

Tehnologija laserskega sintranja za hitro izdelavo prototipov in orodij

Slavko Dolinšek

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana
Regionalni tehnološki center Zasavje (RTCZ), Grajska pot 10, 1430 Hrastnik

Laser sintering technology for rapid prototyping and rapid tooling

ABSTRACT

Not so long ago when science fiction factories of the future were presented as ships sailing from port to port, making products to order and delivering them directly to the customer's home at the desired time. With the latest development of the rapid prototyping process that operates on the basis of the composition of thin layers (layer manufacturing technology) ideas for building in such a way that real products were realized.

Today the laser sintering process is used for the sintering of three types of materials, plastic, metal and sand. Direct laser sintering of steel powders can be used for two main applications: direct laser sintering of tool inserts for injection moulding of plastics and casting of aluminium and direct production of steel components as final products. The paper presents some characteristics of the DMLS process and the possibilities to apply this technology to the Slovenian industry.

POVZETEK

Še ne dolgo so bile kot znanstvena fantastika predstavljene tovarne bodočnosti kot ladje, ki bi plule od pristanišča do pristanišča in po naročilu izdelovale izdelke ter jih dostavljale kupcem direktno na dom ob zelenem času. Z zadnjim razvojem postopkov hitre izdelave prototipov (**RP - Rapid Prototyping**) po principu sestavljanja posameznih tankih plasti materiala, pa so ideje, da bi na ta način izdelovali tudi realne izdelke, postale realnost.

Postopek laserskega sintranja se danes uporablja za sintranje treh vrst materialov: plastike, kovine in peska. **Neposredno sintranje kovinskih prahov** (DMLS) pa ima dve glavni uporabi: neposredno izdelavo orodij ali vložkov orodij za brizganje plastike ter tlačno litje barvnih kovin in neposredno izdelavo kovinskih izdelkov ali komponent. V prispevku so opisane nekatere karakteristike postopka DMLS pa tudi možnosti za uporabo te tehnologije v slovenski industriji.

1 Uvod

Za prehod iz virtualne oblike izdelka (CAD) na prototipni izdelek je danes na voljo kar nekaj najnovejših metod. Nove tehnologije so se pojavile po letu 1987, ko je 3D Systems predstavil postopek stereolitografije (SLA). V naslednjih petih letih je bilo razvitih kar nekaj konkurenčnih tehnologij, ki jih skupno imenujemo postopke za izdelavo trdnih poljubnih oblik (SFF - Solid Freeform Fabrication). Kot za vse nove tehnologije velja tudi za te, da so na začetku tako imenovane krivulje učenja. To pa pomeni, da je v njihovi fazi uvajanja potrebno še veliko raziskovalnega in razvojnega dela. SFF-postopke tudi v literaturi različno imenujejo: postopek izdelave delov po naročilu, postopek izdelave posamičnih delov, namizno proizvodnjo ali hitro prototipiranje (**RP - Rapid Prototyping**). Z razvojem laserskega sintranja kovinskih prahov se je uporaba RP močno razširila tudi na področje hitre izdelave orodij za brizganje in tlačno litje (**RT - Rapid Tooling**).

Tehnologije RP in RT so v zadnjem času napredovale po izdelovalni hitrosti in natančnosti izdelanih oblik prototipov, tako da lahko le-tega že uporabimo kot končni izdelek. V tem primeru postopek imenujemo hitra proizvodnja (**RM - Rapid Manufacturing**). Vendar so dandanes druge izdelovalne tehnologije (preobliko-

vanje, odrezavanje) še vedno konkurenčnejše. Zato je uporaba RM primerna le za maloserijsko izdelavo izdelkov kompliciranih oblik, dejstvo pa je, da se RM intenzivno razvija.

Vsi postopki: RP, RT in RM, omogočajo dve glavni prednosti: možnost skrajšanja časa dostopa na trg in pospešujejo proces razvoja izdelka. To pa so dejstva, ki so danes izrazitega pomena za vsako proizvodnjo, še bolj pa je to pomembno pri izdelavi orodij. Po tradicionalnih orodjarskih postopkih navadno izdelujejo predimenzionirana orodja, stroške za orodja pa je treba pokriti z velikimi serijami brizganih ali litih izdelkov. To pa je v nasprotju s tržnimi potrebami po manjšem številu enakih izdelkov in njihovi krajši trajnostni dobi, kar močno vpliva na razvoj orodij.

2 Potrebe po skrajšanju časa razvoja izdelkov

Najbolj pogost način, ki ga vodilni v podjetjih uporabljajo za izboljšanje konkurenčnosti, je znižanje stroškov proizvodnje. Vendar ima nižanje stroškov omejitve. Nekateri največji proizvajalci avtomobilov opozarjajo, da so z optimizacijo proizvodnje prišli do skrajnih meja in da je treba več navora vložiti v oblikovanje izdelkov (oblikovanje za proizvodnjo) in zmanjšanje števila sestavnih delov. Ko se zaradi procesa oblikovanja izdelkov povečujejo stroški kot posledica prevelikega števila delov ali zapletenih oblik (ki zahtevajo nove, drage ali dolgotrajne procese), potem še tako dobra proizvodnja ne more narediti veliko v smeri zmanjšanja stroškov. Tako danes govorimo o naslednji generaciji proizvodnje, ki jo oblikujejo trije kritični faktorji /1/:

- **kakovost**, ki je obvezna in pričakovana kot dejstvo. Prvi predpogoj za vključitev izdelka na trg je, da zadovolji pričakovanje kupcev, ki vključuje karakteristike izdelka, njegovo trajnostno dobo, ustrezno ceno in servisno podporo.
- **stroški** - Cena mora biti konkurenčna, temeljiti mora na pričakovani plačilni sposobnosti kupca, ne pa na proizvodnih stroških z dodatkom dobička. Danes je izredno težko dosegati stroškovno konkurenčnost, saj vsi uporabljajo podobne tehnologije, opremo in znanje.
- **čas** - Čeprav sta danes kakovost in cena že vseplošno uveljavljeni kategoriji, je čas vstopa na trg tisti, ki dejansko razlikuje in oblikuje konkurenčno prednost.

Izdelek je treba čim hitreje oblikovati, narediti in ga dostaviti kupcu pred konkurenco. Takšna strategija oblikuje tržni delež tam, kjer je največji finančni donos, v primeru visokih pričakovanj je možno postaviti visoke cene izdelkov in povrniti investicije. Skrajšanje časa razvoja izdelkov je zato eden od najpomembnejših dejavnikov, ki vpliva na stroške in prihodke podjetja in s tem na njegovo uspešnost na vse bolj konkurenčnih trgih. Vendar pa ni receptov za to, kako v največji meri izkoristiti te potenciale. Visoka učinkovitost razvojnih

procesov novih izdelkov pa je vsekakor eden od ključnih dejavnikov konkurenčnosti in trajnostnega razvoja. Postopki hitrega razvoja izdelkov (**RPD – Rapid Product Development**) lahko pomagajo, da se izognemo velikim težavam zaradi prepoznega vstopa na trg. To je še posebno pomembno v primerih, ko smo pod pritiskom zaradi stalnih spreminjanj izdelkov in kratkih rokov končanja /2/.

V preteklosti je bilo treba popisati kompletno geometrično obliko izdelka le za potrebe meritev in poskusov. Dandanes je uporaba tehnik za digitalizacijo oblike smiselna že v samem začetku razvoja izdelka. Digitalizacijske tehnike, kot so lasersko skeniranje ali računalniška tomografija, omogočajo izredne časovne prihranke, zato so že integrirane v obstoječe ali načrtovane razvojne procese. Moderni razvoj izdelka si je danes težko zamisliti brez virtualnih tehnik (virtualno prototipiranje – modeliranje), vendar še tako dobra programska oprema in izdelan virtualni model ne more nadomestiti realnega in funkcionalno razumljivega izdelka. Zatorej danes potrebujemo vzporedno tako virtualni kot fizični model, narejen na osnovi različnih tehnik prototipiranja /3/.

Osnovne izdelovalne faze vseh RP-tehnologij so sestavljene iz tridimenzionalnega modeliranja, prevajanje datotek v obliko, ki jo razume ustrezen RP-stroj za izdelavo fizičnega prototipa, preizkušanje in priprava modela za izdelavo na RP-stroju, izdelava tridimenzionalnega fizičnega modela po izbranem RP-postopku ter končna dodelava oziroma fina obdelava modela. Aplikacije, kjer lahko uporabljamo tehnike hitrega prototipiranja, so vse številnejše:

- izdelava konceptualnih modelov, na katerih lahko preizkusimo večino funkcij končnega izdelka
- za potrebe tržištv: izdelava večjega števila funkcionalnih modelov, ki se po svojem videzu ne razlikujejo bistveno od izdelka, za tržne analize in pridobivanje povratnih informacije kupcev

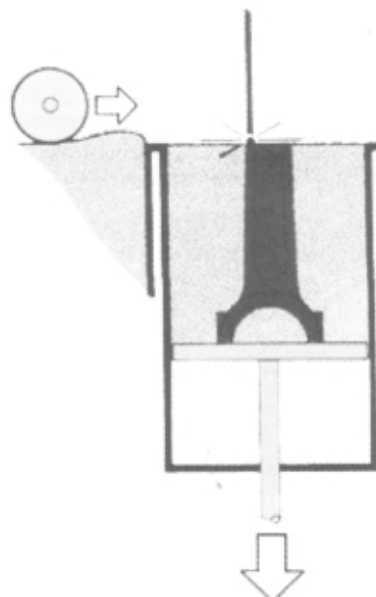
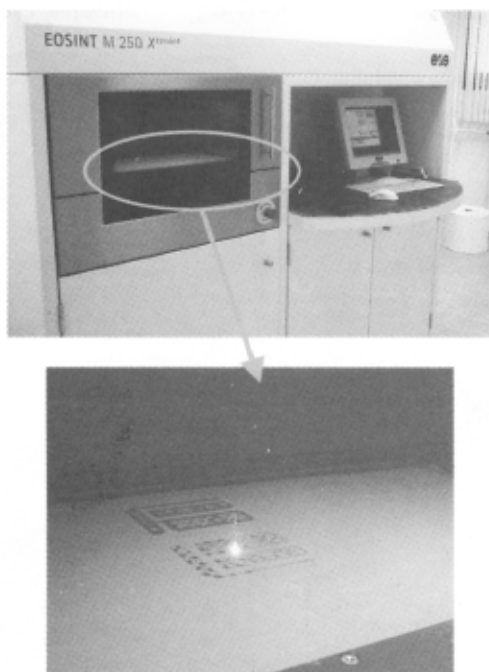
- za izdelavo manjših serij izdelkov, ki so uporabni v različnih procesih
- za izdelavo prototipnih orodij (brizganje različnih plastičnih mas in za tlačno litje Al in drugih barvnih kovin).

3 Neposredno lasersko sintranje kovinskih prahov (DMLS)

Poleg stereolitografije je lasersko sintranje drugi proces hitre izdelave prototipov, ki je postal komercialno uporaben v začetku devetdesetih let. Od tedaj se je veliko spremenilo tako na strani materialov kot v sami tehnologiji. Tako lasersko sintranje danes ni več le ekonomičen postopek za hitro izdelavo prototipov, ampak ima velik potencial tudi kot proizvodni proces /4/. Vse to je povezano s prednostmi, ki jih daje uporaba različnih materialov za sintranje, in to na eni sami izdelovalni enoti.

Pri laserskem sintranju (**LS – laser sintering**) laserski žarek strjuje praškasti material (vosek, najlon, kovina), ki se ga dodaja po plasteh (debelina 0,2 mm). Po vsakem prehodu po površini nanese plasti laserski žarek oblikuje dvodimenzionalno obliko, s premikanjem dvižne posode in ponovnim dodajanjem plasti materiala pa dosežemo tridimenzionalno obliko izdelka. Tridimenzionalni fizični model je tako zgrajen direktno iz konstrukcijskega modela izdelka, zato postopek imenujemo tudi **hitra izdelava prototipov (RP - Rapid Prototyping)**. S sintranjem kovinskih prahov pa lahko izdelujemo tudi vložke orodij za brizganje različnih materialov, v tem primeru postopek laserskega sintranja imenujemo tudi **hitra izdelava orodij (RT - Rapid Tooling)**.

Sedaj sta komercialno najbolj uspešna dva sistema. Podjetje DTM (od leta 2001 3D Systems) je razvilo sistem na osnovi pretaljevanja veziva, ki je kovinski prah. Vezivo zadržuje kovinski prah v zeleni obliki, s



Slika 1. Naprava EOSINT M 250 Extended in postopek laserskega sintranja kovinskih prahov

Tabela 1: Bistvene karakteristike sintranih delov iz različnih praškov /6/

	DM 50	DM 20	DS 50	DS 20
Dosegljiva natančnost izdelka (μm)	± 80	± 50	± 100	± 50
Minimalna debelina stene (mm)	0,7	0,6	0,9	0,7
Poroznost v izdelku (min. %)	20	8	5	2
Natezna trdnost (MPa)	200	400	500	600
Trdota (HB)	90	110	200	220
Hrapavost izdelane površine R_a (μm)	14	9	18	10
Hrapavost po peskanju R_a (μm)	5	3	7	4
Hrapavost po poliranju R_z (μm)	$< 1 \mu\text{m}$			
Koeficient toplotne razteznosti ($10^{-6}/\text{K}$)	25	18	18	9
Toplotna prevodnost pri 25 °C [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	15	25	25	13
Maksimalna delovna temperatura (°C)	400	400	800	800

kasnejšo termično obdelavo pa izžgemo vezivo in prah povežemo v trdni kovinski izdelek. Drug postopek, razvit pri EOS, pa se imenuje neposredno lasersko sintranje kovinskih praškov (**DMLS - Direct Metal Laser Sintering**). V tem primeru laser neposredno tali kovinski prah in s tem oblikuje izdelek ali vložek orodja, kasnejša termična obdelava ni potrebna. Naprava EOSINT M 250 Extended (slika 1), ki od septembra 2002 že deluje v okviru RTCZ, je iz zadnje generacije naprav nemškega proizvajalca EOS GmbH /5/.

Sedaj je možno uporabljati dva različna materiala, osnovi sta bron (DirectMetal) in jeklo (DirectSteel), granulacije pa 50 μm in 20 μm . Izbira praškov je odvisna od izdelovalnih zahtev orodij, s tem da vrsta prahu izrazito vpliva na ceno izdelka. Časa sintranja namreč ne določa le velikost izdelka, ampak tudi hitrosti sintranja (med 2 in 15 mm^3/s), ki pa je odvisna od kompleksnosti oblike izdelka in od granulacije prahu (pri finem prahu je debelina sintranega sloja 20 μm , pri grobem pa 50 μm). Nekatere bistvene karakteristike sintranih izdelkov so prikazane v tabeli 1/6/.

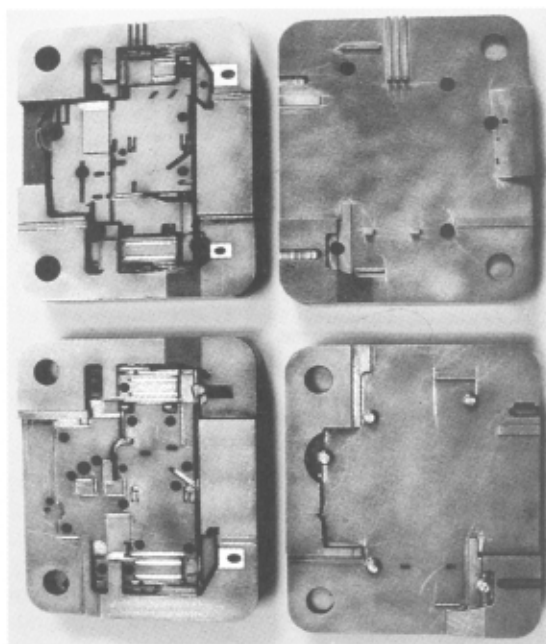
Izdelki, ki jih je možno izdelati s tem strojem, so lahko do velikosti 250 mm x 250 mm x 185 mm, zato je treba večja orodja izdelati po delih in jih kasneje sestaviti. Stroj neposredno uporablja model v .stl-formatu, narejen v katerem koli CAD-programu, ustrezna programska podpora pa ga pretvori v .sli-format. Model je tu razrezan na rezine za 2D-krmiljenje laserskega žarka. S tem ni potrebnega dodatnega NC programiranja strojev (znatni prihranki časa izdelave orodja).

Sintrana orodja, ki so izdelana s finejšim prahom, je možno uporabiti brez kasnejših obdelav, saj so odmiki manjši od 50 μm , hrapavost površine pa dosega $R_a = 10 \mu\text{m}$. V primeru zahtev po bolj gladki površini pa orodje še peskamo (utrditev površine in doseganje hrapavosti $R_a = 4 \mu\text{m}$) ali pa po peskanju tudi poliramo. Poliranje je vsekakor potrebno pri izdelavi orodja za brizganje duroplastov, saj mora biti zaradi večje adhezije površina bolj gladka ($R_a = 1 \mu\text{m}$). Takšna orodja so obstojna tudi do sto tisoč brizganj plastičnih izdelkov, vendar je obstojnost orodja odvisna od abrazivnih lastnosti brizganega materiala (npr. pri vsebnosti steklenih vlaken se obraba poveča na vogalih in površinah z večjimi pretoki taline). Za tlačno litje barvnih kovin so za sedaj sintrana orodja primerna za poskusna brizganja (približno do tisoč izdelkov).

Bistvene možnosti, ki jih omogoča postopek DMLS, je tudi možnost hitrega nadomeščanja obrabljenih delov orodja s sintranimi vložki (glede na to, da imamo celotno orodje že modelirano). V tem primeru obliko vložka izrežemo iz CAD-modela, posintramo in dodatno obdelamo. Takšno kombinirano orodje je po kakovosti enako ali boljše od osnovnega orodja, časi izdelave so bistveno krajši kot pri klasičnih orodjarskih postopkih. Obstojnost orodij pa se še znatno poveča, če jih prevlečemo s trdimi površinskimi nanosi, kot so TiAlN, CrN itd. /7/.

4 Praktični primeri izdelave oblikovnih vložkov orodij

Prostori RTCZ za hitro prototipiranje (naprava za lasersko sintranje kovinskih praškov) so poleg prostorov ETI-Orodjarne, Izlake. Najpomembnejši razlog pri odločitvi za to lokacijo je bil, da smo želeli združiti orodjarska znanja in potrebe obstoječe orodjarne, prvi projekti so bili tudi zato skupni. Na sliki 2 so prikazani oblikovni vložki za odklopnik ETIMAT 6 (podrobnejše v /8/).



Slika 2: Praktični primer oblikovnih vložkov za brizganje varovalk /8/

Vsi sintrani oblikovni vložki orodja so bili izdelani v pričakovanem roku, in sicer v štirih dneh, skupaj z izdelavo programa in pripravo stroja. Po klasičnem postopku so za primerljivi izdelek potrebovali 520 ur. Upoštevana je bila konstrukcija elektrod, izdelava elektrod in erodiranje. Cena izdelave sintranih oblikovnih vložkov (slika 2) je 5600 evrov, cena oblikovnih vložkov, izdelanih po klasičnem postopku, pa 11700 evrov.

Časovno in cenovno je v tem primeru izdelava oblikovnih vložkov po postopku DMLS popolnoma upravičena. Poleg dobrih lastnosti sintrancev pa je treba omeniti tudi slabosti. To je manjša obstojnost in trdnost orodja, predvsem pa večja hrapavost površin (hrapavost po peskanju $R_a = (3-4) \mu\text{m}$ v nekaterih primerih ne ustreza). Predvsem v ozkih in globokih utorih orodja je potrebna ročna ali strojna dodelava površin, saj tam lahko pričakujemo težave pri snemanju brizganih izdelkov iz orodij. Za izboljšanje kakovosti površine je predvidena tudi uporaba različnih površinskih nanosov (kemično nikljanje). S tem želimo povečati obstojnost orodij proti obrabi, hkrati pa zmanjšati hrapavost površin. Prve preizkuse s površinskimi zaščitami so že opravljeni, rezultati so spodbudni, vendar pa preskusi orodji še niso končani.

Podobna primerjava je narejena tudi za izdelavo **prototipnega orodja za AUDI** (natančneje v /9/). Prikazani podatki veljajo za dve orodji (slika 3). Po tehnološkem normiranju bi za izdelavo vložkov potrebovali za prvo orodje 458 ur, za drugo pa 492 ur, poleg tega pa še 250 ur za konstrukcijo delov in elektrod. Za obe orodji je to **1200 ur oziroma 30.000 evrov**. Isti deli so bili sintrani na dveh ploščah po **210 ur**, dodatno ročno delo in končna obdelava pa je bila **180 ur oziroma 22.860 evrov**.

Razlika v ceni ni izrazito velika, vendar je prevladala odločitev za sintrano varianto, saj je bila v tem primeru zaradi kratkih časovnih rokov za izdelavo orodij to edina možnost. Čas je posebno pri izdelavi prototipnih orodij pogosto pomembnejši argument kot pa stroški.

5 SKLEP

V mnogih podjetjih raziskave in razvoj še vedno obravnavajo kot podporni proces v celotni verigi dodajanja vrednosti. Ze večkrat ponavljana dejstva, ki izvirajo iz današnjih konkurenčnih okolij, pa so, da je uspeh na trgu odvisen od povezanih dejavnikov inovativnosti, kakovosti in časa vstopa na trg. To pa pomeni, da postaja inovativnost in hitrost razvoja izdelkov celo pomembnejša od učinkovitosti pri vsakodnevnih ope-

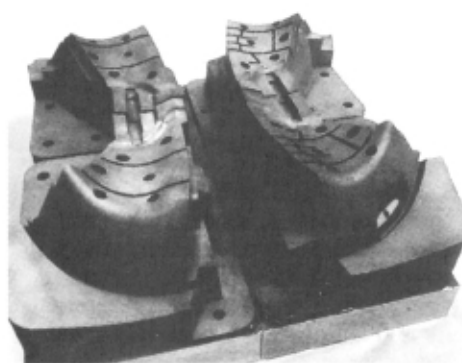
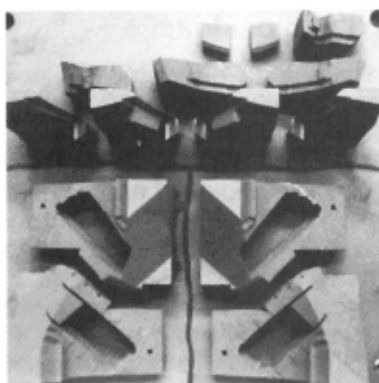
rativnih procesih v proizvodnji. To še posebno velja za podjetja, kjer se velik del stroškov pojavi v fazi razvoja, zato se vse več pozornosti namenja uspešnosti in učinkovitosti procesov raziskav in razvoja novih izdelkov.

Ministrstvo za gospodarstvo RS v enem od mehanizmov za spodbujanje konkurenčnosti in tehnološkega razvoja podpira tudi ustanavljanje tehnoloških centrov. Glede na to, da zasavska industrija v stopnji tehnološkega razvoja močno zaostaja za slovenskim povprečjem, je bil za podporo raziskovalno-razvojne dejavnosti zasavskim podjetjem leta 2001, skladno s pravilnikom o infrastrukturnih razvojnih centrih, ustanovljen tudi **Regionalni tehnološki center Zasavje – RTCZ**. Zato je v programu dela RTCZ kot najpomembnejši prednostni cilj postavljen v smeri ustvarjanja razmer za nastajanje tehnoloških inovacij in vpeljavo novih tehnologij v zasavsko industrijo.

V okviru teh aktivnosti je bila v septembru 2002 instalirana oprema za neposredno lasersko sintranje kovinskih prahov (DMLS), ki ni samo prva te vrste v Sloveniji, ampak tudi v prostoru pridruženih članic EU. Neposredno lasersko sintranje kovinskih prahov je danes že znan in osvojen postopek za hitro izdelavo kovinskih prototipov in orodij za brizganje plastičnih materialov v manjših serijah. Z razvojem novih kovinskih prahov in s tem izboljšane mehanske lastnosti sintranih izdelkov in z doseganjem večje oblikovne natančnosti pa se uporabnost postopka širi tudi na področje neposredne izdelave kompleksnih funkcionalnih prototipov in zahtevnih orodij za brizganje barvnih kovin.

6 Literatura

- /1/ J. A. Jordan, J. Michel: Next Generation Manufacturing, Methods and Techniques, John Wiley & Sons, 2000
- /2/ P. K. Wright: 21-st century Manufacturing, Prentice Hall, 2001
- /3/ S. Dolinšek: Pomen novih tehnologij za skrajšanje časov in stroškov razvoja izdelkov, prva strokovna konferenca RTCZ, Izlake, 2002
- /4/ S. Dolinšek: Uporaba novih tehnologij občutno skrajša čas do vstopa izdelka na trg: hitra izdelava prototipov in orodij. Pro-Teh (Trzin), 1 (2002) 2, 39-41.
- /5/ EOS, www.eos-gmbh.de
- /6/ S. Syrjala: DMLS for injection moulding and die casting applications, Proceedings of special EuroMold event, Frankfurt, 2002
- /7/ S. Dolinšek, D. Lamovšek, M. Dolinšek: Možnosti uporabe tehnologije DMLS za slovenske orodjarne, posvetovanje Orodjarstvo, Portorož, 2002
- /8/ M. Dolinšek: Neposredno lasersko sintranje kovin – predstavitve postopka in možnosti uporabe, prva strokovna konferenca RTCZ, Izlake, 2002
- /9/ J. Berlec: Nove tehnologije v orodjarstvu – stanje in potrebe slovenskih orodjarn, prva strokovna konferenca RTCZ, Izlake, 2002



Slika 3. Primer sintranih vložkov za orodje AUDI /9/