

Pregled tehnologije brizganja prašnatih materialov

Overview of the Powder Injection Moulding Technology

Boštjan Berginc - Karl Kuzman

V prispevku je narejen pregled tehnologije brizganja prahu. Opisane so postopkovne in oblikovne omejitve, konkurenčne tehnologije in tržne niše ter znane uporabe. Po tem postopku je mogoča izdelava zelo zapletenih izdelkov, mikro- in dvokomponentnih izdelkov, mogoča pa je tudi razširitev tehnologije na področje termopreoblikovanja in pihanja, kjer ta tehnologija ni tako uveljavljena. Predstavljene so mehanske lastnosti izdelkov in njihova odvisnost od parametrov postopka, kemične strukture delcev in nekaterih metalurških spremenljivk.

Prikazana je tudi stroškovna analiza tehnologije brizganja prahov in odrezovanja z velikimi hitrostmi, iz katere je razvidno področje uporabnosti posamezne tehnologije

Prispevek je namenjen predvsem načrtovalcem novih izdelkov, ki bodo v svoje delo vključevali tudi to tehnologijo in vsem tistim posameznikom in podjetjem, ki se s to tehnologijo še niso srečali.

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: brizganje prahu, pregledi tehnologij, omejitve, analize stroškov)

In this paper an overview of the powder injection moulding (PIM) process has been made. In the paper the process and shape restraints, alternative technologies, market niche and existing applications of the technology are described. Using PIM it is possible to produce highly complicated, micro and two-component parts. The mixtures used for PIM can also be used for thermoforming and blow moulding. In this paper are also presented the mechanical properties of the manufactured components and their dependence on the process parameters, chemical structure of powders and some metallurgic variables. Furthermore, the cost analysis comparison between the PIM and high speed cutting (HSC) is made.

This paper is meant for the designers of new parts, who would like to apply this technology and for certain individuals and companies who haven't come across this technology yet.

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: powder injection moulding, overview, restraints, cost analysis)

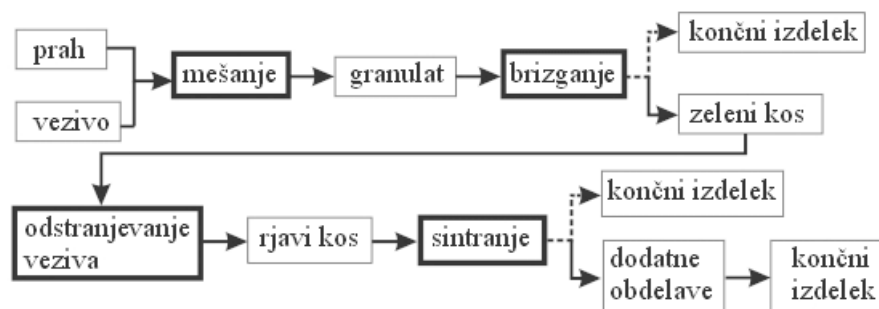
0 UVOD

V poplavi tehnologij, ki se pojavljajo na trgu, morajo biti podjetja oz. posamezniki previdni pri izbiri prave tehnologije za izdelavo določenega izdelka. Vsaka tehnologija ima svoje prednosti in seveda tudi pomanjkljivosti v primerjavi s konkurenčnimi tehnologijami. Tako so nekatere primernejše za manjše serije zahtevnih izdelkov, druge pa za velike serije manj zahtevnih izdelkov. Zgodovina tehnologije brizganja prahov sega v trideseta leta dvajsetega stoletja, ko je Schwartzwalder izdelal prve izdelke iz keramike po tehnologiji brizganja prahov ([1] in [2]). Zaradi patentov se je, do 90. let, razvijala

le počasi. Danes pa je to tehnologija, ki lahko na področju velikih serij, majhnih in zahtevnih izdelkov konkurira oz. prevladuje nad drugimi tehnologijami. Možnost predelave velikega števila materialov, možnost reproduciranja detajlov (Near Net Shape oz. Net Shape) in dobre mehanske lastnosti izdelkov so glavne prednosti te tehnologije.

1 TEHNOLOGIJA IN TEHNOLOGIČNOST

Postopek izdelave z brizganjem prašnatih materialov (BPM - angl. powder injection molding), je kombinacija tehnologij injekcijskega brizganja polimerov in stiskanja prahov. Pri tem postopku se



Sl. 1. Faze tehnologije brizganja prašnatih materialov

mešanico veziva in trdnih prašnatih delcev vbrizgne v kalupno votlino orodja. Mešanica zavzame obliko kalupnih votlin in po strditvi nastane "zeleni" kos z omejenimi mehanskimi lastnostmi, v nekaterih primerih pomeni to že končni izdelek (plastomagneti). Iz zelenega kosa se nato odstranjuje vezivo s postopki kemične in/ali toplotne obdelave. Pri tem nastane "rjavi" kos, ki vsebuje majhen delež veziva ($\gg 3\%$) in je zelo krhek. Rjavi kos se nato sintra v peči, kjer (pri)dobí končne izmere in mehanske lastnosti. Pri sintranju se pojavijo, na račun povečevanja gostote, veliki skrčki 15 do 25%, kar otežuje doseganje ozkih toleranc. Izdelek se po potrebi mehansko ali toplotno obdela. Na sliki 1 je prikazana celotna veriga postopka.

Z brizganjem prahov se lahko predeluje veliko materialov: jekla (nerjavno jeklo, hitorezno jeklo itn.), železove zlitine (Fe-Ni, Fe-Si, Fe-Mo), preostale zlitine (inconel, niobijeve, bakrove, volframove težke zlitine itn.), titan, zlato, nikelj, karbidne trdine, oksidi (Al_2O_3 , ZrO_2 , CeO_2 itn.), kermeti itn. ([1], [3] in [4]). Velikost keramičnih delcev je <1 mm, za kovine je značilna velikost delcev od 15 do 30 mm, za izdelavo magnetov pa se uporabljajo delci večji od 250 mm.

S tehnologijo brizganja prahov, se lahko izdelujejo mikro izdelki, dvokomponentni izdelki, mogoča pa je tudi izdelava s pihanjem in termopreoblikovanjem [5]. Sestavljanje izdelkov iz dveh materialov je mogoče že v orodju ali pa z združitvijo dveh zelenih kosov. Pri dvokomponentnih izdelkih je potrebno, da imata materiala približno enako toplotno razteznost, podobne zgoščevalne lastnosti med sintranjem, enako velikost in obliko delcev ter da izkazujejo dobre povezovalne lastnosti med delci. Poleg lastnosti prašnatih delcev pa so zelo pomembni tudi parametri postopka. Najpomembnejša je začetna faza sintranja, ko so vezi med delci šibke in se morajo zgoraj navedene lastnosti najbolj ujemati ([6] in [7]).

Dvokomponentni izdelek bi lahko bil izdelan iz magnetnega in nemagnetnega materiala ali pa bi bila površina izdelka iz obrabno odpornejšega, dražjega materiala, jedro pa iz cenejšega materiala ([1] in [8]).

Mehanske lastnosti izdelkov, izdelanih z brizganjem prahov, so v večini primerov enake oziroma zaradi možnosti nadzora mikrostrukture, celo boljše od mehanskih lastnosti izdelkov, narejenih iz surovcev. Mehanske lastnosti sintranih materialov so odvisne od poroznosti, vključkov, nečistoč, gostote po sintranju, velikosti zrn, oblike in velikosti por ter drugih metalurških spremenljivk ([3] in [9]). Na mehanske lastnosti in mikrostrukturo jekel in železovih zlitin močno vpliva tudi delež ogljika, ki nastane zaradi degradacije veziv pri sintranju [10]. Ker so mehanske lastnosti izdelkov, narejenih z brizganjem prahov, odvisne od številnih dejavnikov, prihaja do odstopanj. Zato je verjetnost porušitve materiala pri določeni obremenitvi podana z naslednjo enačbo:

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^M} \quad (1)$$

$P(\sigma)$ pomeni verjetnost porušitve pri obremenitvi σ , σ_0 je karakteristična trdnost materiala, M pa je Weibullov modul. Modul pomeni širino porazdelitve trdnosti, pri kateri lahko pride do porušitve. Večja vrednost modula pomeni ožjo porazdelitev, torej manjšo verjetnost, da bi do porušitve prišlo pri manjših obremenitvah od karakteristične. Vrednost modula se giblje od 8 do 14, z večjimi napori pa je mogoče doseči vrednosti od 20 do 25. V preglednici 1 so podani nekateri materiali, njihove lastnosti in Weibullov modul [3].

Za nerjavno jeklo 316L so značilne gostote po sintranju od 93 do 99,95 odstotkov teoretične gostote, v skladu s tem pa je meja plastičnosti od 170 do 345 MPa. Povprečna meja plastičnosti je 220 MPa, raztezek pa je od 18 do 81 odstotkov [3].

Preglednica 1. Mehanske lastnosti izdelkov, izdelanih z brizganjem prahov

Material	$\frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100$ %	R_M MPa	Weibullov modul
Al ₂ O ₃	98	385	9
SiC	98	400	10
WC-10Co	99,95	1410	12
ZrO ₂ -3Y ₂ O ₃	95	230	12

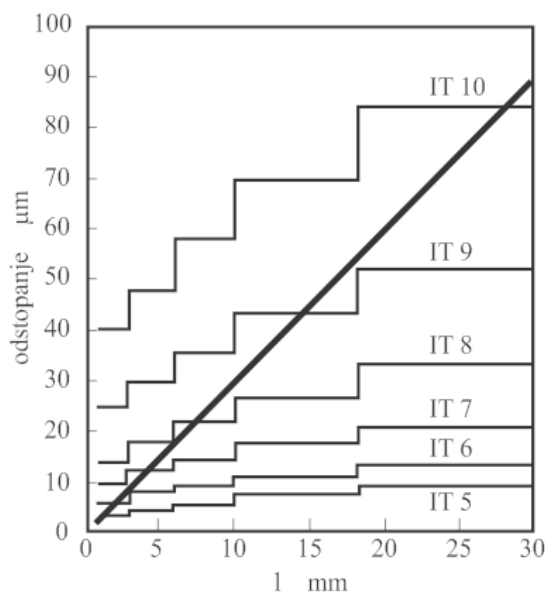
2 POSTOPKOVNE IN OBLIKOVNE OMEJITVE

Tako kakor vsaka tehnologija se tudi brizganje prašnatih materialov srečuje s postopkovnimi in oblikovnimi omejitvami. Čeprav je za izdelavo s tem postopkom na voljo veliko število materialov, jih obstaja nekaj, katerih predelava je otežena, če ne celo nemogoča. Spojinam, ki vsebujejo naslednje elemente, se je treba izogibati: berilij (strupen, hitro oksidira – mogoča

predelava), svinec in mangan (strupena in hitro hlapljiva), cink (hitro hlapljiv), natrij in tantal (reaktivna), magnezij (reaktiven in hitro oksidira), aluminij (hitro oksidira), oksidi indija in kositra (nestabilni med sintranjem). Nekateri elementi so škodljivi za zdravje, drugi pa so zaradi velike reaktivnosti in hitrega nastajanja oksidov neprimerni za sintranje ([3] in [11]). V preglednici 2 so prikazani splošni kriteriji za brizgane izdelke iz prašnatih materialov.

Preglednica 2. Splošni kriteriji za brizganje prašnatih materialov [3]

Lastnosti	Najmanjše	Največje	Tipične
debelina s (mm)	0,2	25	10
variacije v debelini stene	brez	100x	2x
dolžina l (mm)	2	1000	100
tolerance/odstopanje (%)	0,03	2,0	0,3
masa m (g)	0,02	20000	40
material	elementi	kompoziti	zlitine
proizvodnja (kos/leto)	200	20.000.000	150.000



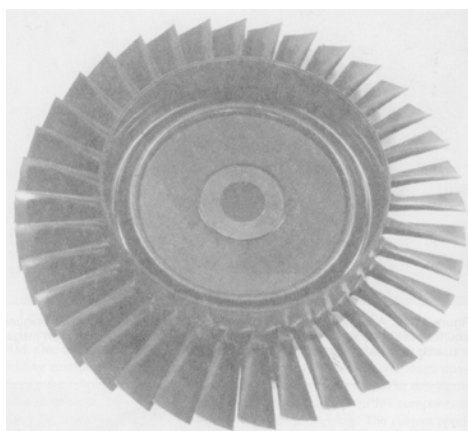
Sl. 2. Spreminjanje tolerančnega območja glede na velikost izdelka [12]

Izdelava zahtevnih in zapletenih izdelkov ob zmožnosti reproduciranja detajlov, je ena izmed glavnih prednosti te tehnologije, čeprav obstajajo tudi določene oblikovne omejitve. V veljavi je neko splošno pravilo, ki pravi, da če je izdelek mogoče izdelati s postopkom brizganja polimerov, potem je primeren tudi za izdelavo z brizganjem prašnatih materialov. V izdelku tako ne more biti zaprtih, votlih prostorov, v majhnih luknjah ne sme biti previsnih mest, najmanjši polmer na vogalih mora biti večji od 0,08 mm, najmanjša luknja ima premer 0,1 mm in na dolgih izdelkih je priporočljiva uporaba izmetalnih kotov (2°). Ostri prehodi so nezaželeni zaradi neenakomerne porazdelitve gostote, zaradi česar se pojavijo zvijanje, neenakomerno krčenje itn ([1] in [3]). Na izdelku pa so lahko previsna mesta, zunanji in notranji navoji (izdelava slednjih je priporočljiva s sekundarnim opravilom), globoke in ozke luknje, stranske luknje itn.

Na sliki 2 so prikazani odstopki v odvisnosti od velikosti izdelka. Do velikosti izdelka 3 mm je z brizganjem prahov mogoče doseči tolerančne vrste IT5 in IT6 (odstopki do 10 mm). S povečevanjem izdelka pa se premosorazmerno povečujejo tudi odstopki, ki so pri izmeri 25 mm 80 mm oz. spadajo v tolerančni razred IT10. Za izdelovanje velikih izdelkov (10 kg), se ta tehnologija uporablja le izjemoma. Težave, ki se pri tem pojavijo, so počasno odstranjevanje veziva in veliki odstopki zaradi krčenja.

3 TRG

Izdelki, izdelani s to tehnologijo, so konkurenčni predvsem na področju velikih serij in zahtevnejših oblik. Na tem področju je lastna cena, v primerjavi s konkurenčnimi tehnologijami, najnižja.



Poleg tega pa je izbira materialov zelo široka. Tako se lahko izbira med nerjavnimi jekli, orodnimi jekli, karbidnimi trdinami, kermeti, oksidi, zlitinami itn. Izdelki iz različnih vrst nerjavnih jekel in Fe zlitin zasedajo polovico trga, približno četrtno trga pa zavzemajo izdelki iz aluminijevega oksida (Al_2O_3) in kremenovega stekla SiO_2 ([3] in [13]). Ker trdota materiala ne vpliva na predelavo, se lahko izdelujejo izdelki z veliko odpornostjo proti obrabi.

Takšni primeri so: šobe za peskanje, pršilne in raketne šobe, okrovi ročnih ur, injektorji, rezalna orodja, svedri itn. [2]. Izdelki se lahko uporabljajo še v medicinske namene (bio-vsadki, kirurška orodja, ortodontski aparati), avtomobilski industriji (sestavni deli v motorju, deli za zračne blazine), računalništvu (deli trdih diskov), telekomunikacijah (spoji na optičnih kablji) itn.

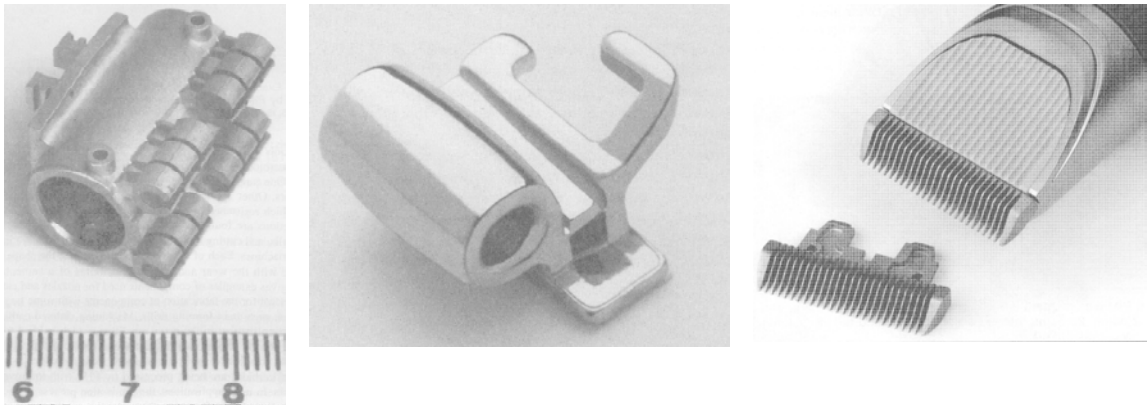
Za injekcijske igle, s katerimi se vbrizgavajo radioaktivni izotopi pri kemoterapiji, se izdelujejo okrovi iz volframovih zlitin. Izdelujejo se keramični vstavki, ki omogočajo izdelavo ultrazvočnih posnetkov arterij od znotraj.

S to tehnologijo se izdelujejo tudi kompoziti, utrjeni z vlakni oz. delci. Osnova kompozitov je kovinska oz. keramična matrica, v katero se doda ojačitve iz različnih karbidnih trdin (TiC , SiC) in keramike (Al_2O_3). Vlakna se usmerijo v smeri toka taline, kar povzroči anizotropne lastnosti, in v tej smeri izboljšajo mehanske lastnosti izdelka. Usmeritev vlaken je mogoča s pravilno postavitvijo ustja in konstrukcijo izdelka, pri tem pa je uporaba programov računalniško načrtovanje in inženirstvo obvezna ([3] in [14]).

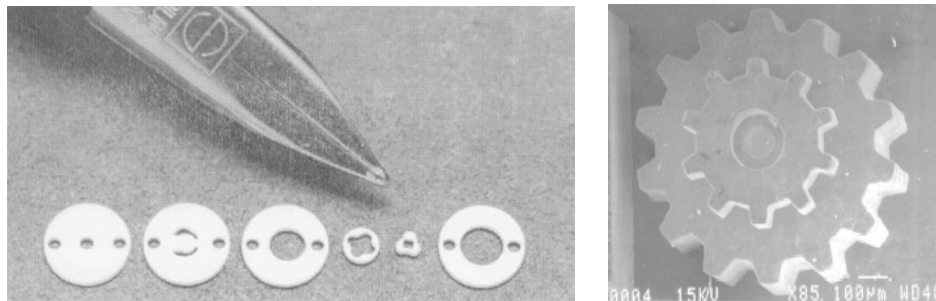
Tudi na področju mikro izdelkov se brizganje prahov kaže kot perspektivna tehnologija.



Sl. 3. Komponente plinske turbine avtomobilskega motorja iz SiC [3]



Sl. 4. Na sliki levo je sestavni del trdega diska, v sredini je nastavek za stalni ortodontski aparat, desno pa je rezilo brivnika [3]



Sl. 5. Na sliki levo so komponente mikročrpalke, na desni sliki pa je mikro zobnik

Mogoča je namreč izdelava izdelkov velikosti pod 100 μm , s tem da je najmanjša mogoča izmera 50 μm . Ti izdelki se uporabljajo predvsem v medicini, kemijski industriji, informatiki, komunikacijah, biotehnologiji, za mikrozaznavala in mikroizvršilnike itn. ([15] do [17]). Mogoča je tudi izdelava mikroizdelkov iz dveh komponent, kar bi se izkoristilo pri izdelavi mikromotorjev in pogonov [18]. Na sliki 5 so sestavni deli mikro črpalke in mikro zobnik, katerega najmanjši zob ima debelino 50 μm . Stranica kvadrata notranjega rotorja črpalke meri 390 μm , najmanjša debelina izdelkov je 80 μm , povprečna debelina pa 450 μm .

Uporaba materialov z veliko toplotno prevodnostjo in majhnim toplotnim raztezkom je zelo razširjena v mikroelektroniki, računalništvu in telekomunikacijah. Materiali kakor so volfram-baker, aluminijev nitrid in molibden-baker se težko obdelujejo v zapletene oblike s konkurenčnimi tehnologijami, zato so idealni materiali za BPM [3].

Izdelava magnetov, ki se magnetijo neposredno v orodju za brizganje, je pomembna tržna niša za tehnologijo brizganja prahov. Po tem postopku se izdelujejo feritni magneti [19], magneti iz materialov

redkih zemelj, iz zlitin NdFeB itn. Izdelujejo se tudi plastomagneti, ki vsebujejo 10 % veziva (PA oz. PPS) in 90 % magnetnih trdih delcev (NdFeB). Ti magneti predstavljajo končni izdelek že po brizganju in se ne sintrajo ([20] in [21]).

Mogoča je izdelava vsadkov iz biomaterialov kakršen je Ti-6Al-4V/HA. Hidroksiapatit (HA) je material, ki je združljiv s kostmi v človeškem telesu, vendar ima to pomanjkljivost, da je krhek. Z dodatkom titanove zlitine se mu mehanske lastnosti močno izboljšajo in je primeren za izdelavo vsadkov. Štirideset odstotna poroznost teh biokomponent omogoča pretakanje tekočin, ki so pomembne za življenje ([22] do [24]).

4 KONKURENČNE TEHNOLOGIJE

Konkurenčne tehnologije, s katerimi se lahko izdelujejo podobni izdelki kakor z brizganjem prašnatih materialov, so: tlačno litje, stiskanje prahov, mehanska obdelava z odrezovanjem, litje v formo s staljivim jedrom in izostatsko stiskanje. Na sliki 6 je prikazana konkurenčnost tehnologije brizganja prahov glede na obseg proizvodnje in



Sl. 6. Položaj tehnologije brizganja prahov, glede na konkurenčne tehnologije [3]

zahtevnost izdelka v primerjavi s preostalimi tehnologijami.

Ta shema je zelo splošna, saj se zahteve razlikujejo od izdelka do izdelka, vendar daje nek splošen pregled področij, na katerih prevladuje posamezna tehnologija. Tehnologije brizganja prahu ni priporočljivo uporabljati za manj zapletene izdelke v velikih serijah, saj na tem področju prevladujeta stiskanje prahov in tlačni liv. Lahko pa se uporablja za manjše serije (200 kos), zelo zapletenih izdelkov iz keramičnih materialov.

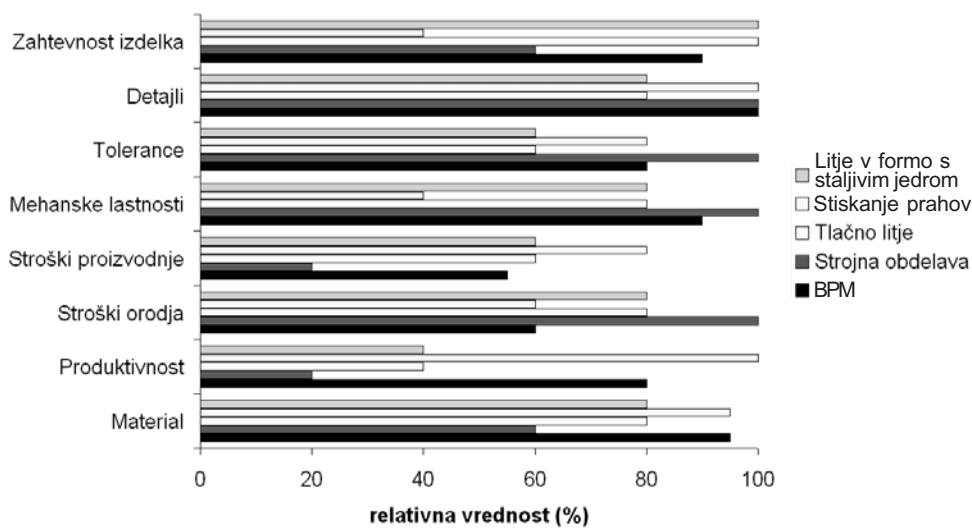
Na sliki 7 je narejena primerjava med določenimi lastnostmi teh tehnologij. Iz diagrama je razvidno, da je pomanjkljivost tehnologije brizganja prahov v velikih stroških orodja in proizvodnje, prednost pa je velika izbira materialov, dobre mehanske lastnosti, zahtevnost izdelka in izdelava detajlov. Izdelujejo se lahko detajli velikosti 50 do

100 mm, saj majhne velikosti delcev prahu zapolnijo celotno kalupno votlino v orodju.

V primerjavi s stiskanjem prahov se pri brizganju prašnatih materialov v večini primerov dosega večje končne gostote in s tem boljše mehanske lastnosti. Pri stiskanju je gostota pogosto okoli 85%, pri brizganju prahov pa nad 94% teoretične gostote. Neenakomerna porazdelitev gostote je pri stiskanju prahov pogost pojav, posebej pri visokih izdelkih. Posledica tega je neenakomerno krčenje pri sintranju, zato se ti izdelki sintrajo pri nižjih temperaturah, pri katerih je krčenje manjše in s tem tudi manjša končna gostota ([1] in [12]).

Tlačno litje je tehnologija za izdelavo zahtevnih izdelkov v velikih serijah iz zlitin z nizkim tališčem – Mg, Al, Zn itn. Pomanjkljivosti pa so omejeno število uporabnih materialov, sekundarna opravila in draga orodja ter njihovo vzdrževanje.

Primerjava med PIM in konkurenčnimi tehnologijami



Sl. 7. Primerjava med brizganjem prahov in konkurenčnimi tehnologijami ([1], [3] in [12])

Litje v formo s staljivim jedrom je stara tehnologija za izdelavo zapletenih izdelkov v serijah do 40000 kosov. Pomanjkljivosti so slaba kakovost površine, veliko ročnega dela, tehnologija je primerna samo za taljive materiale.

Mehanska obdelava z odrezovanjem je uveljavljen postopek in primeren tako za zahtevne kakor za manj zahtevne izdelke v manjših serijah. Pomanjkljivosti so: izmet od 30 do 60%, za obdelavo primerni le določeni materiali, majhne serije (do največ 8000 kosov) [12].

5 STROŠKOVNA PRIMERJAVA MED BRIZGANJEM PRAŠNATIH MATERIALOV IN ODREZOVANJEM Z VELIKIMI HITROSTMI

Pri tej analizi je narejena primerjava med dvema konkurenčnima tehnologijama. Stroškovna analiza je narejena za serije od 100 do 300.000 kosov. Po obeh tehnologijah se je izdeloval izdelek, ki je prikazan na sliki 8. Vsi izračuni, enačbe, diagrami in komentarji so podrobneje opisani v [25]. Simulacija odrezovanja je narejena s programom HyperMill. Stroški orodij in strojne ure so bili določeni na podlagi povpraševanj med tujimi in slovenskimi podjetji. Čas brizganja je bil določen na podlagi praktičnih preizkusov. V ceni strojne ure je upoštevana bruto plača delavca, amortizacija stroja (dve izmeni, pet let – 4000 h), energijski stroški in stroški porabe materialov (plini). Niso pa bili upoštevani stroški režije, ki bi bili v obeh primerih enaki, tako da ne vplivajo na natančnost rezultatov.

Pri analizi nismo upoštevali določenih dejavnikov, ki tudi vplivajo na lastno ceno. Ta dva dejavnika sta hrapavost površine in tolerance. Dejavnika imata v praksi velik pomen, za splošno primerjavo stroškov med tema dvema tehnologijama pa ju ni bilo treba upoštevati.

5.1 Stroškovna analiza injekcijskega brizganja prahu

Pri tej tehnologiji na lastno ceno izdelka najbolj vplivajo stroški materiala, orodja in mešanja, saj v nekaterih primerih presežejo 70 % lastne cene. Preostali stroški so še stroški brizganja, sintranja in odstranjevanja veziva. Za ta primer je bil uporabljen material Catamold FeSi₃ podjetja BASF, ki je v obliki granulata, tako da so stroški priprave materiala že všteti v ceno materiala. Trdota materiala je 120 do 160 HV, gostota 7,5 g/cm³, velikost izdelka pa je 56×17,6×4.

Skupni stroški na izdelek so tako:

$$C_{MIM} = C_{OBk} + C_B + C_{OV} + C_S + C_{M1} \quad (2),$$

kjer so:

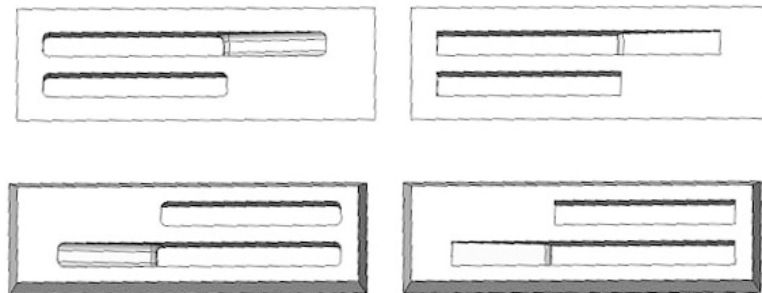
- C_{OBk} – stroški orodja za brizganje na kos,
- C_B – stroški brizganja,
- C_{OV} – stroški odstranjevanja veziva,
- C_S – stroški sintranja,
- C_{M1} – cena materiala.

Stroški orodja

Orodja za brizganje se po navadi amortizirajo glede na število brizgalnih ponovitev, ki pomenijo dobo trajanja orodja. Za to orodje smo, zaradi abrazivnosti brizgane mešanice, predvidevali, da je doba trajanja okoli 300.000 ponovitev, tj. 600.000 kosov. Po tem času bi bila potrebna obnova orodja. Orodje je dvognezdno, cena po ponudbi je 4500 €.

Stroški brizganja

Strojna ura brizganja na stroju s silo zapiranja 600 kN je v Evropi 10 €/h. Na stroške brizganja vplivajo strojna ura brizganja, čas, število kalupnih votlin v orodju, material izdelka, izdelek itn.



Sl. 8. Levo je model izdelka za odrezovanje z velikimi hitrostmi, desno za brizganje prašnatih materialov

V strojni uri brizganja pa so zajeti nespremenljivi stroški amortizacije in spremenljivi stroški električne energije, vode, vzdrževanje itn.

Stroški odstranjevanja veziva

Izbrana peč za odstranjevanje veziva ima zmogljivost 100 l, kar je enako 1860 kosov. Postopek odstranjevanja veziva poteka pri 110 °C z dušikovo kislino $\text{HNO}_3 > 98\%$. Tehnični čas odstranjevanja veziva je 2,5 h, čas ročnega dela je 1h, čas segrevanja in ohlajanja pa 1h. Skupni čas odstranjevanja veziva za ta izdelek je tako 4,5 h. Cena strojnega dela za ponovitev v peči velikosti 100 l je 20 €/h. Cena dušikove kisline je 21 €/liter, cena dušika je 1 €/m³, cena peči za odstranjevanje je 120000 €.

Peč z prostornino 100 litrov je bila izbrana tudi zato, ker je čas odstranjevanja približno trikrat krajši od časa sintranja. Zato je bila za sintranje izbrana peč s prostornino 300 l, v kateri se lahko naenkrat sintra 5600 izdelkov.

Stroški sintranja

Sintranje FeSi_3 poteka v zaščitni atmosferi vodika čistosti 99,998% in s točko rosišča pri temperaturi nižji od -40 °C. Skupni čas sintranja je 18 h, strojna ura pa je 30 €/h. Stroški vodika so 2 €/m³, cena 300 litrske peči pa je okoli 300.000 €.

Stroški materiala

Cena granulata Catamold FeSi_3 podjetja BASF je 20 €/kg. Masa izdelka je 19 g. Izvirnemu materialu se lahko dodaja reciklat, ki pa bistveno ne vpliva na ceno. Cena materiala je 0,38 €/kos.

V preglednici 3 so predstavljene cene za injekcijsko brizganje kovinskega prahu za različne serije. Vidi se, da se cena z naraščanjem serije

znižuje, kar je pričakovano. Razvidno je tudi, da je pri večjih serijah vpliv cene materiala na lastno ceno največji.

5.2 Izračun stroškov izdelave pri rezkanju z velikimi hitrostmi (RVH)

Na začetku je treba poudariti, da z rezkanjem RVH ni mogoče do potankosti izdelati tega izdelka zaradi ostrih robov. Zato je bilo treba rahlo spremeniti konstrukcijo izdelka, kar se v praksi velikokrat izvaja (sl. 8). Konstrukcijo izdelka je namreč treba prilagoditi tehnologiji, s katero se bo ta izdelek izdeloval.

Pri odrezovanju je skupni strošek na izdelek enak:

$$C_{VHO} = C_1 + C_2 + C_3 + C_{M2} \quad (3),$$

kjer so:

C_{VHO} – skupni stroški obdelave na kos,

C_1 – nespremenjeni stroški obdelave,

C_2 – stroški obdelave,

C_3 – stroški menjavanja orodja,

C_{M2} – stroški materiala.

Nespremenjeni stroški odrezovanja:

So stroški priprave in konca obdelave (vpenjanje obdelovancev, pisanje programov) in režijsko stroški za serijo ter stroški, nastali zaradi napak v postopku. Zadnja dva dejavnika v preračunih nista bila upoštevana.

Stroški materiala

Izdelki se bodo izdelovali iz surovca velikosti 64×26×8 mm. Podatki o ceni razrezanih surovcev so zaradi težav pri dostopu do podatkov

Preglednica 3. Skupna cena glede na serije

Št. izdelkov kos	Stroški odstranjevanja €/kos	Stroški sintranja €/kos	Stroški orodja in brizganja €/kos	Material €/kos	Skupaj	
					€/kos	SIT/kos
10	8,85	53,1	521,8	0,374	594,05	139601
100	0,885	5,31	52,19	0,374	59,76	14044
1000	0,088	0,531	5,23	0,374	6,33	1488,5
10000	0,047	0,094	0,538	0,374	1,07	252,0
50000	0,047	0,094	0,12	0,374	0,65	152,2
300000	0,047	0,094	0,033	0,374	0,46	109,0

približni in so ocenjeni na okoli 3 €/kg. Stroški materiala za kos so tako: $C_{M2} = 0,3 \text{ €/kos}$.

Stroški obdelave

Za določitev stroškov odrezovanja je bilo najprej treba določiti tehnološke čase posamezne stopnje odrezovanja. Pri simulaciji odrezovanja smo uporabili dva rezkarja z ravnim rezalnim delom s premeroma 10 in 2 mm ter dva rezkarja z zaokroženim rezalnim delom s premeroma 10 in 1 mm. Osnovni material oz. podlaga orodja je karbidna trdina s prevleko. Parametri in časi odrezovanja so podani v preglednici 4. Pri določevanju parametrov smo se opirali na praktične izkušnje in posvetovanja s strokovnjaki iz prakse ter na katalog orodij.

Za določitev stroškov odrezovanja je treba upoštevati tudi obrabo orodja med obdelavo. Čas obstojnosti smo na podlagi praktičnih izkušenj in posvetovanja zaradi poenostavitve izbrali za vsa orodja enak 150 min. Podatki v katalogu se nanašajo na točno določen material obdelovanca in orodja, na določene parametre obdelave in na določen stroj. V praksi pa se velikokrat določa obstojnost orodja s preizkusi.

Cena strojne ure rezkanja z veliko hitrostjo je 17 €/h, ob upoštevanju, da je cena stroja okoli 200.000€. V tej ceni so všteti stroški amortizacije stroja, plača delavca, poraba električne energije itn. Pripravljalno-zaključni čas je določen na 2 uri.

5.3 Razlaga rezultatov

Rezultati analize so prikazani na sliki 9. Razvidno je, da so stroški izdelave z brizganjem pri majhnih serijah zelo veliki. To je predvsem posledica dragega orodja. Nasprotno so stroški izdelave z rezkanjem z velikimi hitrostmi, pri majhnih serijah razmeroma majhni in se z naraščanjem števila kosov rahlo manjšajo. Pri vrednosti 2000 do 3000 kosov je lastna cena izdelka za obe tehnologiji približno enaka. Na lastno ceno izdelka, izdelanega z odrezovanjem, zelo vpliva čas obstojnosti orodja. Obstojnost orodja v tem primeru ni bila določena na podlagi praktičnih preizkusov, kar bi bilo za natančnejšo določitev vsekakor potrebno. Pri večjih količinah pa je lastna cena izdelka, izdelanega po tehnologiji brizganja prahov, veliko manjša. Teh rezultatov se ne sme posploševati na vse izdelke, saj je vsak izdelek zgodba zase. Rezultati se ujemajo tudi z diagramom na sliki 6, kjer je prikazano, da je mehanska obdelava primerna za manjše serije do 10.000 kosov.

6 SKLEP

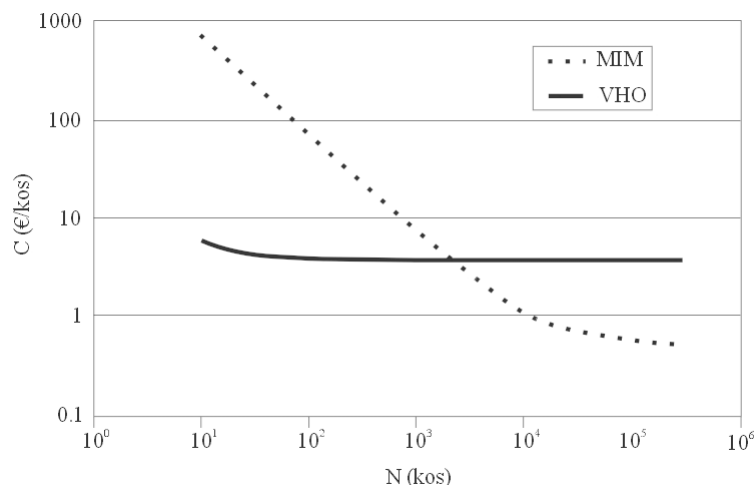
Tehnologija brizganja prašnatih materialov je najbolj razširjena v Severni Ameriki, Azija in Evropa pa zaostajata. V Sloveniji je tehnologija v takšni ali drugačni obliki že opazna, vendar še zdaleč niso izkoriščene vse zmogljivosti. Uporabnost tehnologije

Preglednica 4. Časi in parametri obdelave pri RVH

	Obdelava	d mm	f _z mm/zob	n vrt/min	a _p mm	f mm/min	t _{mo} s	t _t min
1	grobno rezkanje	10	0,046	6400	2	1200	3	1:26
2	grobno rezkanje	2	0,01	30000	0,5	900	3	0:57
3	profiliranje	10	0,1	6400	/	3000	3	2:28
4	profiliranje	1	0,01	30000	/	1300	3	0:25
5	grobno rezkanje	10	0,046	6400	2	1200	3	0:58
6	profiliranje	1	0,01	30000	/	1300	3	0:25

Preglednica 5. Stroški odrezovanja za serijo 1000 kosov

Serijski kos	Nespremenjeni stroški €/kos	Stroški obdelave €/kos	Stroški orodja 1 φ10 r. €/kos	Stroški orodja 2 φ2 r. €/kos	Stroški orodja 3 φ1 k. €/kos	Stroški orodja 4 φ10 k. €/kos	Stroški materiala €/kos	Lastna cena €/kos	Lastna cena SIT/kos
1000	0,024	1,88	0,680	0,098	0,162	0,669	0,299	3,814	896



Sl. 9. Primerjava lastne cene izdelka glede na serijo za MIM in VHO

je omejena predvsem na izdelavo majhnih in zapletenih izdelkov v velikih serijah.

V primerjavi med tehnologijo brizganja prašnatih materialov in obdelavo z velikimi hitrostmi, se je pokazalo, da vsaka tehnologija zaseda svoje področje. Obstajajo pa tudi izjeme, ki jih v neke

splošne sheme in diagrame ni mogoče uvrstiti, ker cena ne igra glavne vloge.

Ob vse večji konkurenci azijskih držav se je tudi v Sloveniji treba zavedati, da je vpeljava novih, inovativnih tehnologij nujna. Zato je želja avtorjev, da se ta tehnologija uveljavi v slovenskih podjetjih.

7 LITERATURA

- [1] German, R.M. (1990) Powder injection molding, *Metal Powder Industries Federation*, New Jersey.
- [2] German, R.M. (1999) Wear applications offer further growth for PIM, *Metal Powd Rep*, Vol. 54, Issue 6, June 1999, 24-28.
- [3] German, R.M., A. Bose (1997) Injection molding of metals and ceramics, *Metal Powder Industries Federation*, New Jersey.
- [4] Maca, K., M. Trunec, J. Cihlar (2002) Injection moulding and sintering of ceria ceramics, *Ceramics International*, Vol. 28, Issue 3, 337-344.
- [5] Evans, J.R.G., J. Greener (1999) Elongational flow processing of ceramics, *J Mater Proces Technol*, Vol. 96, Issues 1-3, Nov. 1999, 143-150.
- [6] Heaney, D.F., P. Suri, R.M. German (2003) Defect-free sintering of two material powder injection molded components – Part 1: Experimental investigations, *J Mater Scien*, Vol. 38, Issue 24, Dec. 2003, 4869-4874.
- [7] Suri, P., D.F. Heaney, R.M. German (2003) Defect-free sintering of two material powder injection molded components – Part 2: Model, *J Mater Scien*, Vol. 38, Issue 24, Dec 2003, 4875-4881.
- [8] Tan, L.-K., R. Baumgartner, R. M. German (2001) Powder injection molding of bi-metal components, *International Congress on Powder Metallurgy*, New Orleans, May 2001.
- [9] Sung, H.J., T.K. Ha, S. Ahn, Y.W. Chang (2002) Powder injection molding of a 17-4 PH stainless steel and the effect of sintering temperature on its microstructure and mechanical properties, *J Mater Proces Technol*, Vol. 130-131, Dec. 2002, 321-327.
- [10] Wu, Y., R.M. German, D. Blaine, B. Marx, C. Schlaefel (2002) Effects of residual carbon content on sintering shrinkage, microstructure and mechanical properties of injection molded 17-4 PH stainless steel, *J Mater Scien*, Vol. 37, Issue 17, Sep. 2002, 3573-3583.
- [11] www.morganadvancedceramics.com;
- [12] Berginc, B. (2003) Brizganje kovinskega in nekovinskega prahu, *Diplomska naloga univerzitetnega študija*, Ljubljana.

- [13] Cornwall, R.G., R. M. German (2001) An analysis of the powder injection molding industry global market, *International Congress on Powder Metallurgy*, New Orleans, May 2001.
- [14] Loh, N.H., S.B. Tor, K.A. Khor (2001) Production, of metal matrix composite part by powder injection molding, *J Mater Proces Technol*, Vol. 108, Issue 3, Jan. 2001, 398-407.
- [15] Liu, Z.Y., N. H. Loh, S. B. Tor, K.A. Khor, Y. Murakoshi, R. Maeda, T. Shimizu (2002) Micro-powder injection molding, *J Mater Proces Technol*, Vol. 127, Issue 2, Sep. 2002, 165-168.
- [16] Gietzelt, T., V. Piottter, R. Ruprecht, J. Hausselt (2002) Manufacturing of isolated ceramic microstructures, *Microsystem Technologies*, Vol. 9, Num. 1-2.
- [17] Merz, L., S. Rath, V. Piottter, R. Ruprecht, J. Hausselt (2004) Powder injection molding of metallic and ceramic microparts, *Microsystem Technologies*, Vol. 10, Num. 3.
- [18] Rota, A.C. New features in material issues for metallic micro components by MIM, *Fraunhofer Institute for Manufacturing and Advanced Materials (IFAM)*, Bremen, Germany.
- [19] Lee, S.H., W.Y. Jeung (2001) Anisotropic injection molding of strontium ferrite powder using PP/PEG binder system, *J Magnetism and Magnetic Mater*, Vol. 226-230, Part 2, May 2001, 1400-1402.
- [20] Šuštaršič, B., S. Kobe, B. Saje (1999) Izdelava plastomagnetov NdFeB z injekcijskim brizganjem, *Kovine, zlitine, tehnologije*, Vol. 33, Dec. 1999, 117-124.
- [21] Ma, B.M., J.W. Herchenroeder, B. Smith, M. Suda, D.N. Brown, Z. Chen (2002) Recent development in bonded NdFeB magnets, *J Magnetism and Magnetic Mater*, Vol. 239, Issues 1-3, Feb. 2002, 418-423.
- [22] Thian, E.S., N.H. Loh, K.A. Khor, S.B. Tor (2002) Microstructures and mechanical properties of powder injection molded Ti-6Al-4V/HA powder, *Biomaterials*, Vol. 23, Issue 14, Jul. 2002, 2927-2938.
- [23] Thian, E.S., N.H. Loh, K.A. Khor, S.B. Tor (2001) Effects of debinding parameters on powder injection molded Ti-6Al-4V/HA composite parts, *Advanced Powder Technologies*, Vol 12, Sep. 2001 361-370.
- [24] Thian, E.S., N.H. Loh, K.A. Khor, S.B. Tor (2002) Ti-6Al-4V/HA composite feedstock for injection molding, *Material Letters*, Vol. 56, Oct. 2002, 522-532.
- [25] Berginc, B. (2004) Optimiranje obdelovalnih tehnologij, Podiplomski seminar, mentor dr. prof. J. Kopač.

Naslov avtorjev: Boštjan Berginc
prof.dr. Karl Kuzman
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
bostjan.berginc@fs.uni-lj.si
karl.kuzman@fs.uni-lj.si

Prejeto: 14.7.2004
Received:

Sprejeto: 24.2.2005
Accepted:

Odperto za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year