

# Hibridna izdelava s postopkom ciljnega nalaganja taljenega polimera in frezanja:

## I. del – Optimizacija tehnoloških parametrov hibridne izdelave ob uporabi standardne ekstrudorske šobe

Damir GRGURAŠ, Davorin KRAMAR, David HOMAR, Janez KOPAČ

**Izvleček:** Izdelke zelo kompleksnih geometrij je včasih težko izdelati na konvencionalen način z odrezavanjem. Kot veliko lažji in cenovno ugodnejši način izdelave se vse več uporablja aditivna tehnologija oziroma tehnologija dodajanja materiala po plasteh. Pri tehnologiji dodajanja materiala po plasteh je glavna pomanjkljivost slabša kakovost zunanje površine, ki pa jo lahko naknadno izboljšamo z odrezavanjem. V tem primeru govorimo o hibridni izdelavi, ki je predstavljena v tem dvodelnem prispevku. S postopkom ciljnega nalaganja taljenega polimera je izdelan vzorčni izdelek, ki mu je s postopkom obodnega frezanja izboljšana hrapavost zunanje površine. I. del prispevka zajema optimizacijo tehnoloških parametrov omenjene hibridne izdelave ob uporabi standardne ekstrudorske šobe (premer  $D = 0.4$  mm) za ciljno nalaganje taljenega polimera. II. del prispevka (v naslednji številki revije Ventil) pa bo zajemal optimizacijo tehnoloških parametrov iste hibridne izdelave ob uporabi večje, nestandardne, ekstrudorske šobe (premer  $D = 1.1$  mm), ki je bila uporabljena zaradi skrajšanja celotnega časa izdelave. Prikazana bo tudi primerjava pridobljenih rezultatov z obema šobama.

**Ključne besede:** hibridna izdelava, ciljno nalaganje taljenega polimera, obodno freziranje, material PLA, načrtovanje eksperimentov, empirično modeliranje in optimizacija

### ■ 1 Uvod

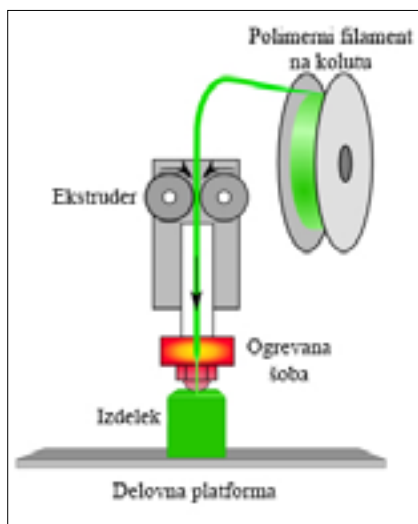
Poznanih je več različnih tehnologij izdelave polimernih izdelkov s tehnologijo dodajanja materiala po plasteh oziroma s tehnologijo 3D-ti-

Damir Grguraš, univ. dipl. inž., doc. dr. Davorin Kramar, univ. dipl. inž., David Homar, univ. dipl. inž., prof. dr. Janez Kopač, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

skanja. Ena izmed najbolj razširjenih tehnologij je ciljno nalaganje taljenega polimera (ang. *Fused Deposition Modeling – FDM*), pri kateri se izdelek gradi z dodajanjem polimera, ki prihaja iz segrete ekstrudorske šobe, plast za plastjo. Shematično je postopek prikazan na *sliki 1*. Postopek FDM je najbolj razširjen zato, ker je izdelava stroja za to tehnologijo poceni in enostavna. Natančnost, ponovljivost, hrapavost površine in izdelovalni čas pa so pri postopku FDM znatno odvisni od številnih parametrov. Izdelki, narejeni s postopkom FDM, pogosto kljub dobro iz-

branim parametrom ne izpolnjujejo zahtev po natančnosti in hrapavosti površine, vendar je to mogoče izboljšati s postopkom odrezovanja. Zato smo na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani razvili stroj za hibridno izdelavo izdelkov.

Poimenovanje hibridna izdelava ima več pomenov. V našem primeru pomeni, da je en izdelek narejen z dvema ali več popolnoma različnimi tehnologijami, s čimer so izrabljene prednosti in odstranjene pomanjkljivosti posamezne tehnologije. V našem primeru sta bili uporabljeni



**Slika 1.** Shematični prikaz FDM-postopka [1]

tehnologiji FDM: tehnologija dodajanja materiala in 3-osno frezanje kot tehnologija odzemanja materiala. Prednost postopka FDM je v tem, da lahko z njim izdelamo izdelke, ki imajo zelo kompleksno geometrijo, saj tako kot pri drugih tehnologijah dodajanja materiala po plasteh tukaj skoraj ni omejitev glede geometrije izdelka. Največja omejitev pri postopku FDM pa je slaba kakovost površine. Po drugi strani pa je postopek freziranja pravo nasprotje, saj imajo frezani izdelki visoko kakovostno površino. Vendar pa se pri freziranju pojavi nezmožnost izdelave kompleksnih zaprtih oblik, saj v tem primeru rezalno orodje ne more doseči zelene površine. Z uporabo obeh tehnologij lahko te pomanjkljivosti eliminiramo.

V znanstveni literaturi je mogoče zaslediti le nekaj raziskav na temo hibride izdelave, pri kateri so uporabljali kombinacijo tehnologij dodajanja in odzemanja. Večina člankov obravnava hibridno izdelavo na osnovi kovinskih materialov. V raziskavah, ki so jih opravili Song in ostali [2, 3], je bil razvit hibridni stroj, katerega osnova je bil 3-osni CNC-frezalni center. Na ohišje vretena frezalnega stroja je bila vertikalno pritrjena varilna pištola. Navarjanje je bilo uporabljeno za nalaganje materiala staljene varilne žice plast za plastjo s tehnologijo varjenja kovin v zaščitni atmosferi. Natančnost izdelka, narejenega s

tehnologijo dodajanja materiala po plasteh, je bila znatno izboljšana s frezanjem. V raziskavah, ki so bile opravljene v sodelovanju norveških in slovenskih raziskovalcev [4], je bil razvit koncept hibridne izdelovalne celice. Njen cilj je bil združiti komercialni stroj za tehnologijo dodajanja kovinskih materialov po plasteh in stroj za odrezovanje, ki bi se krmilila iz enega skupnega krmilnika. Nekaj operacij, ki se pojavijo pri izdelovalnih procesih, je bilo avtomatiziranih, nekaj pa odstranjenih zaradi kombinacije obeh tehnologij. Glavna prednost izdelovalne celice je, da se obdelovanec prestavlja iz enega v drug stroj na standardni vpenjalni paleti in tako je pozicija obdelovanca stalno poznana.

Kar nekaj del je bilo narejenih na področju optimiranja tehnoloških parametrov pri procesu FDM zaradi izboljšanja dimenzijske natančnosti. Uporabljenih je bilo več različnih metod optimiranja procesnih parametrov. Mohameda in ostali [5] so uporabili kriterij L-optimalnosti za optimiranje procesnih parametrov postopka FDM, ki reši optimizacijski problem, ki vključuje veliko število procesnih parametrov in nivojev postopka. Poleg tega so razvili matematični model, da bi dokazali nelinearno povezavo med procesnimi parametri in dimenzijsko natančnostjo izdelka. Kaveh in ostali [6] so predstavili eksperimentalno metodo za določitev optimalnih vrednosti posameznih procesnih parametrov pri nanašanju polistirena z visoko gostoto. Rao in Rai [7] pa sta uporabila optimizacijski algoritem, ki bazira na poučevanju in učenju (TLBO), in ne dominanten sortirni algoritem za TLBO (NSTLBO). Algoritem TLBO kaže boljše rezultate v primerjavi z uporabo genetskih algoritmov, medtem ko je algoritem NSTLBO namenjen reševanju večobjektnih problemov.

## ■ 2 Popis eksperimentalnega sistema

V tej raziskavi so bili izbrani glavni tehnološki parametri hibridne izdelave in raziskan njihov vpliv na kakovost izdelane površine, na-

tančnost izdelka in čas izdelave. Vpliv tehnoloških parametrov je bil ovrednoten na podlagi empiričnega modeliranja, ki predvideva določanje zveze med vhodnimi in izhodnimi parametri na podlagi rezultatov eksperimentov, izvedenih po predhodno določenem načrtu. Načrt eksperimentov je bil oblikovan s pomočjo metode načrtovanja. Vplivi vhodnih parametrov na izhodne so empirično popisani v obliki matematičnih modelov, pridobljenih z regresijskim modeliranjem. Z analizo variance sta določena zanesljivost regresijskih modelov in vpliv posameznega vhodnega parametra na izhodne parametre. S pomočjo regresijskih modelov so določene optimalne vrednosti tehnoloških parametrov za doseganje minimalne hrapavosti površine ob minimalni porabi materiala in časa za hibridno izdelavo. Rezultati optimizacije pa so preverjeni s potrditvenim eksperimentom.

Pri izvedbi eksperimentov se je uporabljala polilaktična kislina (ang. *Polylactic acid* – PLA), ki je poleg akrilonitril butadien stirena (ang. *Acrylonitrile butadiene styrene* – ABS) najbolj razširjen material za izdelavo po postopku FDM. Poleg ostalih tehnoloških parametrov, ki bodo opisani v naslednjem poglavju, sta se pri eksperimentih uporabljali dve različni ekstrudorski šobi. V splošnem se pri postopku FDM uporabljajo ekstrudorske šobe s premerom izhodne odprtine med 0.2 in 0.5 mm, največkrat pa je to 0.4 mm. Z večjim premerom izhodne odprtine šobe se manjša kakovost površine izdelka. Prva šoba, ki smo jo uporabili, je imela premer izhodne odprtine 0.4 mm. Ker pa smo želeli skrajšati čas izdelave, smo uporabili tudi večjo, nestandardno, ekstrudorsko šobo s premerom izhodne odprtine 1.1 mm. Pri tej šobi je bilo po postopku FDM pričakovati znatno poslabšanje kakovosti površine. V našem primeru pa smo na hibridnem stroju s postopkom obodnega freziranja opazno izboljšali kakovost površine in tudi natančnost. V tem prispevku so predstavljeni rezultati optimizacije tehnoloških parametrov, ki smo jih

dobili s standardno ekstrudorsko šobo s premerom izhodne odprtine 0.4 mm. Rezultati optimizacije tehnoloških parametrov, dobljeni z nestandardno ekstrudorsko šobo premera izhodne odprtine 1.1 mm, pa bodo predstavljeni v II. delu tega prispevka, ki bo objavljen v naslednji številki revije Ventil. V II. delu bo analizirana in opisana tudi primerjava med obema ekstrudorskima šobama. V obeh primerih so bili eksperimenti in meritve opravljene na eksperimentalnem vzorcu v obliki kocke s stranicami 22 mm.

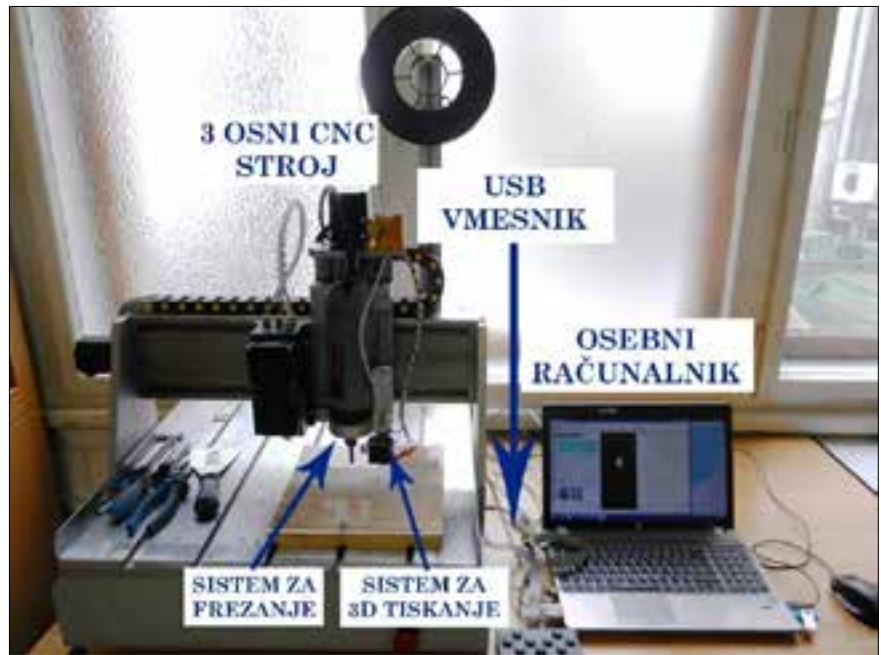
Za izdelavo vzorčnih izdelkov je bil uporabljen stroj za hibridno izdelavo, ki je prikazan na *sliki 2*. Stroj vključuje dva izdelovalna sistema, in sicer sistem za dodajanje materiala po postopku FDM in sistem za 3-osno frezanje. Velika prednost razvitega stroja je, da obe tehnologiji uporabimo pri enem vpetju. Filament – material, ki ga potiska ekstrudor, se v ogrevano glavo, ki je bila prav tako izdelana na Fakulteti za strojništvo, dodaja skozi teflonsko cevko. Za sistem frezanja pa je uporabljeno vreteno z motorjem 800 FME proizvajalca Kress. Nazivna vhodna moč vretena je 800 W, vreteno pa ima možnost nastavljanja izhodnih vrtiljajev, in sicer od 10.000 do 29.000  $\text{min}^{-1}$ . Pri eksperimentih smo uporabili frezalo premera 8 mm z oznako: Widin Co. Ltd Zamus end mill TX302080.

### ■ 3 Priprava, načrtovanje in izvedba eksperimentov

V fazi priprave eksperimentov smo izbrali vhodne parametre in njihove mejne vrednosti. Vhodni tehnološki parametri hibridne izdelave so bili določeni na podlagi izkušenj in so naslednji: vrtilna frekvenca frezala  $n$

**Tabela 1.** Vrednosti vhodnih parametrov na posameznih nivojih

		Vhodni parametri					
		$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$h$ [mm]	$\phi$ [%]	$v$ [mm/s]	$v_f$ [mm/min]	$a_p$ [mm]
Nivo 1	-1	10000	0.1	55.0	15	200	0.1
Nivo 2	0	15500	0.2	67.5	40	400	0.2
Nivo 3	+1	21000	0.3	80.0	65	600	0.3



**Slika 2.** Stroj za hibridno izdelavo z osebnim računalnikom za krmiljenje

[ $\text{min}^{-1}$ ], višina plasti nalaganja materiala  $h$  [mm], kompenzacijski pretok materiala  $\phi$  [%] (potrebna količina materiala za FDM je pomnožena z vrednostjo tega kompenzacijskega pretoka), hitrost nalaganja materiala  $v$  [mm/s] (hitrost, s katero se premika ekstrudorska šoba pri nalaganju materiala), podajalna hitrost frezala  $v_f$  [mm/min] in globina frezanja  $a_p$  [mm]. Sledilo je določanje mejnih vrednosti vhodnih parametrov, ki smo jih določili na podlagi poskusnih eksperimentov in s pomočjo predlaganih vrednosti iz računalniškega programa CURA, ki služi za pridobitev CNC-kode za postopek FDM. Odločili smo se, da bomo vsak vhodni parameter nastavljali na treh nivojih. Kot nivo -1 smo upoštevali minimalne vrednosti parametrov, kot nivo +1 pa maksimalne vrednosti. Vrednosti na srednjem nivoju 0 smo dobili kot srednjo vrednost med nivojema -1 in +1 (*tabela 1*). Za načrtovanje eksperimentov s šestimi parametri

na treh nivojih smo izbrali Taguchijevo ortogonalno matriko  $L_{27}$  ( $3^{13}$ ). Tako smo dobili načrt eksperimentov s 27 eksperimenti, ki je prikazan v tabeli 2 levo od odebeljene črte. Desno od odebeljene črte pa so prikazane povprečne izmerjene vrednosti izhodnih parametrov pri posameznem eksperimentu. Kot izhodne parametre – odzive – smo določili naslednje parametre: hrupavost površine po hibridni izdelavi  $Ra$  in  $Ry$  [ $\mu\text{m}$ ] v smeri nalaganja materiala (indeks  $l$ ) in prečno na to smer (indeks  $h$ ), poraba materiala pri hibridni izdelavi  $MD$  [m] in čas, potreben za hibridno izdelavo  $t$  [s].

### ■ 4 Rezultati

*Tabela 2* prikazuje načrt in rezultate izvedbe eksperimentov. Vpliv vhodnih tehnoloških parametrov na izhodne smo popisali tudi z empiričnimi (regresijskimi) modeli, ki smo jih pridobili in ovrednotili s pomočjo računalniškega programa *Design-Expert*, ki razvije in analizira regresijske modele na osnovi ANOVE. Ovrednotenje pridobljenih regresijskih modelov je prikazano v *tabeli 3*. V nadaljevanju so predstavljeni regresijski modeli in njihova razlaga s pomočjo pripadajočih grafov. Na koncu je izvedena še optimizacija tehnoloških parametrov hibridne izdelave glede na zastavljene kriterije optimizacije.

Tabela 2. Načrt in rezultati izvedbe eksperimentov

N	n [min <sup>-1</sup> ]	h [mm]	φ [%]	v [mm/s]	v <sub>f</sub> [mm/min]	a <sub>p</sub> [mm]	R <sub>ah</sub> [μm]	R <sub>yh</sub> [μm]	R <sub>al</sub> [μm]	R <sub>yl</sub> [μm]	MD [m]	t [s]
1	10000	0.1	55.0	15	200	0.1	5.69	47.35	4.97	44.15	1.02	8066
2	10000	0.1	67.5	40	400	0.2	5.05	42.40	6.57	48.02	1.21	7324
3	10000	0.1	80.0	65	600	0.3	5.86	45.63	6.62	50.40	1.48	7191
4	10000	0.2	55.0	40	400	0.3	3.89	45.11	5.85	47.16	1.02	3715
5	10000	0.2	67.5	65	600	0.1	2.43	22.18	4.19	37.27	1.24	3647
6	10000	0.2	80.0	15	200	0.2	5.55	40.55	5.71	43.97	1.48	4100
7	10000	0.3	55.0	65	600	0.2	1.93	25.18	2.39	23.58	1.01	2477
8	10000	0.3	67.5	15	200	0.3	5.82	41.24	6.28	44.95	1.24	2776
9	10000	0.3	80.0	40	400	0.1	4.71	50.47	5.50	38.99	1.48	2522
10	15500	0.1	55.0	40	600	0.2	5.45	48.25	5.68	46.61	1.02	7313
11	15500	0.1	67.5	65	200	0.3	3.53	27.65	4.05	29.91	1.24	7210
12	15500	0.1	80.0	15	400	0.1	5.33	45.29	5.80	41.53	1.48	8053
13	15500	0.2	55.0	65	200	0.1	7.96	82.49	5.62	48.47	1.02	3668
14	15500	0.2	67.5	15	400	0.2	5.68	45.58	5.47	41.10	1.24	4082
15	15500	0.2	80.0	40	600	0.3	6.06	46.26	6.69	52.11	1.48	3714
16	15500	0.3	55.0	15	400	0.3	6.13	50.70	6.62	47.77	1.01	2761
17	15500	0.3	67.5	40	600	0.1	5.29	42.10	5.54	45.38	1.24	2516
18	15500	0.3	80.0	65	200	0.2	5.37	41.39	5.30	40.88	1.48	2496
19	21000	0.1	55.0	65	400	0.3	5.29	42.82	5.71	44.66	1.02	7202
20	21000	0.1	67.5	15	600	0.1	6.71	48.43	6.33	45.22	1.24	8043
21	21000	0.1	80.0	40	200	0.2	2.88	26.48	2.67	19.78	1.48	7337
22	21000	0.2	55.0	15	600	0.2	6.20	48.38	5.76	45.69	1.02	4079
23	21000	0.2	67.5	40	200	0.3	5.37	52.67	5.58	47.86	1.24	3736
24	21000	0.2	80.0	65	400	0.1	5.14	47.09	5.44	43.72	1.48	3657
25	21000	0.3	55.0	40	200	0.1	6.56	70.75	5.61	49.68	1.01	2540
26	21000	0.3	67.5	65	400	0.2	6.26	52.78	5.52	48.43	1.23	2482
27	21000	0.3	80.0	15	600	0.3	6.27	47.76	6.93	53.11	1.48	2759

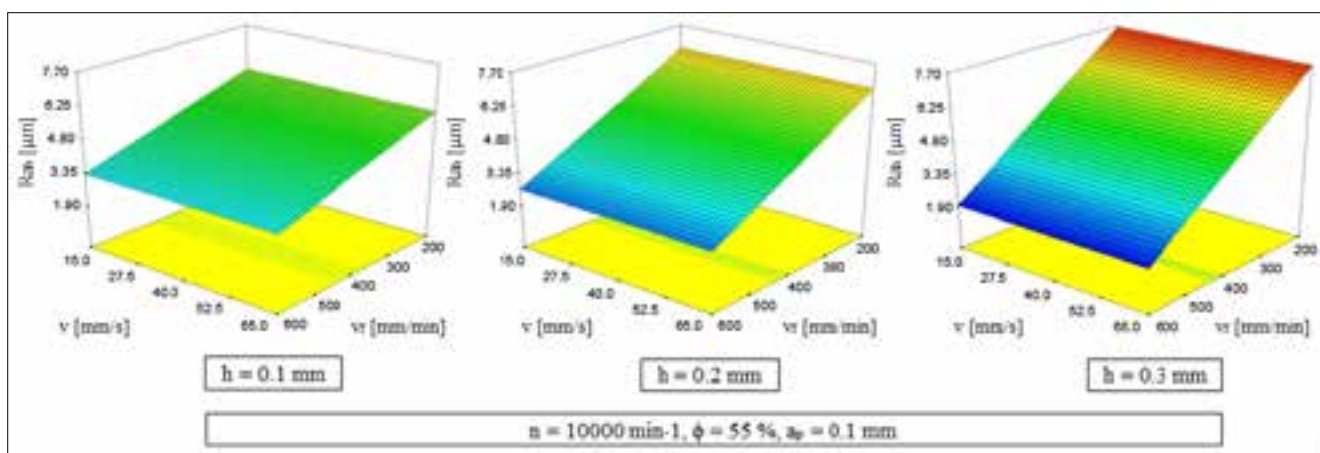
### 4.1 Regresijski model za hrapavost Ra prečno na smer nalaganja materiala (Rah)

S slike 3 je razvidno, da minimalno hrapavost  $R_{ah}$  dosežemo pri maksimalni višini plasti nalaganja materiala h. Maksimalna vrednost te višine plasti privede do manjšega števila prehodov med plastmi celotnega izdelka, kar posledično pomeni manj vdolbin med plastmi, ki bi jih konica merilne naprave zaznala pri merjenju hrapavosti. Nadalje lahko ugotovimo, da hitrost nalaganja materiala v nima velikega vpliva na hrapavost, podajalna hitrost frezala v<sub>f</sub> pa vpliva obratno sorazmerno na hrapavost, kajti minimalno hrapavost  $R_{ah}$  dosežemo ob maksimalni podajalni hitrosti frezala v<sub>f</sub>. Takrat frezalo potuje hitreje in ima manj časa, da bi toplotno vplivalo na površino materiala ter posledično tudi na hrapavost.

Tabela 3. Ovrednotenje regresijskih modelov

Odziv	F-vrednost	p-vrednost	Regresor – vplivni parameter Neznačilni hierarhični parameter	R <sup>2</sup>	Adj-R <sup>2</sup>	Pred-R <sup>2</sup>	S/N
$R_{ah}$	9.03	<0.0001	$n, n \cdot v_f, h \cdot v_f, \phi \cdot v_f, n^2, h, \phi, v_f$	0.801	0.712	0.5379	12.48
$R_{yh}$	5.83	0.0011	***	0.811	0.672	0.164	10.88
$R_{al}$	8.99	<0.0001	$a_p, n \cdot v_f, h \cdot v_f, \phi \cdot v_f, v_f^2, n, h, \phi, v_f, n \cdot h$	0.849	0.755	0.597	12.28
$R_{yl}$	12.27	<0.0001	$n, v_f, a_p, n \cdot h, n \cdot v_f, h \cdot v_f, \phi \cdot v_f, v_f^2, h, \phi, v_f, \phi \cdot v, h^2$	0.925	0.849	0.668	15.04
MD	39259.52	<0.0001	$\phi$	0.999	0.999	0.999	343.19
t	3121.86	<0.0001	$h, v$	0.996	0.996	0.995	123.40

\*\*\* Opomba: Neuporaben model, ker se Adj-R2 in Pred-R2 razlikujeta za več kot 0.2.



Slika 3. Vpliv hitrosti nalaganja materiala v in podajalne hitrosti frezala v<sub>f</sub> na hrapavost Ra<sub>h</sub> pri različnih višinah plasti nalaganja materiala h

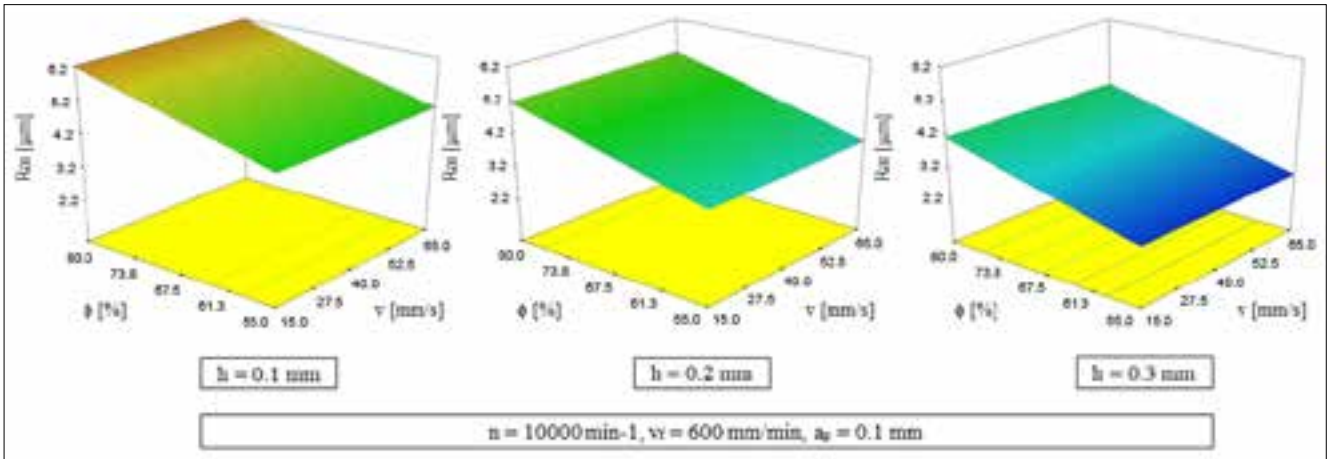
$$Ra_h = 12.07961 + 3.2641 \cdot 10^{-4} \cdot n + 18.38333 \cdot h - 0.15542 \cdot \phi - 0.030158 \cdot v_f + 8.49242 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot v_f - 0.042417 \cdot h \cdot v_f + 3.67 \cdot 10^{-4} \cdot \phi \cdot v_f - 1.83104 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 \quad (1)$$

**4.2 Regresijski model za hrapavost  $Ra$  v smeri nalaganja materiala ( $Ra_l$ )**

hrapavosti  $Ra_h$  veljajo tudi tukaj. In sicer: minimalno hrapavost  $Ra_l$  dosežemo pri maksimalni višini plasti

sežemo ob uporabi minimalnega kompenzacijskega pretoka materiala  $\phi$ .

$$Ra_l = 10.85149 - 3.71616 \cdot 10^{-4} \cdot n + 7.16414 \cdot h - 0.082622 \cdot \phi - 7.27924 \cdot 10^{-3} \cdot v_f + 2.96111 \cdot a_p + 5.80808 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot h + 6.75758 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot v_f - 0.038625 \cdot h \cdot v_f + 2.33778 \cdot 10^{-4} \cdot \phi \cdot v_f - 1.25556 \cdot 10^{-5} \cdot v_f^2 \quad (2)$$



**Slika 4.** Vpliv kompenzacijskega pretoka materiala  $\phi$  in hitrosti nalaganja materiala  $v$  na hrapavost  $Ra_l$  pri različnih višinah plasti nalaganja materiala  $h$

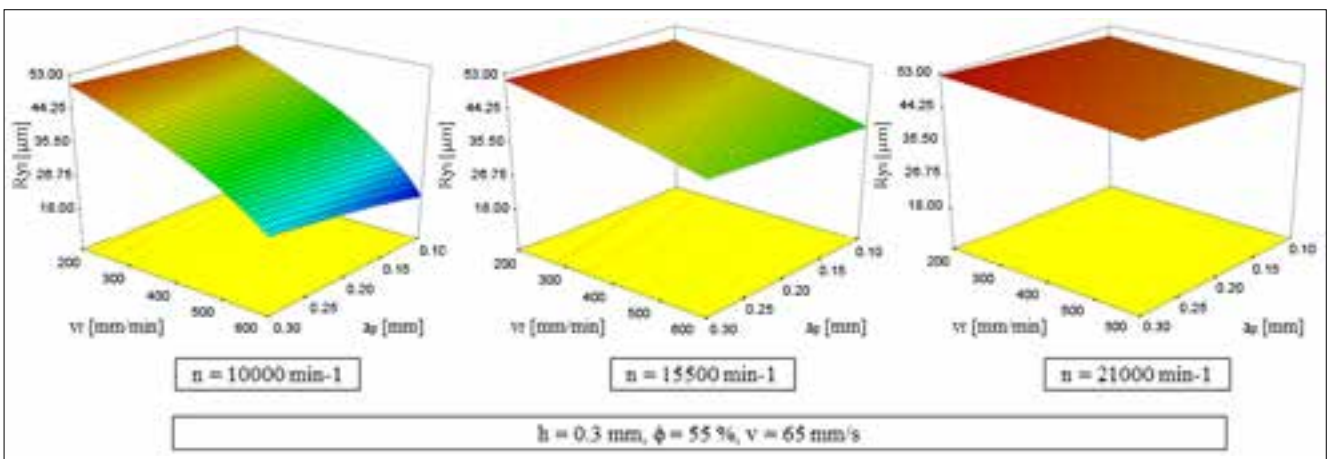
Slika 4 prikazuje vpliv kompenzacijskega pretoka materiala  $\phi$  in hitrosti nalaganja materiala  $v$  na hrapavost  $Ra_l$  pri različnih višinah plasti nalaganja materiala  $h$ . Vidimo, da enake ugotovitve kot pri

nalaganja materiala  $h$ , kjer pa hitrost nalaganja materiala  $v$  nima vpliva. Vidimo pa, da parameter kompenzacijskega pretoka materiala  $\phi$  vpliva premo sorazmerno. Minimalno hrapavost  $Ra_l$  tako do-

**4.3 Regresijski model za hrapavost  $Ry$  v smeri nalaganja materiala ( $Ry_l$ )**

Minimalno hrapavost  $Ry_l$  dosežemo pri uporabi minimalne vrtilne fre-

$$Ry_l^{2.68} = 71475.11377 - 3.97046 \cdot n + 86279.98635 \cdot h - 613.28730 \cdot \phi + 1212.98635 \cdot v - 158.1637 \cdot v_f + 22158.41371 \cdot a_p + 10.87269 \cdot n \cdot h + 5.37597 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot v_f - 295.27319 \cdot h \cdot v_f - 6.99385 \cdot \phi \cdot v + 2.15472 \cdot \phi \cdot v_f - 3.08891 \cdot 10^{-5} \cdot h^2 - 8.9001 \cdot v^2 \quad (3)$$



**Slika 5.** Vpliv podajalne hitrosti  $v_f$  in globine frezanja  $a_p$  na hrapavost  $Ry_l$  pri različnih vrtilnih frekvencah  $n$

kvence  $n$  ter maksimalne podajalne hitrosti frezala  $v_f$ . To lahko razložimo na enak način kot pri regresijskem modelu  $Ra_r$ , kajti z večjo podajalno hitrostjo frezala  $v_f$  to potuje najhitreje in ima manj časa, da bi toplotno vplivalo na površino materiala. Enako velja za vrtilno frekvenco frezala  $n$ . Počasneje se vrti, manj segreva material. Preveč segret material – polimer – se lahko začne ovijati okoli frezala, če izberemo parametre v nasprotju s temi trditvami, kar lahko poslabša hrapavost obdelane površine. S *slike 5* opazimo tudi vpliv globine frezanja  $a_p$ , in sicer: najmanjša globina frezanja  $a_p$  privede do minimalne hrapavosti  $Ry_r$ .

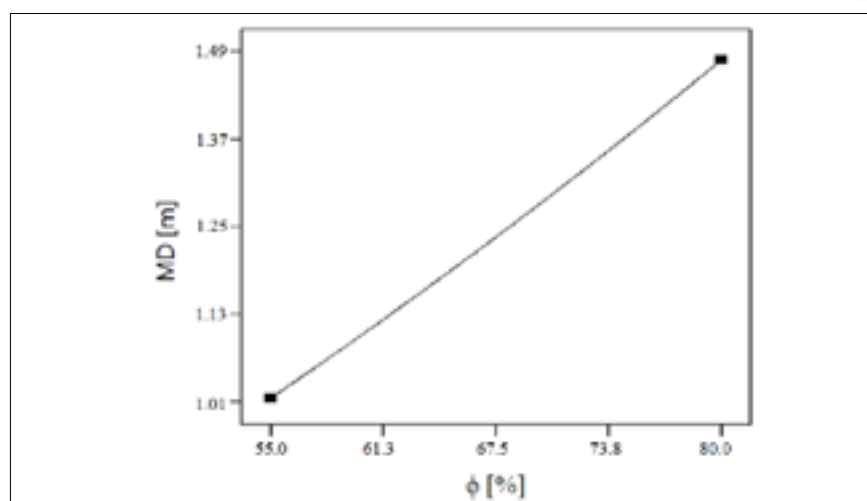
#### ■ 4.4 Regresijski model za porabo materiala pri hibridni izdelavi MD

Že pri regresijskem modelu  $Ra_r$  smo ugotovili, da je minimalna vrednost kompenzacijskega pretoka  $\phi$  najbolj ugodna z vidika hrapavosti. Enako velja tudi z vidika porabe materiala MD, kar je razvidno s *slike 6*.

#### ■ 4.5 Regresijski model za čas, potreben za hibridno izdelavo t

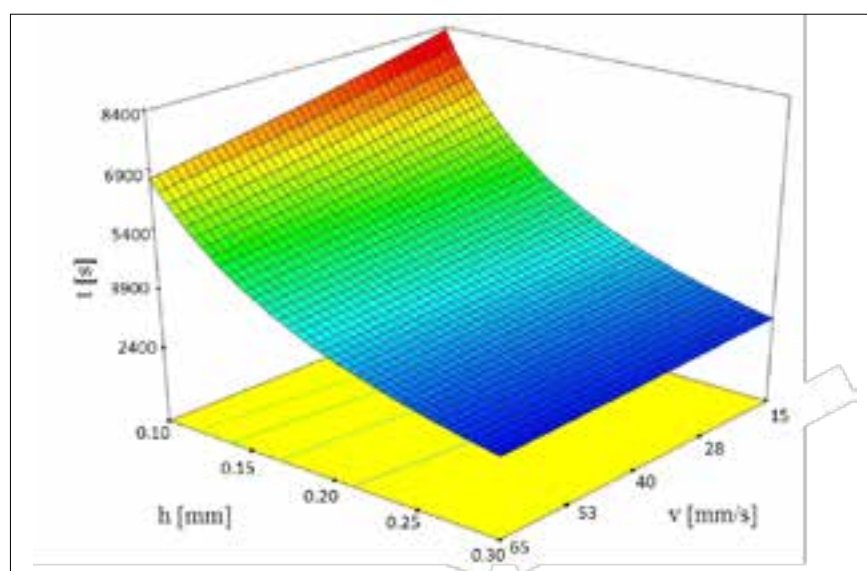
Vpliv višine plasti nalaganja materiala  $h$  in hitrosti nalaganja materiala  $v$  na čas za hibridno izdelavo  $t$  prikazuje *slika 7*. Vidimo, da na čas, potreben za hibridno izdelavo  $t$ , vplivajo le parametri postopka FDM, saj traja postopek frezanja relativno kratko glede na celoten čas hibridne izdelave, zato lahko parametre frezanja izključimo iz regresijskega modela. Ta ugotovitev velja ob predpostavki, da s postopkom FDM izdelujemo izdelke enakih ali manjših dimenzij kakor v tej študiji. Pri izdelavi izdelkov večjih dimenzij pa bi časovni delež frezanja postal večji in tako bi lahko tudi parametri frezanja postali vplivni na regresijski model za čas, potreben za hibridno izdelavo  $t$ . Največji vpliv ima tako višina plasti nalaganja materiala  $h$ , in sicer: višja kot je plast nalaganja materiala, krajši je čas hibridne izdelave. Vpliv hitrosti nalaganja materiala  $v$  nima tako signifikantnega vpliva na čas hibridne izdelave  $t$ ,

$$\sqrt{MD} = 0.54968 + 8.32623 \cdot 10^{-3} \cdot \phi \quad (4)$$



**Slika 6.** Vpliv kompenzacijskega pretoka materiala  $\phi$  na porabo materiala pri hibridni izdelavi MD

$$\frac{1}{t} = -1.488 \cdot 10^{-5} + 1.2647 \cdot 10^{-3} \cdot h + 5.61659 \cdot 10^{-7} \cdot v \quad (5)$$



**Slika 7.** Vpliv višine plasti nalaganja materiala  $h$  in hitrosti nalaganja materiala  $v$  na čas za hibridno izdelavo  $t$

**Tabela 4.** Optimalni vhodni tehnološki parametri in rezultati potrditvenega eksperimenta

Optimalni vhodni parametri		Izhodni parametri	Predvidene vrednosti z optimizacijo	Izmerjene vrednosti pri potrditvenem eksperimentu
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	10000	Rah [ $\mu\text{m}$ ]	1.96	2.05
$h$ [mm]	0.3	Ryh [ $\mu\text{m}$ ]	neuporaben model	ni merjeno
$\phi$ [%]	55	Ral [ $\mu\text{m}$ ]	2.71	2.74
$v$ [mm/s]	64	Ryl [ $\mu\text{m}$ ]	18.56	19.24
$v_f$ [mm/min]	600	MD [m]	1.02	1.01
$a_p$ [mm]	0.1	$t$ [s]	2494	2496

a je vseeno smotrno, da izberemo najvišjo hitrost  $v$ , saj stremimo k minimalnemu času hibridne izdelave.

#### ■ 4.6 Optimizacija parametrov hibridne izdelave

Pridobljene regresijske modele smo izkoristili za optimizacijo vhodnih tehnoloških parametrov hibridne izdelave za doseg minimalne hrapavosti površine, minimalne porabe materiala in minimalnega potrebne časa za izdelavo. Optimalne parametre, ki se skladajo z našimi ugotovitvami, pridobljene z interpretacijo grafov regresijskih modelov, smo preverili s potrditvenim eksperimentom, ki je potrdil rezultate optimizacije, kar prikazuje *tabela 4*.

#### ■ 5 Zaključki

Prednost hibridnih izdelav je, da združijo dobre lastnosti vseh uporabljenih izdelovalnih tehnologij in obenem odstranijo slabe lastnosti posamezne izdelovalne tehnologije. V prispevku je predstavljena hibridna izdelava s postopkom FDM in obodnim frezanjem. V I. delu prispevka je bila pri postopku FDM uporabljena ekstrudorska šoba standardnega premera 0.4 mm. Izvedena je bila optimizacija parametrov te hibridne izdelave, optimalni parametri pa so bili potrjeni s potrditvenim eksperimentom. V naslednji številki revije Ventil bo objavljen II. del prispevka, v katerem bo predstavljena optimizacija tehnoloških parametrov hibridne izdelave, pri kateri smo pri postopku FDM uporabili ekstrudorsko šobo s premerom 1.1 mm, kar bistveno skrajša čas izdelave brez večjih sprememb in vplivov na hrapavost površine. Prav tako bodo v II. delu podani primerjava rezultatov optimizacije med obema šobama in predlogi za nadaljnje delo.

Pri analizi vpliva parametrov hibridne izdelave smo v I. delu prispevka uspešnost izvedbe eksperimentov potrdili s statistično zanesljivimi matematičnimi modeli za hrapavost površine, porabo materiala in časa za hibridno izdelavo. Na podlagi analize regresijskih modelov smo

glede na testirane parametre hibridne izdelave (vrtilna frekvenca frezala  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ], višina plasti nalaganja materiala  $h$  [mm], kompenzacijski pretok materiala  $\phi$  [%], hitrost nalaganja materiala  $v$  [mm/s], podajalna hitrost frezala  $v_f$  [mm/min] in globina frezanja  $a_p$  [mm]) ugotovili:

##### 1) Hrapavost površine po hibridni izdelavi:

Pri hrapavosti opazimo vpliv vseh parametrov frezanja in dveh parametrov ciljnega nalaganja polimera, in sicer: višine plasti nalaganja materiala  $h$  in kompenzacijskega pretoka materiala  $\phi$ . Tako ugotovimo, da je v tem primeru edini nevplivni parameter hitrost nalaganja materiala  $v$ . Od parametrov frezanja je najvplivnejša vrtilna frekvenca frezala  $n$ , pri čemer najmanjše vrednosti hrapavosti dosegamo z njeno minimalno vrednostjo. Minimalna vrtilna frekvenca frezala  $n$  povzroči, da frezalo ne segreje preveč material, ki bi se nato lahko ovil na frezalo in poslabšal obdelano površino. Podobno velja tudi za podajalno hitrost frezanja  $v_f$ , pri kateri stremimo, da je maksimalna. Iz rezultatov je razvidno, da je za nižjo hrapavost najbolj primerna minimalna globina frezanja  $a_p$ . Od parametrov ciljnega nalaganja polimera je najvplivnejša višina plasti nalaganja materiala  $h$ . Opazili smo, da dobimo najnižjo vrednost hrapavosti pri maksimalni višini plasti nalaganja materiala  $h$ . Razlog je manjše število prehodov med plastmi, ki bi jih konica merilnika na svoji poti lahko zaznala. Kompenzacijski pretok materiala  $\phi$  daje minimalno hrapavost pri svoji najmanjši vrednosti.

##### 2) Poraba materiala pri hibridni izdelavi:

Na porabo materiala pri hibridni izdelavi vpliva le en parameter, in sicer kompenzacijski pretok materiala  $\phi$ . Vpliv kompenzacijskega pretoka materiala na hrapavost je linearen, najnižjo hrapavost pa dobimo pri minimalni vrednosti tega parametra.

##### 3) Čas za hibridno izdelavo:

Večina časa za hibridno izdelavo se po-

rabi za ciljno nalaganje taljenega polimera, zato v modelu nastopajo le parametri tega postopka. Ta ugotovitev velja ob predpostavki, da s postopkom FDM izdelujemo izdelke enakih ali manjših dimenzij kakor v tej študiji. Pri izdelavi izdelkov večjih dimenzij bi časovni delež frezanja postal večji, tako bi lahko tudi parametri frezanja postali vplivni na celoten čas oz. na regresijski model za čas, potreben za hibridno izdelavo  $t$ . Najvplivnejši parameter na čas za hibridno izdelavo je tako višina plasti nalaganja materiala  $h$ , ki jo želimo imeti maksimalno. Maksimalna višina plasti nalaganja materiala  $h$  pomeni manjše število izdelanih plasti, kar privede do velikega prihranka na času. Hitrost nalaganja materiala  $v$  ima minimalen vpliv na čas hibridne izdelave. Vseeno pa je smotrno, da izberemo najvišjo hitrost, saj stremimo k minimalnemu času hibridne izdelave.

Da bi dosegli minimalno hrapavost površine ob minimalni porabi materiala in minimalnem času hibridne izdelave, se znotraj razpona testiranih (vhodnih) parametrov hibridne izdelave ob uporabi standardne ekstrudorske šobe premera 0.4 mm priporočajo naslednje vrednosti:

- vrtilna frekvenca frezala  $n = 10000 \text{ min}^{-1}$ ,
- višina plasti nalaganja materiala  $h = 0.3 \text{ mm}$ ,
- kompenzacijski pretok materiala  $\phi = 55 \%$
- hitrost nalaganja materiala  $v = 65 \text{ mm/s}$ ,
- podajalna hitrost frezala  $v_f = 600 \text{ mm/min}$ ,
- globina frezanja  $a_p = 0.1 \text{ mm}$ .

##### Viri

- [1] Shematični prikaz postopka FDM. Dostopno na: <http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/2/22/FFF.png/400px-FFF.png>, ogled: 2. 6. 2015.
- [2] Song, Y. Ak., Park, S., Choi, D., Jee, H.: 3D welding and milling: Part I – a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. International Jour-

- nal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, pp 1057–1062, 2005.
- [3] Song, Y. Ak., Park, S., Choi, D., Chae, S. W.: 3D welding and milling: Part II – optimization of the 3D welding process using an experimental design approach. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, pp 1063–1069, 2005.
- [4] Boivie, K., Homar, D., Dolinšek, S., Broetan, V.: The hybrid manufacturing cell : an integrated solution for additive manufacturing with CNC machining. 4th International Conference on Additive Technologies iCAT2012, Maribor, Slovenia, pp 1–15, 2012.
- [5] Mohameda, O. A., Masooda, S. H., Bhowmik, J. L.: Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion. Measurement, vol. 81, pp 174–196, 2016.
- [6] Kaveh, M., Badrossamay, M., Foroozmehr, E., Etefagh, A. H.: Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes. Journal of Materials Processing Technology, vol. 226, pp 280–286, 2015.
- [7] Rao, R. V. and Rai, D. P.: Optimization of fused deposition modeling process using teaching-learning-based optimization algorithm. Engineering Science and Technology, vol. 19, pp 587–603, 2016.

### Hybrid manufacturing with fused deposition modeling and milling:

#### Part I – optimization of the technological parameters in hybrid manufacturing using standard extruder nozzle size

**Abstract:** Products with highly complex geometries are sometimes difficult to produce in a conventional way by machining. Then it is an easier and more affordable solution to create products with additive manufacturing which has a weakness for a slightly reduced quality of the external surface. This weakness can be improved by additional machining. Such hybrid manufacturing is presented in this two-part paper. Fused deposition modeling (FDM) is used for creating a product, and the outer surface of the product model is then improved with peripheral milling. Part I of the paper contains the optimization of the technological parameters in hybrid manufacturing using standard nozzle size (diameter  $D = 0.4$  mm) for FDM. In Part II (in the next number of the magazine Ventil), the optimization of the technological parameters in hybrid manufacturing using bigger, non-standard nozzle size (diameter  $D = 1.1$  mm) in order to achieve a shorter production time will be presented. A comparison of both nozzle sizes will be given.

**Keywords:** hybrid manufacturing, fused deposition modeling, peripheral milling, PLA material, design of experiments, empirical modeling and optimization

## Znanstvene in strovne prireditve

**58. Internationale Maschinenbau-messe MSV in Tschechien – 58. Mednarodni sejem strojništva na Češkem**

3. – 10. 10. 2016

**Brunn, ZR Nemčija**

*Organizator:*

- Die Deutsch-Tschechische Industrie- und Handelskammer – (DTIHK) – Nemško-češka industrijska in trgovska zbornica (Združenje združuje predvsem majhna in srednja podjetja iz nemških zveznih dežel Bavarske, Hesna ter Češke)

*Področja sejma:*

- kovinska predelovalna industrija, livarstvo, varilna tehnika, površinska tehnika, plastične mase (umetne snovi, guma, lepila)

*Informacije:*

- [www.dtihk.cz](http://www.dtihk.cz)

**IHA – Seminar zur Wartung und Inspektion hydrostatischer Antreibe – IHA – Seminar o vzdrževanju in inspekciji hidrostatičnih pogonov**

*IHA – Seminar o vzdrževanju in inspekciji hidrostatičnih pogonov*

*Organizator:*

- IMA – Akademie, TU Dresden

*Tematika:*

- Tridnevni seminar o vzdrževanju in popravilih ter inspekciji hidrostatičnih pogonov s praktičnimi vajami preskušanja

*Informacije:*

- [www.hydraulik-akademie.de](http://www.hydraulik-akademie.de)

**International Rotating Equipment Conference des VDMA – Mednarodna konferenca o rotacijski opremi v okviru VDMA**

14. in 15. 9. 2016

**Düsseldorf, ZRN**

*Organizatorji:*

- Pumpen Anwendungsforum
- Internationale Kompressoren-Anwendungsforum
- European Forum for Reciprocating Compressors (EFRC)

*Tematika:*

- Novi trendi razvoja črpalk in kompresorjev

*Informacije:*

- [www.vdma.org](http://www.vdma.org)

... nadaljevanje na strani 357