliko vrsta materijala. Silikonski kalup može se izraditi kao jednodijelni ili dvodijelni.

Selektivno lasersko srašćivanje metala / Selective laser sintering of metals (SLS)^{1,13}

Selektivno lasersko srašćivanje jedan je od najvažnijih postupaka pravljenja prototipova (slika 7). SLS postupak sličan je stereolitografiji. Razlika je u tome što se pri SLS postupku rabe praškasti materijali.



SLIKA 7. Postupak selektivnoga laserskog srašćivanja (SLS)¹³

FIGURE 7. Selective laser sintering procedure

Pri SLS postupku laserska zraka reflektira se od zrcala za usmjerenje zraka i ocrta oblik sloja prototipa po praškastome materijalu smještenom u posebnoj spremniku. Pod djelovanjem toplinske energije laserske zrake praškasti materijal omekšava i dolazi do međusobnog zavarivanja ili srašćivanja čestica materijala. Laser je modularan tako da ima utjecaja samo na one čestice koje je ozračio (samo one srašćuju). Nakon generiranja početnog sloja prototipa, podloga s prototipom spušta se za debljinu idućeg sloja, a istodobno se podiže podloga u spremniku s praškastim materijalom. Valjkom za izravnavanje nanosi se novi sloj materijala i proces se ponavlja do konačne izradbe modela.¹

Postupak SLS uvriježio se kao jedan od najčešće rabljenih postupaka izravne brze izradbe kalupa. Pri SLS postupku za izradbu kalupnih umetaka ili metalnih prototipova rabi se mješavina praha, pri čemu jedan sastojak ima više, a drugi niže talište.⁷ Točnost i preciznost izmjera prototipnog dijela načinjenog SLS postupkom ovisi o CAD

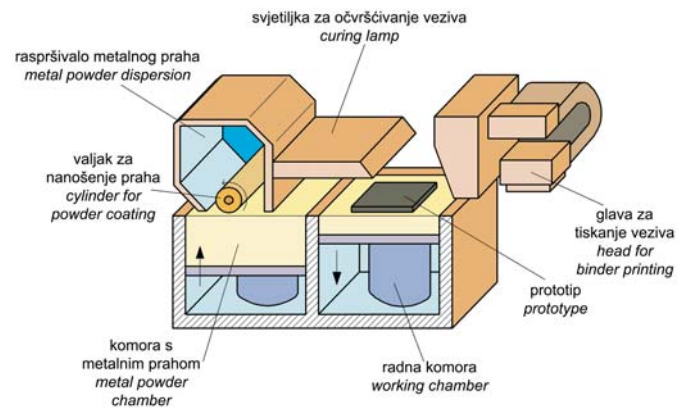
modelu, algoritmu rezanja u slojeve, prijenosu podataka, preciznosti pokretnih dijelova uređaja, kvaliteti laserske zrake, svojstvima praha, stezanju nakon toplinske obradbe itd. U slučaju primjene većine metalnih prahova, nakon toplinske obradbe hrapavost kalupnih umetaka iznosi od 20 do 40 μm (Ra), a nakon prodiranja, primjerice, epoksidne smole od 7 do 15 μm (Ra). Daljnjom naknadnom obradbom (pjeskarenje ili poliranje) hrapavost je moguće smanjiti na samo 1 μm.¹³

Velik je broj postupaka koji u procesu brze izradbe kalupa uključuju i SLS postupak, no za potrebe rada istaknut će se dva najvažnija postupka:¹³

- izravno srašćivanje metala (e. *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS ili *Direct Tool*)
- posredno srašćivanje metala (e. *Indirect Metal Laser Sintering* - IMLS ili *Rapid Tool*).

3D tiskanje metala / 3D printing of metals - (3DP)¹⁴

S pomoću patentiranog 3DP *ProMetal* postupka moguće je izrađivati metalne prototipove ili prototipne kalupe. Postupak se temelji na načelima *inkjet* tiskanja. Uređaj za 3DP sastoji se od glave s mlaznicama čije je gibanje u smjeru osi x i y upravljano s pomoću računala, te spremnika s metalnim prahom ispod kojega se nalazi podloga koja omogućuje gibanje u smjeru osi z (slika 8).



SLIKA 8. *Prometal* postupak (3DP)¹⁴

FIGURE 8. *Prometal* procedure

Pri nanošenju veziva na metalni prah, kontinuirani se mlaz veziva s pomoću piezoelektričnih elemenata raspršuje u kapljice. Kapljice prolaze kroz elektrostatsko polje, pri čemu se električki nabijaju, a njihov se naboj rabi za točno nanošenje na metalni prah. Kada kapljica dotakne metalni prah, nastaje kuglasti konglomerat veziva i metalnog praha. Kapilarne sile djeluju na vezivo te ga pomiču na željena mjesta na metalnom prahu. Time se povezuju čestice metala na jednom sloju te slojevi međusobno. Nakon isparavanja kapljevite faze veziva s pomoću posebnog sušila, načinjeni prototip sastoji se od 60 % obujamnog udjela metalnog praha i 10 % udjela organskog veziva. Mehanička svojstva prototipa nakon tog koraka izradbe vrlo su niska pa je potrebno srašćivanje prototipa u peći zbog povišenja svojstava. Struktura gotovog prototipa ili prototipnog kalupa sastoji se od 60 % čelika i 40 % bronce.

Laminiranje / Lamination (LOM)¹⁵

Prototipni kalupi načinjeni LOM postupkom izrađuju se od metalnih (uglavnom čeličnih) ploča. S pomoću računala se definiraju slojevi budućega kalupnog elementa, a zapis svakog sloja posebno se pohranjuje. Zatim se na temelju svakog od zapisa na ploči izrezuju oblici slojeva s pomoću glodala, plazme, lasera ili vodenim mlazom. Izrezani slojevi u sljedećem se koraku slažu i međusobno povezuju. Najpoznatiji postupak laminiranja je tzv. *Stratoconcept* (slika 9).



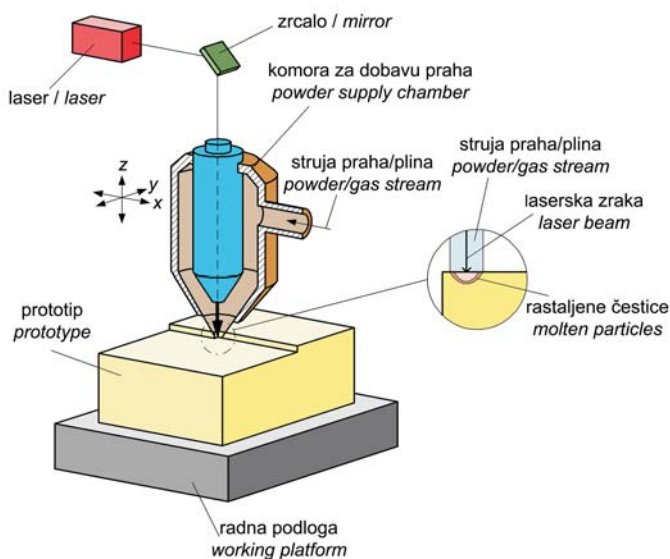
SLIKA 9. Stratoconcept postupak laminiranja (LOM)¹⁵

FIGURE 9. Stratoconcept lamination procedure

Postupak se sastoji od podjele osnovnog materijala (u pločastom obliku) u potreban broj slojeva nazvanih *stratum*. Slojevi se izrađuju i oblikuju s pomoću 2,5-osne glodalice ili 5-osnog lasera. Izrezani slojevi u idućem se koraku povezuju u cjelinu. Postupak je vrlo brz i nema ograničenja glede geometrije ili izmjera prototipa (prototipnog kalupa).

Izravno taloženje metala / Laser Engineering Net Shaping - LENS¹⁶

Postupak LENS započinje djelovanjem laserske zrake (e. *Yag laser*) na vrlo usko područje površine, pri čemu nastaje mjesno rastaljeno područje (slika 10). S pomoću mlaznice se zatim dodaje točno određena količina novoga praškastog materijala, pri čemu nastaje novi sloj prototipa. Postupak se zbiva u podtlačnoj komori, u kojoj se lako mogu kontrolirati uvjeti izradbe prototipa. To je posebice važno pri izradbi prototipova od aluminija, gdje prisutnost kisika sprječava dobro međusobno povezivanje slojeva prototipa. LENS postupak omogućuje i izradbu kalupa s više materijala u jednom ciklusu. Primjerice, moguće je izraditi dijelove kalupne šupljine od čelika, a dio umetaka može u istom ciklusu biti načinjen od bakra (npr. za jezgre koje se teško mogu temperirati).

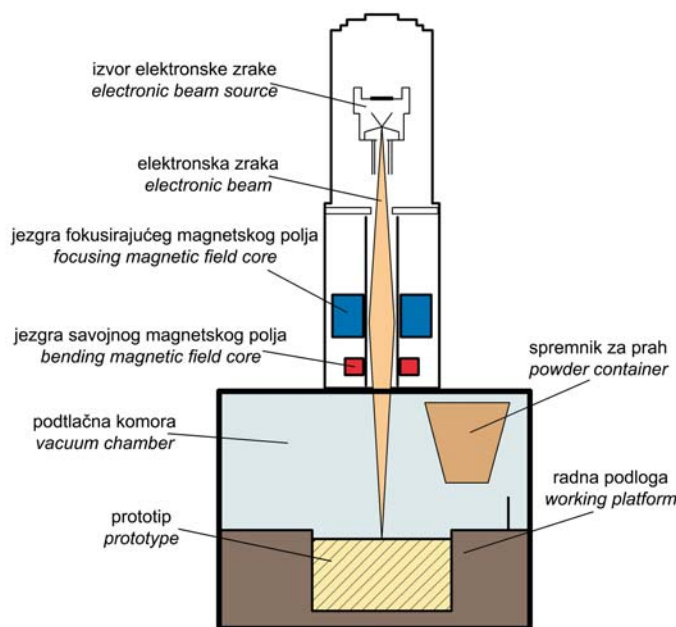


SLIKA 10. Postupak izravnog taloženja (LENS)¹⁶

FIGURE 10. Laser Engineering Net Shaping procedure

Taljenje s pomoću snopa elektrona / Electron Beam Melting - EBM¹⁷

EBM postupkom se prototip gradi sloj po sloj taljenjem sloja metalnog praha s pomoću snopa elektrona. Prototipovi se izrađuju izravno iz CAD podataka bez potrebe za naknadnom obradom očvršćivanja. To je tzv. beskalupno praobliskovanje. EBM postupak zbiva se u podtlačnoj komori (slika 11). Snop elektrona proizvodi se s pomoću posebne mlaznice, koja se učvršćuje u komori. Snop elektrona omogućuje se savijanje tako da je moguće dosegnuti svaki kutak komore. Elektroni se emitiraju iz punila koje je pri povišenoj temperaturi (oko 2 500 °C). Elektroni se zatim u električnom polju ubrzavaju na polovicu brzine svjetlosti, a snopom elektrona se upravlja s pomoću dva magnetska polja. Prvo polje djeluje kao magnetska leća. S pomoću njega se snop elektrona fokusira i postiže se željeni promjer snopa. Drugo polje služi za usmjeravanje snopa na željeno mjesto u komori. Pri sudaru elektrona s metalnim prahom, kinetička se energija sudara pretvara u toplinsku, koja lokalno tali metalni prah.



SLIKA 11. Postupak taljenja s pomoću elektrona (EBM)¹⁷

FIGURE 11. Electron Beam Melting procedure

Prednosti EBM postupka jesu: mogućnost postizanja visoke razine energije u malom snopu, pravljenje prototipa pri podtlaku, što rezultira vrlo dobrim mehaničkim svojstvima kalupnih elemenata, visoko podtlačna atmosfera jamči izostajanje oksida i nitrida na površini kalupnih elemenata.

Izradba kalupa naštrecavanjem metala / Spray Metal Tooling - SMT¹⁸

Pri izradbi kalupa naštrecavanjem metala najčešće se na prethodno načinjeni pramodel naštrecavanjem nanose legure cinka i aluminija s talištima raspona od 120 °C do 420 °C. Nanošenjem rastaljene legure na pramodel dobiva se sloj metala debljine 2 do 3 mm, čineći *ljusku* koja predstavlja oblik stijenke kalupne šupljine. Kako se tijekom postupka naštrecavanja nanose vrlo male čestice, prototip je gotovo bez napetosti, a kvaliteta površine je dobra. Postupak se primjenjuje za proizvodnju elemenata kalupnih šupljina koji imaju relativno glatku površinu i bez malih detalja. Kako bi se osiguralo točno nalijeganje ljuske u kalup, šupljina ljuske ispunjava se lijevanjem potpornja (najčešće epoksidne smole).

U kalupima načinjenim s pomoću tog postupka moguće je načiniti do 1 000 otpresaka, što ovisi o vrsti prerađivanog materijala i geometriji kalupne šupljine. Toplinska provodnost kalupa je bitno snižena u usporedbi s aluminijem ili čelikom, stoga ciklusi traju duže, a svojstva načinjenih otpresaka lošija su u usporedbi s otprescima načinjenim u klasičnim kalupima.

Temeljni je nedostatak tog postupka opasnost od otkidanja dijelova ljuske tijekom faze punjenja kalupne šupljine na kritičnim mjestima u kalupnoj šupljini te nemogućnost pravljenja finih detalja. Stoga se najčešće ti dijelovi izrađuju klasičnim postupcima. Temeljna je prednost postupka mogućnost brze proizvodnje većih kalupa.

Izbor optimalnog postupka brze proizvodnje tvorevina / Selection of optimal rapid production procedure

Na tržištu je trenutačno velik broj postupaka brze proizvodnje tvorevina, a trajno se razvijaju novi postupci. Svaki od postupaka ima određene prednosti, ali i nedostatke u usporedbi s ostalim postupcima. Stoga je pri izboru odgovarajućeg postupka potrebno voditi računa o nekoliko kriterija.¹⁹

Postoji mnogo čimbenika o kojima valja voditi računa pri izboru optimalnog postupka brze proizvodnje tvorevina. Moguće ih je podijeliti u četiri temeljne skupine:^{5,19}

- fizikalni i mehanički čimbenici
- parametri procesa proizvodnje prototipova
- mogućnost uporabe načinjenih prototipova (tablica 1)
- gospodarski kriteriji.

TABLICA 1. Mogućnosti primjene RP/RT postupaka pri razvoju i proizvodnji¹⁹

TABLE 1. Possibilities of application of RP/RT procedures in development and production

Vrsta modela <i>Model type</i>	Materijal <i>Material</i>	Postupak proizvodnje <i>Manufacturing procedure</i>	RP/RT postupak <i>RP/RT procedure</i>
Razmjerni	bilo koji	bilo koji	SLS, SLA, FDM...
Konstruktivski	sličan	bilo koji	SLS (PA), podtlačno lijevanje
Funkcijski	identičan	sličan	epoksidni kalupi
Predserija	identičan	identičan	SLS (metalni kalupi)

Fizikalni i mehanički čimbenici / Physical and mechanical factors

Potrebno je izabrati postupak koji omogućuje pravljenje prototipnih tvorevina koje zadovoljavaju postavljene zahtjeve na fizikalna i mehanička svojstva tvorevine. Najčešće su pri izboru pojedinog postupka ključna svojstva materijala od kojeg se pravi prototipna tvorevina.

U skupinu fizikalnih čimbenika ubraja se točnost i preciznost izmjera i oblika prototipne tvorevine, postojanost izmjera prototipnih tvorevina, toplinska svojstva prototipnih tvorevina, prozirnost itd.^{5,19}

Rabe li se prototipne tvorevine za potrebe funkcijskih ispitivanja, kao konačni proizvodi ili za potrebe brze proizvodnje kalupa, bitna su i mehanička svojstva prototipne tvorevine. Postupci brze proizvodnje tvorevina ponajprije se razlikuju na temelju postignute gustoće i čvrstoće prototipnih tvorevina ili drugih mehaničkih svojstava specifičnih za određenu namjenu prototipne tvorevine. Potreba za naknadnom obradom prototipne tvorevine također pripada skupini fizikalnih i mehaničkih čimbenika.^{5,19}

Od ostalih kriterija iz skupine fizikalnih i mehaničkih kriterija moguće je navesti postizivu tvrdoću prototipne tvorevine (prije i nakon toplinske obradbe), postizivu kvalitetu površine prototipne tvorevine te mogućnost oblikovanja detalja na prototipnoj tvorevini.^{5,19}

Utjecaj procesnih parametara / Processing parameters influence

Kao najvažniji čimbenik ove skupine kriterija izbora postupka brze proizvodnje tvorevina javlja se veličina prototipne tvorevine koju je moguće načiniti na određenoj opremi. Veličina prototipne tvorevine uglavnom ovisi o veličini radnog prostora uređaja za pravljenje tvorevine.¹⁹

Brzina postupka brze proizvodnje tvorevina jedan je od ključnih parametara koji se razmatraju pri izboru postupka, odnosno odgovarajuće opreme. Brzina postupka uglavnom ovisi o samoj fizici pravljenja tvorevine.^{5,19}

Potreba za potpornijama pri pravljenju prototipnih tvorevina sljedeći je kriterij na temelju kojega je moguće donijeti odgovarajuću odluku. Kada je riječ o primjeni materijala u kapljevitom stanju (npr. SLA postupak), tada je, ovisno o geometriji prototipne tvorevine, potrebno uporabiti potporanj. U slučaju kada se rabi materijal u praškastom stanju (npr. SLS postupak), prah koji okružuje načinjene slojeve prototipa ujedno služi za podupiranje prototipa te nije potreban potporanj. To je očita prednost tih postupaka pred postupcima s kapljevitim materijalima.^{1,19}

Neke od tehničkih karakteristika prema kojima se mogu uspoređivati postupci brze proizvodnje tvorevina jesu: kapacitet uređaja, utrošak energije, izmjere uređaja, minimalna debljina sloja, maksimalna debljina sloja, debljina stijenke modela, izmjere radnog prostora, utjecaj na okoliš itd.¹

Mogućnost uporabe prototipnih tvorevina / Prototype part application possibilities

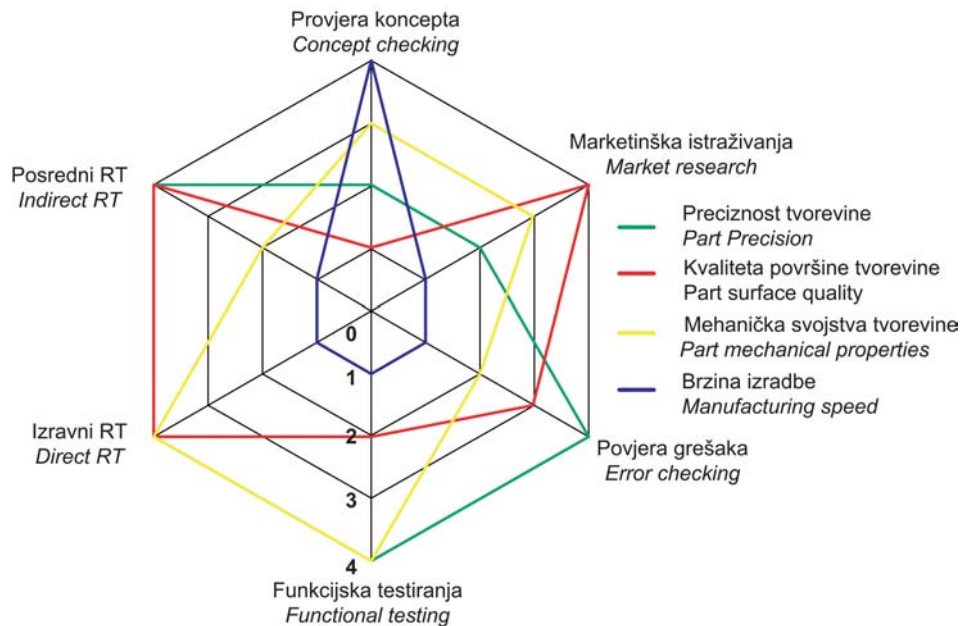
Mogućnost uporabe prototipnih tvorevina uglavnom je definirana vrstom uporabljenog materijala koji je moguće preraditi određenim postupkom. Radi li se o potrebi za pravljenjem konceptijskih prototipova bez posebnih zahtjeva, svakim od raspoloživih postupaka brze proizvodnje tvorevina moguće je načiniti zadovoljavajući prototip. Međutim, ako je potrebno izraditi funkcijske prototipove, materijal od kojih se izrađuju treba biti isti ili što je moguće sličniji materijalu stvarne tvorevine. Stoga prednost imaju postupci koji omogućuju preradbu što je moguće više vrsta materijala (primjerice SLS postupci). Kada je riječ o polimernim prototipovima, tada samo mali broj materijala (i postupaka) može zadovoljiti zahtjeve koji se postavljaju pred prototipne tvorevine koje se rabe za prototipne kalupe. Stoga na tom području prevladavaju postupci za pravljenje metalnih ili keramičkih prototipnih tvorevina.^{1,5,19}

Gospodarski kriteriji / Economic criteria

Pri izboru optimalnog postupka brze proizvodnje tvorevina, uz tehničke karakteristike, treba uzeti u obzir i ostale karakteristike koje utječu na cijenu i kvalitetu prototipova. Ponajprije to su nužnost stručnog nadzora tijekom pravljenja prototipne tvorevine, mogućnost automatiziranja postupka te pripreme i prijenosa podataka, vrijeme izobrazbe za rad na opremi, nužnost naknadne obradbe prototipnih tvorevina, troškovi opreme i njezina održavanja, troškovi prerađivanih materijala itd.^{5,19,20}

Stručnjaci s područja brze proizvodnje tvorevina također se zauzimaju za uvođenje određenih normi na temelju kojih bi potencijalni korisnici opreme mogli procijeniti prednosti uporabe određenog postupka u svom okružju. Odgovarajuće norme definirale bi uobičajene metode za mjerenje prednosti i ograničenja primjene odgovarajućeg postupka brze proizvodnje tvorevina, kao i praćenje prijenosa novih postupaka iz laboratorijskih uvjeta u proizvodno okružje.²¹

Slika 12 prikazuje primjer vrednovanja zahtjeva na postupke brze proizvodnje tvorevina.



SLIKA 12. Vrednovanje funkcija cilja pri brzjoj proizvodnji tvorevina²²
 FIGURE 12. Evaluation of objective function in rapid production

Zaključak / Conclusion

Postupci brze proizvodnje kalupa razvili su se kao odgovor na povećane zahtjeve tržišta kao što su: proizvesti što je moguće prije, proizvodnja prototipova za provjeru samog postupka preradbe (procesni prototipovi), proizvodnja prototipova od istog materijala kao i serijskog proizvoda, proizvodnja prototipova istim postupkom kao i serijskih proizvoda. Pri tome je na tržištu moguće naći nekoliko patentiranih postupaka koji omogućuju brzo pravljenje kvalitetnih kalupnih elemenata uz prihvatljive troškove. Najvažniji postupci ukratko su opisani u radu.

Zahvala / Acknowledgment

Rad je dio istraživanja u sklopu projekta *Povišenje učinkovitosti razvoja i preradbe polimernih proizvoda*, koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Autori zahvaljuju Ministarstvu na potpori tom projektu.

LITERATURA / LITERATURE

- Gebhardt, A.: *Rapid Prototyping*, Carl Hanser Verlag, München, 2003.
- Wollstadt, H.: *Schnell und gut zur Serie*, *Plastverarbeiter*, 49(1998)11, 42-44.
- Šantek, D.: *Podjela postupaka brze izradbe prototipova*, *Strojstvo*, 37(1995)5-6, 231-237.
- Raos, P., Čatić, I.: *Razvoj injekcijski prešanih polimernih tvorevina*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1991.
- Klocke, F., Freyer, C.: *Rapid Prototyping and Rapid Tooling*, Fraunhofer Institute of Production Technology IPT, www.ipt.fraunhofer.de, 2002.
- Castañeda, J. C.: *Prototype vs. Production Tooling in Rapid Product Development*, ANTEC 2000, Conference Proceedings, SPE, Orlando, 7. - 11. 5. 2000., 2974-2976.
- Norton, A.: *Utilising Rapid Product Development and Late Customisation Methodologies within Manufacturing SME-s*, www.primetechnology-watch.org.uk, 2004.
- Godec, D.: *Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska*, Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- Karapatis, N. P., van Griethuysen, J. P. S., Glardon, R.: *Direct rapid tooling: a review of current research*, *Rapid Prototyping Journal*, 4(1998)2, pp. 77-89.
- Saurkar, S., Malloy, R., McCarthy, S.: *Rapid tooling: a study of different cooling techniques for mold inserts used in direct AIM (Aces Injection Molding) process*, ANTEC '99, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2. - 6. 5. 1999., 1105-1108.
- Lenstraa, F. i ostali: *RP, RT, RM trends and development/research survey*, RAPTIA Thematic Network Report, www.RAPTIA.org, 2002.
- Dormal, T.: *OptoForm, a new process for rapid layer manufacturing based on paste*, *Rapid Prototyping & Tooling Industrial Application Newsletter*, Danish Technological Institute, Aarhus, No 4., 2000., 1-3.
- Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., Barlow, J.: *Direct selective laser sintering of metals*, *Rapid Prototyping Journal*, 1(1995)1, pp. 26-36.
- N. N.: *ProMetal Rapid Tooling System*, www.prometal-rt.com, 2003.
- Jacobson, D. M.: *Metal layer object manufacturing*, RAPTIA Thematic Network Report, www.RPATIA.org, 2004.
- www.optomec.com, 2004.
- Lindhe, U., Harrysson, O.: *Rapid Manufacturing with Electron Beam Melting (EBM) - A manufacturing revolution?*, www.cadmetal.org, 14. 10. 2004.
- Dormal, T.: *Rapid tools for injection moulding: State of the art*, www.raptia.org, 2002.
- Grimm, T.: *Stereolithography, Selective Laser Sintering and PolyJet: Evaluating and Applying the Right Technology*, www.atirapid.com, 2003.
- Koojijmans, B., Brouwers, L., Gunnink, J. W.: *A case study to compare Rapid Tooling Techniques*, *Rapid Prototyping & Tooling, Newsletter*, (2001)6, Danish Technological Institute
- Jurrens, K. K.: *Standards for the rapid prototyping industry*, *Rapid Prototyping Journal*, 5(1999)4, pp. 169-178.
- N. N.: *Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*, Prezentacija, CRIF-WTCM, 2002.

DOPISIVANJE / CONTACT

Dr. sc. Damir Godec
 Sveučilište u Zagrebu
 Fakultet strojarstva i brodogradnje
 Katedra za preradu polimera
 Ivana Lučića 5, 10002 Zagreb, Tel. +385-1-61-68-192
 damir.godec@fsb.hr